

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 21
2015
№ 11

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Левин В. И. Интервально-дифференциальные уравнения и моделирование систем в условиях неопределенности. 803
- Дергачев К. В., Капулин Д. В., Казанцев М. А. Автоматизированная система управления складом уровня цеха для проектного производства 808
- Харламов А. А., Ермоленко Т. В. Нейросетевая среда (нейроморфная ассоциативная память) для преодоления информационной сложности. Поиск смысла в слабоструктурированных массивах информации. Часть I. Структурная обработка информации в коре 814

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Рыжова Д. И., Соловьев А. Н., Стемповский А. Л. Методы синтеза помехозащищенных комбинационных блоков 821
- Кузьмина И. А. Проектирование оптимальной структуры распределительной сети энергоснабжения с учетом перспектив развития города. 827

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

- Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А. Методика построения веб-сервисов для расчета чувствительности передаточных функций к вариации параметров 834

БАЗЫ ДАННЫХ

- Цвященко Е. В. Анализ адекватности модели согласования реплик в конечном счете в базах данных NoSQL 840

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Мандрикова О. В., Соловьев И. С., Заляев Т. Л. Методы анализа вариаций геомагнитного поля и данных космических лучей 849

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Пенджиев А. М., Пенжиев М. А. Геоинформационные системы в солнечной энергетике Туркменистана 856

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

- Барский А. Б. "Живое" моделирование и объемная экранизация 863

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ

- Абдуллаев Н. Т., Дышин О. А., Керимова М. И. Дифференциальная диагностика заболевания желудочно-кишечного тракта на основе мультифрактального анализа электрогастроэнтерографических сигналов 871

ИНФОРМАЦИЯ

878

Главный редактор:
СТЕМПОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:
ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:
БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.
КУЛЕШОВ А. П.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ПОПКОВ Ю. С.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РУСАКОВ С. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОЙФЕР В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ И. А., акад.
РАН, д. т. н., проф.
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШАХНОВ В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШОКИН Ю. И.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ЮСУПОВ Р. М.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:
АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.
ГАЛУШКИН А. И., д. т. н., проф.
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.
ЗАГИДУЛЛИН Р. Ш., к. т. н., доц.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. М., д. т. н., проф.
КУХАРЕНКО Б. Г., к. ф.-м. н., доц.
ЛВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ЧЕРМОШЕНЦЕВ С. Ф., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЛЫСЕНКО А. В.
ЧУГУНОВА А. В.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

INFORMATION TECHNOLOGIES

INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 21
2015
No. 11

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Levin V. I.** The Interval-Differential Equations and Modelling of Systems in Condition of Uncertainty 803
- Dergachev K. V., Kapulin D. V., Kazantsev M. A.** Shop-Level Warehouse Management System for Project Manufacturing 808
- Kharlamov A. A., Yermolenco T. V.** Neuronetwork Environment (Neuromorphic Associative Memory) for Negotiation of Information Complexity. Meaning Identification in Semistructured Information Corpuses. Part I. Structured Information Processing in Cortex. 814

CAD-SYSTEMS

- Gavrilov S. V., Ivanova G. A., Ryzhova D. I., Soloviev A. N., Stempkovskiy A. L.** Methods of Noise Immunity Combinational Blocks Synthesis 821
- Kuzmina I. A.** The Optimal Struct of Urban Distributing Power Network Development with Long-Term City Future Development. 827

SOFTWARE ENGINEERING

- Gridin V. N., Dmitrevich G. D., Anisimov D. A.** A Method for Constructing Web Services to Calculate the Sensitivity Transfer Functions to the Variation of Parameters. . . 834

DATABASE

- Tsviashchenko E. V.** Adequacy Analysis of the Model of Replicas Agreement Eventually in NoSQL Databases 840

DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Mandrikova O. V., Solovov I. S., Zalyaev T. L.** Methods of Analysis of Geomagnetic Field Variations and Cosmic Ray Data 849

GEOINFORMATION SYSTEMS

- Penjiyev A. M., Penjiyev M. A.** Geoinformation Systems in Solar Power of Turkmenistan 856

COMPUTER GRAPHICS

- Barsky A. B.** "Live" Simulation and Volumetric Screening 863

INFORMATION TECHNOLOGIES IN BIOMEDICAL SYSTEMS

- Abdullayev N. T., Dyshin O. A., Kerimova M. I.** Differential Diagnosis Gastrointestinal Diseases on the Basis of the Multifractal Analysis the Electrogastrorenterographic Signals 871

INFORMATION

878

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Galushkin A. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zagidullin R. Sh., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kukhareno B. G., Cand. Sci. (Phys.-Math.)
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Chermoshentsev S. F., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.
Grigorin-Ryabova E. V.
Lysenko A. V.
Chugunova A. V.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

УДК 62-50:519.7/8

В. И. Левин, д-р техн. наук, проф., e-mail: vilevin@mail.ru,
Пензенский государственный технологический университет

Интервально-дифференциальные уравнения и моделирование систем в условиях неопределенности

Рассматривается обобщение обыкновенных дифференциальных уравнений на интервальный случай. Дается общее понятие интервально-дифференциального уравнения, его порядка, а также решения интервально-дифференциальных уравнений. Описан разработанный подход к решению интервально-дифференциальных уравнений. Доказывается, что любое интервально-дифференциальное уравнение можно свести к системе из двух обычных алгебраических уравнений. Приведен алгоритм решения уравнений.

Ключевые слова: интервально-дифференциальное уравнение, интервальная производная, система, неопределенность

Введение

В различных областях науки и техники очень часто встречаются задачи, для решения которых нужно решить одно уравнение или систему уравнений, содержащих производные искомых функций. Такие уравнения называются дифференциальными уравнениями. Теория и разнообразные методы решения таких уравнений разработаны весьма подробно [1]. При этом всегда предполагается, что все фигурирующие в уравнениях функции являются полностью определенными. Однако на практике задачи, сводящиеся к решению дифференциальных уравнений, весьма часто связаны с исследованием неполностью определенных систем. Поэтому в них могут возникать дифференциальные уравнения иного типа. Фигурирующие в них искомые функции являются неполностью определенными. Соответственно этому и производные искомых функций в дифференциальных уравнениях указанного типа оказываются неполностью определенными. Работа является введением в изучение дифференциальных уравнений именно этого типа.

1. Математические основы

Будем использовать в качестве математического аппарата алгебру интервальных чисел [2], интервальный анализ [3] и интервально-дифференциальное исчисление [4].

В алгебре интервальных чисел операции совершаются над замкнутыми интервалами вещественных чисел, определяемыми в виде множеств

$$\tilde{a} \equiv [a_1, a_2] \equiv \{a | a_1 \leq a \leq a_2\} \quad (1)$$

и рассматриваемыми как интервальные числа. Операции \circ определяются как теоретико-множественные обобщения соответствующих операций над вещественными числами

$$\tilde{a} \circ \tilde{b} = \{a \circ b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \quad (2)$$

Таким образом, алгебраические операции над интервалами — сложение, вычитание, умножение, деление — вводятся в виде

$$\begin{aligned} \tilde{a} + \tilde{b} &= \{a + b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}; \\ \tilde{a} - \tilde{b} &= \{a - b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}; \\ k \cdot \tilde{a} &= \{ka | a \in \tilde{a}\}; \quad \tilde{a} \cdot \tilde{b} = \{ab | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}; \\ \tilde{a}/\tilde{b} &= \{a/b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из определений (3) вытекают следующие формулы для вычисления результатов алгебраических операций над интервальными числами:

$$\begin{aligned} \tilde{a} + \tilde{b} &\equiv [a_1, a_2] + [b_1, b_2] = [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \\ \tilde{a} - \tilde{b} &\equiv [a_1, a_2] - [b_1, b_2] = [a_1 - b_2, a_2 - b_1]; \\ k \cdot \tilde{a} &\equiv k \cdot [a_1, a_2] = \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} \\ \tilde{a} \cdot \tilde{b} &\equiv [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] = [\min_{i,j} (a_i b_j), \max_{i,j} (a_i b_j)]; \\ \tilde{a}/\tilde{b} &\equiv [a_1, a_2]/[b_1, b_2] = [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1]. \end{aligned} \quad (4)$$

Объектом изучения интервального анализа являются интервальные функции [3]. Интервальная функция вводится как однозначное отображение множества замкнутых вещественных интервалов

$\{\tilde{x}\}$ вида (1), т. е. $\tilde{x} = [x_1, x_2]$, на аналогичное множество замкнутых вещественных интервалов $\{\tilde{y}\}$ того же вида, т. е. $\tilde{y} = [y_1, y_2]$. Символически интервальная функция записывается как

$$\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x}), \text{ где } \tilde{x} = [x_1, x_2], \tilde{y} = [y_1, y_2],$$

$$\tilde{f}(\tilde{x}) = [f_1(\tilde{x}), f_2(\tilde{x})], \quad (5)$$

где \tilde{x} называется интервальной независимой переменной (интервальным аргументом), \tilde{y} — интервальной зависимой переменной, \tilde{f} — интервальной функцией, $f_1(\cdot)$ — нижней граничной функцией интервальной функции \tilde{f} , а $f_2(\cdot)$ — верхней граничной функцией интервальной функции \tilde{f} .

Базовым понятием интервального анализа является понятие предела интервальной функции, которое вводится следующим путем. Независимая интервальная переменная $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ интервальной функции (5) по определению неограниченно приближается к некоторому интервалу $\tilde{x}_0 = [x_{01}, x_{02}]$, если в процессе этого изменения x_1 неограниченно приближается к x_{01} , а x_2 — к x_{02} , или символически

$$(\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0) \equiv (x_1 \rightarrow x_{01}, x_2 \rightarrow x_{02}). \quad (6)$$

Аналогично определяется неограниченное приближение зависимой интервальной переменной $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ функции (5) к интервалу $\tilde{y}_0 = [y_{01}, y_{02}]$:

$$(\tilde{y} \rightarrow \tilde{y}_0) \equiv (y_1 \rightarrow y_{01}, y_2 \rightarrow y_{02}). \quad (7)$$

При этом если независимая переменная \tilde{x} своим неограниченным приближением к интервалу \tilde{x}_0 вызывает неограниченное приближение зависимой переменной \tilde{y} к интервалу \tilde{y}_0 , мы говорим, что предел интервальной функции (5) при \tilde{x} , стремящемся к \tilde{x}_0 , равен \tilde{y}_0 , или символически

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \tilde{y} = \tilde{y}_0 \text{ или } \lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \tilde{f}(\tilde{x}) = \tilde{y}_0. \quad (8)$$

Если интервальная функция (5) непрерывна, т. е. нижняя y_1 и верхняя y_2 границы зависимой переменной \tilde{y} — непрерывные функции нижней x_1 и верхней x_2 границ независимой переменной \tilde{x} , то предел функции (5) равен значению функции в предельной точке \tilde{x}_0 аргумента \tilde{x} , или символически

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \tilde{f}(\tilde{x}) = \tilde{f}(\tilde{x}_0). \quad (9)$$

Основным математическим понятием, используемым в данной статье, является понятие интервальной производной функции [3, 4]. Оно вводится на базе понятия обычной производной функции [1] следующим образом. Рассмотрим произвольную интервальную функцию \tilde{f} в виде (5). Будем считать ее непрерывной. Зафиксируем в ней значение

независимой переменной $\tilde{x} = \tilde{x}_0 = [x_{01}, x_{02}]$. Этому значению, в силу непрерывности функции, соответствует фиксированное значение функции $\tilde{y}_0 = \tilde{f}(\tilde{x}_0)$. Определим приращения независимой и зависимой переменных нашей функции относительно этих фиксированных значений

$$\Delta\tilde{x} = \tilde{x} - \tilde{x}_0, \Delta\tilde{y} = \tilde{y} - \tilde{y}_0 = \tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x}_0) \quad (10)$$

и составим отношение второго приращения к первому

$$\Delta\tilde{y}/\Delta\tilde{x} = (\tilde{y} - \tilde{y}_0)/(\tilde{x} - \tilde{x}_0) =$$

$$= (\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x}_0))/(\tilde{x} - \tilde{x}_0). \quad (11)$$

Предел отношения (11) при неограниченном приближении независимой переменной \tilde{x} к ее фиксированному предельному значению \tilde{x}_0 , если он существует, называется интервальной производной функцией от исходной интервальной функции $\tilde{f}(\tilde{x})$ (5) в точке \tilde{x}_0 и обозначается $\tilde{y}'_{\tilde{x}_0}$ или $\tilde{f}'_{\tilde{x}_0}(\tilde{x})$:

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}_0} = \tilde{f}'_{\tilde{x}_0}(\tilde{x}) = \lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \Delta\tilde{y}/\Delta\tilde{x}, \quad (12)$$

где $\Delta\tilde{x}$ и $\Delta\tilde{y}$ определяются формулами (10).

Доказано [3, 4], что для существования в точке \tilde{x}_0 интервальной производной (12) от интервальной функции \tilde{f} (5) необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности этой точки, включая ее саму, значения независимой переменной \tilde{x} функции \tilde{f} были невырожденными интервалами (т. е. интервалами с несовпадающими верхней и нижней границами). Но вырожденность интервала \tilde{x} возможных значений независимой переменной интервальной функции означает его превращение в обычную детерминированную величину. Таким образом, интервальная производная (12) от интервальной функции \tilde{f} (5) существует в любой точке \tilde{x}_0 , в которой функция \tilde{f} является существенно интервальной по независимой переменной \tilde{x} .

Как и в случае обычной производной [1], понятие интервальной производной (12) может быть обобщено путем повторного выполнения операции взятия производной. При этом интервальная производная $\tilde{y}'_{\tilde{x}}$ из формулы (12) становится производной 1-го порядка, производная от $\tilde{y}'_{\tilde{x}}$ — производной 2-го порядка $\tilde{y}''_{\tilde{x}}$, производная от $\tilde{y}''_{\tilde{x}}$ — производной 3-го порядка $\tilde{y}'''_{\tilde{x}}$ и т. д. Вообще, производная любого n -го порядка $\tilde{y}^{(n)}_{\tilde{x}}$ определяется следующим выражением:

$$\tilde{y}^{(n)}_{\tilde{x}} = [\tilde{y}^{(n-1)}_{\tilde{x}}]', \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (13)$$

где $\tilde{y}_{\tilde{x}}^0$ означает исходную интервальную функцию вида $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$, определяемую по формуле (5).

Согласно определениям (12), (13) интервальной производной любого порядка, все эти интервальные производные, как и исходная интервальная функция (5), при любом численном значении аргумента \tilde{x} в виде интервала возможных значений $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ также принимают численное значение в виде интервала возможных значений. Поэтому вычисление интервальной функции и интервальной производной от нее любого порядка заключается в вычислении нижних и верхних границ соответствующих интервалов. Вычисление интервальной функции \tilde{f} выполняется по формуле (5), задающей указанную функцию в виде пары "нижняя f_1 и верхняя f_2 граничные функции". Вычисление интервальной производной любого n -го порядка $\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(n)} = \tilde{f}^{(n)}(\tilde{x})$ выполняется с помощью следующей формулы, выведенной в [3, 4]:

$$\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(n)} = [y_{1,\tilde{x}}^{(n)}, y_{2,\tilde{x}}^{(n)}] = \left[-\frac{2^{n-1}(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^n}, -\frac{2^{n-1}(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^n} \right],$$

$$\tilde{x} = [x_1, x_2], n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

или, по-другому,

$$\tilde{f}^{(n)}(\tilde{x}) = [f_1^{(n)}(\tilde{x}), f_2^{(n)}(\tilde{x})] =$$

$$= \left[-\frac{2^{n-1}(f_2(\tilde{x}) - f_1(\tilde{x}))}{(x_2 - x_1)^n}, -\frac{2^{n-1}(f_2(\tilde{x}) - f_1(\tilde{x}))}{(x_2 - x_1)^n} \right],$$

$$\tilde{x} = [x_1, x_2], n = 1, 2, 3, \dots, \quad (15)$$

где $y_{1,\tilde{x}}^{(n)} = f_1^{(n)}(\cdot)$, $y_{2,\tilde{x}}^{(n)} = f_2^{(n)}(\cdot)$ — нижняя и верхняя граничные функции интервальной производной функции n -го порядка $\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(n)} = \tilde{f}^{(n)}(\cdot)$ от исходной интервальной функции $\tilde{y} = [y_1, y_2] = \tilde{f}(\tilde{x}) = [f_1(\tilde{x}), f_2(\tilde{x})]$, задаваемой формулой (5).

Как видно из формул (14), (15), интервальная производная любого n -го порядка, в отличие от обычной производной, выражается в явном виде через независимую $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ и зависимую $\tilde{y} = [y_1, y_2]$, $y_1 = f_1(\tilde{x})$, $y_2 = f_2(\tilde{x})$, переменные исходной интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x}) = [f_1(\tilde{x}), f_2(\tilde{x})]$. Эта важная особенность интервальных производных функций принципиально упрощает теорию и методы решения интервально-дифференциальных уравнений.

Условимся в дальнейшем в обозначении интервальной производной $\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(n)}$ любого порядка n оставлять обозначение точки \tilde{x} только в том случае, когда нас интересует значение производной именно в этой точке, и опускать его, записывая эту производную в виде $\tilde{y}^{(n)}$, в остальных случаях, когда нас интересуют ее значения во всех точках.

2. Основные понятия об интервально-дифференциальных уравнениях

Как известно из общей теории дифференциальных уравнений, предмет указанной теории — это те задачи, решение которых сводится к решению одного или нескольких уравнений, содержащих производные искомых функций. Такие уравнения называются дифференциальными. Более точно, дифференциальным уравнением называется соотношение, связывающее независимую переменную x , искомую функцию $y = f(x)$ и ее производные различных порядков y' , y'' , ..., $y^{(n)}$. Если искомая функция есть функция одной независимой переменной, как в нашем случае, дифференциальное уравнение называется обыкновенным. В случае если искомая функция является функцией двух или более независимых переменных, дифференциальное уравнение называется уравнением с частными производными. В данной работе рассматриваются только обыкновенные дифференциальные уравнения.

Порядок старшей производной, которая входит в дифференциальное уравнение, называется порядком этого уравнения. Таким образом, дифференциальное уравнение n -го порядка имеет следующий общий вид:

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0, \quad (16)$$

где $F(\cdot)$ — некоторая функция от переменных в скобках. В частных случаях в уравнение (16) могут и не входить переменные x , y и отдельные производные от функции y порядка ниже, чем n , но это не изменит порядка этого уравнения, который равен n . Например, уравнения $2x + 3y - 4y' = 0$ и $3y - 4y' = 0$ имеют порядок, равный 1, а уравнения $2x + 3y - 4y' + y'' = 0$ и $3y + y'' = 0$ — порядок, равный 2.

Любая функция $y = f(x)$, которая при подстановке в уравнение (16) обращает его в тождество, называется решением этого уравнения. Например, функция $y = e^x$ является решением уравнения $y - 2y + y'' = 0$, так как она при подстановке в это уравнение обращает его в тождество.

Будем теперь рассматривать задачи, решение которых сводится к решению уравнений (одного или нескольких), содержащих интервальные производные искомых интервальных функций, которые были введены в разделе 1. Такие уравнения мы будем называть интервально-дифференциальными. Более точно, интервально-дифференциальным уравнением будем называть соотношение, связывающее

вающее независимую интервальную переменную $\tilde{x} = [x_1, x_2]$, интервальную искомую функцию $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ вида (5) и ее интервальные производные $\tilde{y}', \tilde{y}'', \dots, \tilde{y}^{(n)}$. Если искомая интервальная функция является функцией одной независимой интервальной переменной, как в рассматриваемом случае, интервально-дифференциальное уравнение назовем обыкновенным. В случае если искомая интервальная функция является функцией двух или более независимых интервальных переменных, интервально-дифференциальное уравнение назовем уравнением с частными интервальными производными. В этой работе будем рассматривать только обыкновенные интервально-дифференциальные уравнения.

Как и в случае обычных (детерминированных) дифференциальных уравнений (16), порядок старшей производной, которая входит в любое интервально-дифференциальное уравнение, назовем порядком этого уравнения. Таким образом, интервально-дифференциальное уравнение n -го порядка можно записать в следующем общем виде:

$$\tilde{F}(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{y}', \tilde{y}'', \dots, \tilde{y}^{(n)}) = \tilde{a}, \quad (17)$$

где $\tilde{F}(\cdot)$ — интервальная функция от переменных в скобках; $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ — независимая интервальная переменная; $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ — зависимая интервальная переменная, находящаяся в функциональной зависимости $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ от независимой переменной \tilde{x} ; $\tilde{y}', \tilde{y}'', \dots, \tilde{y}^{(n)}$ — интервальные производные порядка 1, 2, ..., n от интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$; $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ — числовой интервал.

Аналогично случаю детерминированных дифференциальных уравнений (16), в частных случаях в интервально-дифференциальное уравнение (17) могут и не входить интервальные переменные \tilde{x}, \tilde{y} и отдельные интервальные производные от функции \tilde{y} порядка ниже, чем n , но это не изменит порядка данного уравнения. Любая интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$, которая при подстановке в уравнение (17) обращает его в тождество, называется решением этого уравнения.

Наша задача заключается в нахождении систематического метода и алгоритма решения интервально-дифференциального уравнения (17).

3. Элементы теории интервально-дифференциальных уравнений

Будем называть интервальную функцию алгебраической, если она получена путем суперпозиции интервальных алгебраических операций сложения, вычитания, умножения и деления (3) над

независимыми интервальными переменными указанной функции. Далее будем всегда предполагать, что интервальная функция \tilde{F} , связывающая переменные в интервально-дифференциальном уравнении (17), является алгебраической. В этих условиях оказывается справедливой следующая основная теорема.

Теорема. Любое интервально-дифференциальное уравнение вида (17) эквивалентно некоторой системе из двух детерминированных алгебраических уравнений следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} F_1(x_1, x_2, y_1, y_2) &= a_1; \\ F_2(x_1, x_2, y_1, y_2) &= a_2; \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ — интервальная независимая переменная искомой интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$; $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ — интервальная зависимая переменная указанной интервальной функции; F_1 и F_2 — некоторые детерминированные функции, представляющие собой нижнюю и верхнюю границы интервальной связывающей функции \tilde{F} уравнения (17) (т. е. $\tilde{F} = [F_1, F_2]$).

Доказательство. Согласно предположению, интервальная функция \tilde{F} от переменных $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{y}', \tilde{y}'', \dots, \tilde{y}^{(n)}$ в уравнении (17) является алгебраической. Поэтому она имеет вид суперпозиции элементарных операций над указанными интервальными переменными. В свою очередь, часть указанных интервальных переменных, а именно, производные $\tilde{y}', \tilde{y}'', \dots, \tilde{y}^{(n)}$ по формуле (15) представляют собой суперпозиции элементарных алгебраических операций над интервальными переменными $\tilde{x} = [x_1, x_2], \tilde{y} = [y_1, y_2]$, где $y_1 = f_1(\tilde{x}), y_2 = f_2(\tilde{x})$.

Таким образом, интервальная функция \tilde{F} в уравнении (17) в целом может быть представлена в виде суперпозиции элементарных алгебраических операций только над интервальными переменными $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ и $\tilde{y} = [y_1, y_2]$.

Учитывая, что этими элементарными операциями являются сложение, вычитание, умножение и деление, определяемые выражениями (3), и используя формулы (4) для выполнения этих операций, мы получим выражение левой части уравнения (17) в виде интервала, нижняя и верхняя границы которого представляют собой некоторые суперпозиции границ интервальных переменных $\tilde{x} = [x_1, x_2], \tilde{y} = [y_1, y_2]$. Уравнение (17), таким образом, переписывается в явной интервальной форме

$$[F_1(x_1, x_2, y_1, y_2), F_2(x_1, x_2, y_1, y_2)] = [a_1, a_2], \quad (19)$$

где F_1 и F_2 — некоторые детерминированные функции. Но два интервала равны, только если равны их одноименные границы [2]. Поэтому из (19) получаем эквивалентное ему условие (18). Но условие (19), как следует из приведенного доказательства, эквивалентно уравнению (17). Следовательно, условие (18) тоже эквивалентно уравнению (17), что и требовалось доказать.

Как видно из теоремы, для решения произвольного интервально-дифференциального уравнения (17) следует действовать согласно следующему алгоритму.

Шаг 1. Заменить в уравнении (17) все вхождения интервальных производных \tilde{y}' , \tilde{y}'' , ..., $\tilde{y}^{(n)}$ их выражениями (15) через искомую интервальную функцию $\tilde{y} = [y_1 = f_1(\tilde{x}), y_2 = f_2(\tilde{x})]$. В результате интервально-дифференциальное уравнение (17) перейдет в интервально-алгебраическое уравнение с неизвестной переменной \tilde{y} .

Шаг 2. Использовать выражения (4) для выполнения элементарных алгебраических операций над интервалами, выразить левую часть получившегося уравнения (17) в виде интервала, нижняя и верхняя границы которого имеют вид суперпозиций (функций) нижних и верхних границ интервальных переменных $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ и $\tilde{x} = [x_1, x_2]$.

Шаг 3. Используя результаты шага 2, представить уравнение (17) в явной интервальной форме (19).

Шаг 4. Приравняв в (19) одноименные границы левой и правой частей, перейти к эквивалентной заданному интервально-дифференциальному уравнению (17) системе двух детерминированных алгебраических уравнений (18).

Шаг 5. Решить систему уравнений (18). Найденное решение этой системы в виде $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$, где $\tilde{x} = [x_1, x_2]$, $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ ($y_1 = f_1(\tilde{x})$, $y_2 = f_2(\tilde{x})$), будет

также искомым решением интервально-дифференциального уравнения (17).

Заключение

В настоящей статье показана возможность формирования дифференциальных уравнений на базе понятия интервальной производной, т. е. производной от недетерминированной функции, в которой переменные задаются с точностью до интервалов возможных значений. Новые уравнения позволяют моделировать динамику систем с интервальной неопределенностью их функций-характеристик. Главные отличия введенной интервальной производной и основанного на ней интервально-дифференциального исчисления заключаются в том, что производная любого порядка от интервальной функции снова является интервальной функцией, причем она выражается в явном виде через независимую и зависимую переменные первообразной функции. Благодаря этому свойству любое интервально-дифференциальное уравнение (17) легко сводится к эквивалентной системе двух алгебраических уравнений (18), решение которых дает решение исходного уравнения (17).

Список литературы

1. Фиктентольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1—3. М.: Наука, 2005.
2. Алефельд Г., Хертсбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. М.: Мир, 1987. 360 с.
3. Левин В. И. Интервальная производная и начала недетерминистского дифференциального исчисления // Онтология проектирования. 2013. № 4 (10). С. 72—85.
4. Левин В. И. Интервально-дифференциальное исчисление и некоторые его применения // Информационные технологии. 2014. № 7. С. 3—10.

V. I. Levin, D. Sc., Professor, e-mail: vilevin@mail.ru, Penza State Technological University

The Interval-Differential Equations and Modelling of Systems in Condition of Uncertainty

The generalization of ordinary differential equations on the interval case is considered. The general concept of interval-differential equation, its order, as well as the solution of interval differential equations are given. An approach to the solution of interval differential equations is developed. It is proved that any interval-differential equation can be reduced to a system of two ordinary algebraic equations. An algorithm for solving equations is given.

Keywords: interval-differential equation, interval derivative, system, uncertainty

References

1. Fikhtengol'ts G. M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya* (Course of differential and integral calculus). Moscow: Nauka, 2005, vol. 1—3 (in Russian).
2. Alefel'd G., Khertsberger Yu. *Vvedenie v interval'nye vychisleniya* (Introduction interval calculations). Moscow: Mir, 1987, 360 p. (in Russian).

3. Levin V. I. *Interval'naya proizvodnaya i nachala nedeterminist-skogo differentsial'nogo ischisleniya* (The interval derivative and the basis of nondeterministic differential calculus), *Ontologiya Proektirovaniya*, 2013, no. 4 (10), pp. 72—85 (in Russian).
4. Levin V. I. *Interval'no-differentsial'noe ischislenie i nekotorye ego primeneniya* (Wiping Differential Calculus and its Application), *Informatsionnye Tekhnologii*, 2014, no. 7, pp. 3—10 (in Russian).

К. В. Дергачев, ассистент каф., e-mail: dergachev.public@mail.ru,
Д. В. Капулин¹, канд. техн. наук, доц., зав. каф., e-mail: dkapulin@sfu-kras.ru,
М. А. Казанцев², нач. отд. АСУП, e-mail: mkaz@mail.ru,

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

² Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Радиосвязь", г. Красноярск

Автоматизированная система управления складом уровня цеха для проектного производства

Рассмотрены особенности проектирования и разработки локальной информационно-управляющей системы инструментального склада производственного подразделения на примере предприятия АО "НПП "Радиосвязь". Выполнен анализ складских процессов предприятия, сформированы требования к информационной системе, определено ее место в информационном пространстве предприятия. Реализация системы выполнена с использованием технологий ASP.NET, языков C#, T-SQL.

Ключевые слова: автоматизация работы склада, управление складом, управление складированием, управление складом подразделения, складская логистика, складские микротранзакции, WMS, ITS

Введение

Системы управления складом (*WMS — Warehouse Management System*) представляют собой класс широко востребованных промышленностью автоматизированных информационно-управляющих систем, решающих задачи управления и учета товарно-материальных ценностей (ТМЦ). В общем случае системы WMS предназначены для поддержки решения двух категорий задач: задач управления, к которым относятся погрузка, позиционирование, автоматическая комплектация, сортировка, и задач учета ТМЦ, включающих отслеживание перемещения, инвентаризацию и т. п. [1].

Решение задач учета ТМЦ, согласно положениям стандарта *MRP-II (Manufacturing Resource Planning)*, осуществляется в подсистеме фиксации операций с запасами (*ITS — Inventory Transaction Subsystem*), которая также получила название подсистемы управления складом. Такого рода информационно-управляющие системы предназначены для решения задач автоматизации классического складского учета и тесно связаны с системами и средствами автоматизации учетно-бухгалтерского и финансового классов [2].

Анализ проблемы

Складские модули автоматизированных систем управления ресурсами предприятия (*ERP-системы*) ориентированы на учет запасов в жестко фиксированных местах хранения и складских транзакций (приход-расход). Это является следствием нормативного планирования, выполнения покупных, производственных и распределительных операций, что является основным назначением *ERP-систем*. При этом складские модули, входящие в состав *ERP-*

систем, следует отличать от систем *WMS*, отличительным признаком которых является работа с микротранзакциями и физическим перемещением ТМЦ [3, 4].

Программная архитектура *WMS* строится по трехуровневой схеме — человеко-машинный интерфейс (*HMI — Human Machine Interface*), сервер базы данных и обработчик бизнес-логики. Наиболее распространенным вариантом использования систем управления складом является организация складского учета уровня предприятия, однако для задач оперативного планирования особый интерес представляют специализированные разновидности *WMS*, работающие на уровне цехового производства. Такие системы по определению стандарта *MRP-II* должны содержать функции инструментального обеспечения и оперативного управления исполнением производственных заказов [4, 5].

Существующие методы проектирования систем управления складскими запасами и опирающиеся на них проектные решения имеют ряд проблем при попытке внедрения *WMS* или *ITS* на уровне производственного цеха. Как правило, функционал систем управления складом уровня предприятия разрабатывают с учетом централизованного характера хранения ТМЦ. Это подразумевает, что основные операции — хранение, перемещение, учет, сортировка — происходят в пределах склада, а передача ТМЦ (далее под ТМЦ подразумевается инструмент) в производство часто рассматривается как конечная точка в жизненном цикле ТМЦ. Такая точка зрения не соответствует действительности в случае организации учета на уровне производственного цеха при проектном производстве, ориентированном на выпуск мелкосерийной или единичной продукции. В этих условиях *ITS* цехового уровня работает с крупной, изменяющейся от за-

каза к заказу номенклатурой инструмента, что приводит к активному движению ТМЦ (инструмента). Часто происходит движение инструмента между кладовой цеха и рабочими, а также между цехом и смежными подразделениями в обход складской системы уровня предприятия (например, между цехом и метрологическим отделом при проверке инструмента). Такой характер движения инструмента делает затруднительным его учет с использованием стандартных информационных средств поддержки учета ТМЦ и требует разработки отдельной, интегрированной в *ERP*-систему предприятия, системы управления складом уровня цеха.

Постановка задачи

Указанные проблемы учета ТМЦ при проектном, мелкосерийном производстве позволяют определить требования к системе складского учета уровня производственного подразделения (цеха), отличающие такую систему от систем управления складом уровня предприятия.

1. *Интеграция с существующими решениями по управлению ресурсами предприятия.* Внедрение систем учета на уровне производственных подразделений происходит на основе существующей складской инфраструктуры предприятия, поэтому при проектировании и разработке целесообразно принимать во внимание стек технологий, используемый в существующей информационно-управляющей системе. Это подразумевает сохранение (по возможности) совместимости между используемыми средствами автоматической идентификации и сбора данных, общий интерфейс запросов к базе данных, применение одних и тех же фреймворков. При этом необходимо учитывать особенности уровня цехового производства: увеличение количества и частоты обработки транзакций при меньшем их объеме, что выражается в повышенных требованиях к отклику *НМИ*.

2. *Обеспечение большей прозрачности движения ТМЦ для систем оперативного планирования и управления производством.* При отсутствии возможности получения в реальном режиме времени актуальной информации о распределении инструмента по цехам и динамике его расхода возможности планирования значительно снижаются. Нередко возникают ситуации с закупкой невостребованного производством инструмента или его отсутствием при переходе на другой заказ. Одно из основных требований к разрабатываемой системе — ее внедрение должно способствовать минимизации издержек, связанных с некорректным учетом ТМЦ.

3. *Интеграция системы учета с существующей базой данных рабочего персонала.* Рабочие непосредственно взаимодействуют с инструментом, причем характер этого взаимодействия зависит от вида инструмента, который может быть выдан:

- кратковременно для выполнения конкретной операции с последующим возвратом в кладовую после завершения операции;
- на длительный срок (например, до истечения срока проверки).

Это означает, что кладовщики уровня производственного цеха работают в том числе и с картошкой рабочих, что, как правило, выходит за рамки функционала системы управления складом уровня предприятия. Автоматизация процесса метрологической проверки не рассматривается в рамках таких систем, но является необходимым элементом системы учета уровня производственного цеха. Фактически, рабочий персонал уровня цеха, также как и кладовщики, становится группой пользователей автоматизированной системы цехового складского учета, что накладывает дополнительные требования к разработке организационного и правового видов обеспечения автоматизированной системы.

Проектирование автоматизированной системы управления складом производственного подразделения

Разработка и внедрение в логистический процесс системы учета и управления складскими запасами уровня подразделения (цеха), реализующей сформулированные требования, позволит ощутимо снизить складские издержки, улучшить организацию складских процессов и повысить производительность труда как складского персонала, так и рабочих подразделений. Однако для реализации требований к системе и достижения требуемого эффекта от внедрения необходимо предварительно провести обследование предметной области внедрения рассматриваемой автоматизированной системы. Проведем такой анализ для складских процессов приборостроительного производственного предприятия АО "НПП "Радиосвязь". Стоит отметить, что автоматизация производственных процессов предприятия ведется в рамках реализации концепции интегрированной логистической поддержки процессов жизненного цикла выпускаемой продукции, поэтому сформулированные в постановке задачи требования к локальной автоматизированной системе можно выполнить в полном объеме [6].

Рассмотрим функциональную модель складских процессов производственного предприятия АО "НПП "Радиосвязь", относящихся к учету ТМЦ (рис. 1). Стоит выделить иерархию складского хозяйства предприятия: в рассматриваемом случае она не является сильно разветвленной и представляет собой структуру, состоящую из центрального инструментального склада и инструментальных кладовых цехов. При этом для организации эффективной совместной работы разветвленного складского хозяйства предусмотрены обратные связи между указанными структурными подразделениями.

Деятельность, связанная с учетом, хранением, сдачей в работу и принятием инструмента обратно на склад, может быть представлена в виде нескольких укрупненных процессов.

1. Определение потребностей и закупка ТМЦ (центральный склад).
2. Хранение ТМЦ на складе и выдача в кладовые цехов по запросам (центральный склад).
3. Хранение ТМЦ в кладовых цехов (инструментальные кладовые).
4. Выдача ТМЦ в производство (инструментальные кладовые).

Выполнение перечисленных процессов закреплено за подразделениями различного уровня и не всегда имеет прямое отношение к рассматриваемой предметной области — инструментальной кладовой цеха. Но косвенно все указанные процессы тем или иным образом связаны с учетом инструмента (ТМЦ), поэтому их следует рассматривать в комплексе с процессами цехового учета. Тем самым автоматизированная система изначально строится согласно принципам системного подхода, избегая нежелательных эффектов "лоскутной" автоматизации. Это позволяет заложить механизмы интеграции с информационной системой управления ресурсами предприятия уже в проект данной системы цехового складского учета, что в дальнейшем положительно скажется на развитии единого информационного пространства предприятия.

Деятельность, рассматриваемая на диаграмме рис. 1, представляет собой формализованное описание складских процессов предприятия, но для определения последовательности выполнения конкретных задач учета ТМЦ на уровне цеха и ее дальнейшей автоматизации некоторые процессы на

диаграмме рис. 1 нуждаются в декомпозиции. Анализ представленных процессов показывает, что основные виды деятельности инструментальной кладовой уровня цеха следующие:

- процесс пополнения кладовой исходя из потребностей цеха;
- процедура выдачи инструмента в производство по запросу со стороны работников цеха (сдача инструмента в кладовую цеха осуществляется аналогично и не нуждается в дополнительном анализе).

Указанные процессы целесообразно рассмотреть в виде цепочек задач, представленных сценариями выполнения работ *IDEF3*. На рис. 2 приведен сценарий процесса пополнения инструментальной кладовой цеха требуемыми ТМЦ (инструментом). Цепочка задач, выделенная цветом, согласно регламенту работы складского хозяйства предприятия, разветвляется на два контура. При этом если требуемые ТМЦ есть в наличии на каком-либо складе предприятия, его (ТМЦ) следует переместить в кладовую цеха, где возникла потребность в использовании этого инструмента. В противном случае инициируется процедура закупки ТМЦ, причем сам процесс закупки напрямую в проектируемой системе не реализуется по причине необходимости ведения централизованного учета закупок на уровне управления ресурсами предприятия. Но автоматизированная система складского учета уровня цеха формирует заказ на закупку ТМЦ и отслеживает его выполнение. Такие механизмы закладываются изначально в целях интеграции локальной системы автоматизации в *ERP*-систему предприятия. Все процедуры движения ТМЦ, согласно диаграмме,

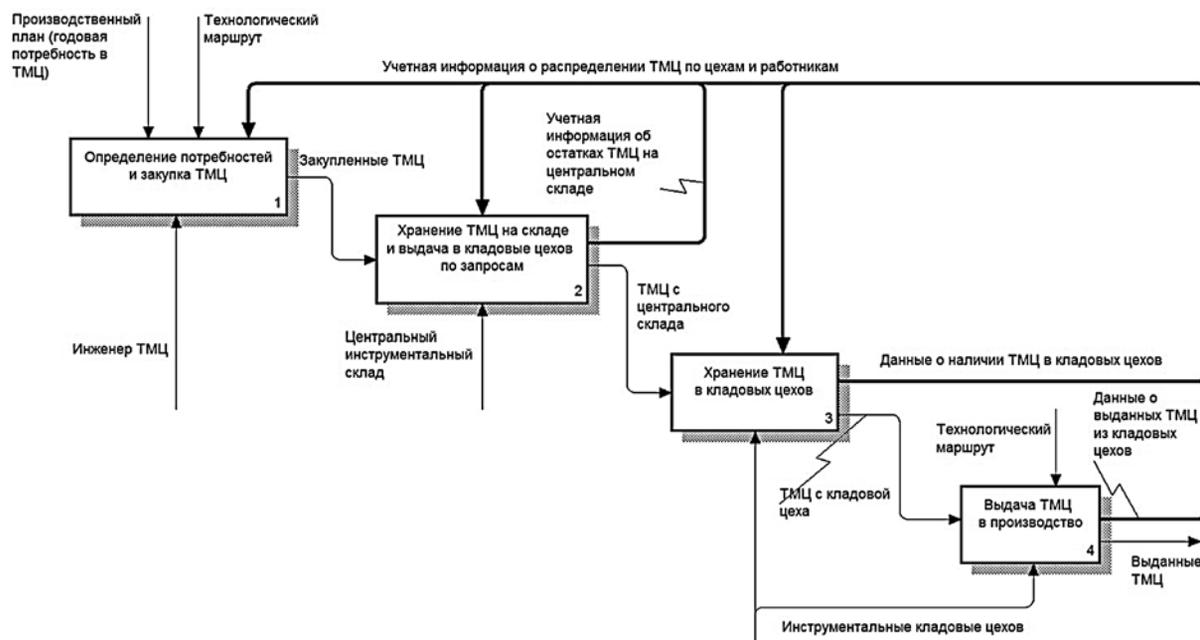


Рис. 1. Складские процессы учета товарно-материальных ценностей (инструмента) производственного предприятия

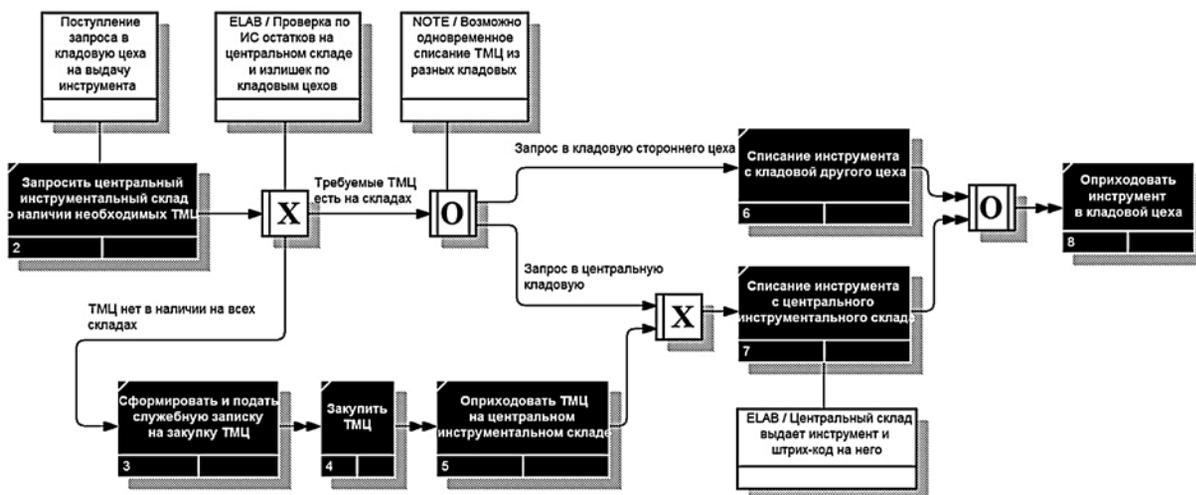


Рис. 2. Процедура заказа и пополнения инструментальной кладовой уровня цеха

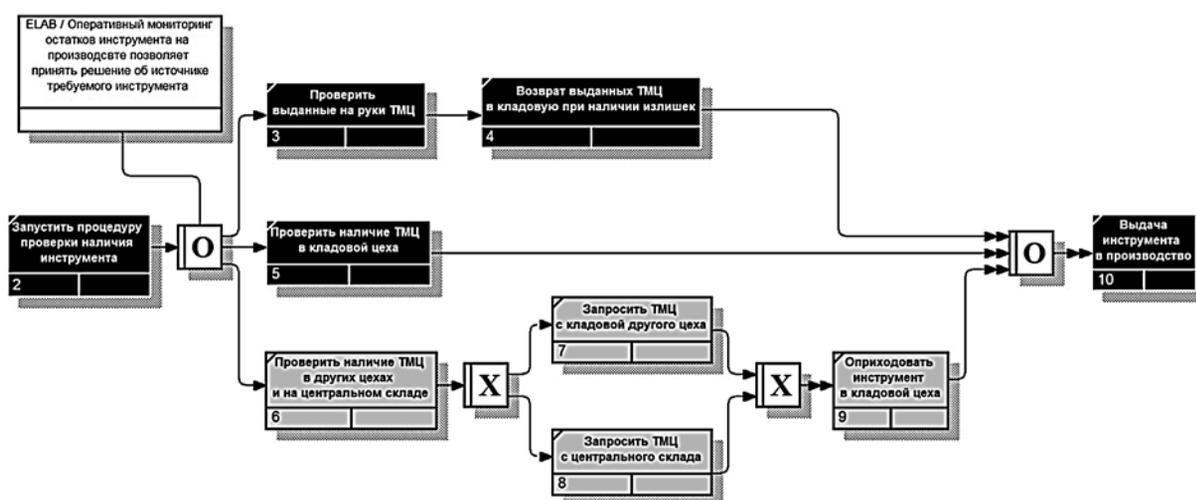


Рис. 3. Процедура выдачи инструмента в производство по запросу

приведенной на рис. 2, одновременно сопровождаются соответствующими процедурами учета.

Рассмотрим механизм выдачи инструмента по запросу работника. Соответствующее формализованное описание такой задачи в формате *IDEF3* приведено на рис. 3. Здесь следует выделить два основных варианта возможной выдачи ТМЦ.

1. Выдача инструмента, находящегося внутри данного подразделения, в том числе по каким-либо причинам не сданного в инструментальную кладовую (такая цепочка работ выделена черным цветом).

2. Поиск и выдача инструмента, находящегося в кладовых других подразделений или на центральном инструментальном складе (цепочка работ выделена серым цветом). Здесь также необходимо предусмотреть при реализации автоматизированной системы процесс заказа ТМЦ со стороннего склада, процесс оприходования инструмента в кладовой цеха, что также обеспечит интеграцию проектируемой системы и *ERP*-системы предприятия.

Если рассматриваемая процедура не может быть выполнена изначально (работа 2 не имеет однозначного выполнения), то автоматизированная система должна инициировать переход в режим формирования заказа требуемого инструмента согласно процедуре, приведенной на рис. 2.

Разработка и внедрение системы

Анализ сформулированных требований к автоматизированной системе учета складских запасов уровня производственного подразделения, регламентов производственного процесса АО "НПП "Радиосвязь" и приведенных на рис. 1–3 диаграмм позволил сформулировать набор требований к функциональным возможностям и целевым показателям будущей информационно-управляющей системы локального складского учета. По результатам проведенного анализа составлена диаграмма вариантов использования, отражающая концепцию разрабатываемой системы автоматизации (рис. 4).

Карточка инструмента						
Шифр	Стеллаж	Место	Подместо	Остаток	На руках	Всего
00020303571				1	2	3
Наименование	Марка	Профиль	Размер	Сортам		
НОЖНИЦЫ	KRAFTOOL		190	УСИЛЕННЫЕ		
Работник		Количество на руках				
?	Яковичская С.И.	1				
?	Гоголева Т.В.	1				
<input type="button" value="Приход"/> <input type="button" value="Расход"/> <input type="button" value="Приход-расход"/> <input type="button" value="Инвентаризация"/> <input type="button" value="Списание в подотчет"/> <input type="button" value="Коррекция"/>						

Рис. 7. Электронная карточка ТМЦ

Код документа	Исмер документа	Дата			Код подотчетного лица			Код операции	Код базисного счета	
		Число	Месяц	Год	Склад, цех	Секция, кладовая	Кладовщик, мастер			
	2 271	16	10	2014				56		
Исмер документа	Код документа	Наименование товарно-материальной ценности			Код (обозначение)	Исмер операции	Кодовое значение	Количество	Цена	Сумма
		ПАЙЛЬНАЯ СТАНЦИЯ			00020402218			1		26 508,48
		СВЕРЛО ЦИЛИНДР			00020201219			1		
		СВЕРЛО ЦИЛИНДР			00020201188			1		
		СВЕРЛО ЦИЛИНДР			00020201170			1		
		ОТВЕРТКА			00020303414			1		
		ОТВЕРТКА			00020303421			1		
		ШТАНГЕНГЛУБИНОМЕР			00020101056			3		

Рис. 8. Фрагмент выходного массива информации автоматизированной системы складского учета для формирования используемых на предприятии документов

Реализация действующей складской системы уровня предприятия выполнена с использованием стека технологий *ASP.NET*, языков *C#*, *T-SQL*. Для улучшения обратной связи человеко-машинного интерфейса к этому набору было добавлено расширение *ASP.NET AJAX* и библиотека *JQuery*, реализующие асинхронные запросы к серверу. Реализация уровня представления и обсчет алгоритмов, связанных с визуальным представлением информации, а не бизнес-правил, были вынесены на сторону клиента с использованием языка *JavaScript* и асинхронно-вызываемых статических веб-методов.

Интерфейс разработанной информационно-управляющей системы складского цехового учета представлен на рис. 6. В нем продублирован функционал микротранзакций, кроме того, представлен функционал управления картотекой своего цеха, работы с более крупными транзакциями (например, передача ТМЦ в другое подразделение), ведения карточек ТМЦ (рис. 7) и карточек рабочих с возможностью выборки по ряду критериев. Предоставлена возможность идентификации ТМЦ по заводскому номеру (для поверки), управление подотчетными средствами, формирование актов, отчетов, документов и таблиц, представляющих интерес для *ERP*-системы предприятия (рис. 8).

Заключение

Внедрение систем складского учета на уровне инструментальных кладовых производственных

цехов предприятия позволяет повысить эффективность управления товарно-материальными ценностями, устранить случаи их передвижения в обход действующих складских систем, внести прозрачность в учетные процессы, протекающие на уровне производства. Появляется возможность формировать массивы входных данных для использования в системах оперативного учета и производственного планирования предприятия, автоматизировать некоторые элементы текущих бизнес-процессов и производственных задач.

Предложенный в работе подход к разработке автоматизированной системы управления складом уровня цеха апробирован на предприятии приборостроительной отрасли АО "НПП "Радиосвязь", производственные процессы которого отличаются мелкосерийным, проектным характером. Значительную часть отчетности кладовщиков цехового уровня удалось перевести в формат электронных карточек, интегрированных в развернутую на предприятии *ERP*-систему. Одновременно сократились финансовые издержки, связанные с повторной закупкой имеющегося, но неучтенного инструмента, снизилась трудоемкость работы кладовщиков.

В качестве перспективных направлений развития системы автоматизации складского учета на уровне цеха рассматривается ее интеграция с системой оперативного производственного планирования предприятия. Кроме того, разработанная система в дальнейшем будет способствовать высвобождению складского персонала за счет организации выдачи товарно-материальных ценностей по единому удостоверяющему документу (пропуску).

Список литературы

1. База данных о ведущих системах WMS и их разработчиках Института товародвижения и логистики Fraunhofer / Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics. URL: <http://www.warehouse-logistics.com/3/3/wms-online-selection.html> (дата обращения: 31.01.2015).
2. Казанцев М. А., Легалов А. И., Чемидов И. В. Интеграция автоматизированных складских комплексов в информационную систему предприятия радиоэлектронной промышленности // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 2. С. 222–228.
3. Бзотосная О. Ключевые тенденции в разработке WMS: спрос рождает предложение // Логистика. 2014. № 8. С. 10–13.
4. Подлесный В., Аракелян Е. Применение WMS на складах при производствах // Логистика. 2013. № 10. С. 20–21.
5. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта *MRP II*. СПб.: Питер, 2002. 320 с.
6. Галеев Р. Г., Коннов В. Г., Казанцев М. А., Ченцов С. В. Информационная поддержка организации производства изделий радиоэлектронной аппаратуры на предприятии ОАО "НПП "Радиосвязь" // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2014. Т. 7, № 7. С. 758–766.

K. V. Dergachev, Assistant of the Chair "Systems for Automation, Computer-Aided Control and Design", e-mail: dergachev.public@mail.ru,

D. V. Kapulin, Head of the Chair "Information Technologies in Radioelectronic Production", e-mail: dkapulin@sfu-kras.ru,

M. A. Kazantsev, Head of ERP-department, Krasnojarsk, e-mail: mkaz@mail.ru, JSC "SPE "Radiosvyaz"

Shop-level Warehouse Management System for Project Manufacturing

There is a request for an inventory and warehouse operational management in the manufacturing industry that is currently covered by warehouse management systems. However, such systems mostly targeted at large centralized storages, and attempts for implementation and integration at job shop-level faced with number of difficulties due to the fact that manufacture requires significantly more detailed view at inventory items lifetime; inventory items strongly connected with individual workers and often become their financial responsibility. Rapid inventory items movement between the workers and job shops are also common and impose additional restrictions.

The primary aim of this paper was to perform warehousing process analysis for project manufacturing enterprise and to state key features and requirements for systems targeted at job shop-level operational management. This paper introduced design for an inventory transaction subsystem that matches stated requirements and can be implemented with basic technology stack that most enterprise architectures used such as T-SQL, ASP.NET and C#. The paper also contains an overview for a system based on that design that was build and implemented at the enterprise of radio communication equipment manufacturing.

Keywords: warehouse automation, warehouse operational management, stock management, shop-level warehouse, warehouse logistics, inventory transaction system, rapid inventory items movement, WMS, ITS

References

1. **Warehouse Logistics / Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics**, available. URL: <http://www.warehouse-logistics.com/3/3/wms-online-selection.html> (accessed 9.02.2015).

2. **Kazantsev M. A., Legalov A. I., Chemidov I. V.** Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 222–228 (in Russian).

3. **Bezototsnaya O.** Logistika, 2014, no. 8, pp. 10–13 (in Russian).

4. **Podlesnyi V., Arakelyan E.** Logistika, 2013, no. 10, pp. 20–21 (in Russian).

5. **Gavrilov D. A.** Upravlenie proizvodstvom na baze standarta MRP II (MRP II Production Management), Saint Petersburg, Piter, 2002, 320 p. (in Russian).

6. **Galeev R. G., Konnov V. G., Kazantsev M. A., Chentsov S. V.** Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii, 2014, vol. 7, no. 7, pp. 758–766 (in Russian).

УДК 519.1

A. A. Харламов, д-р техн. наук., ст. науч. сотр., e-mail: kharlamov@analyst.ru, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва,

T. B. Ермоленко, канд. техн наук, нач. отдела, e-mail: etv@iai.dn.ua, Институт проблем искусственного интеллекта, Украина, г. Донецк

Нейросетевая среда (нейроморфная ассоциативная память) для преодоления информационной сложности.

Поиск смысла в слабоструктурированных массивах информации

Часть I. Структурная обработка информации в коре

Ассоциативная память человека является средством для преодоления информационной сложности, возникающей постоянно в процессе его жизнедеятельности. Рассмотрены архитектура, свойства и функциональность ассоциативной памяти с точки зрения использования ее для моделирования способности преодоления информационной сложности; прототип ассоциативной памяти — гиперколонки коры больших полушарий головного мозга человека; информационные свойства нейроморфной ассоциативной памяти: автоматическое структурирование больших объемов разнородной информации, запоминание информации при обучении, фильтрация запомненной ранее информации во входном потоке, автоматическое выявление повторяющихся структурных элементов различной сложности (различной частоты встречаемости) в потоке входной информации — формирование иерархии словарей, автоматическое выявление в потоке входной информации связей структурных элементов, формирование когнитивной семантической сети.

Ключевые слова: кортикоморфная ассоциативная память, структурная обработка информации, ассоциативная (однородная семантическая) сеть

Введение

Ни у кого не вызывает сомнения, что ассоциативная память человека (каковой является кора больших полушарий головного мозга человека и, возможно, гиппокамп) есть превосходное средство для преодоления информационной сложности, возникающей постоянно в процессе его жизнедеятельности. Поэтому рассмотрение архитектуры, свойств, функциональности ассоциативной памяти человека является естественным средством моделирования способности преодоления информационной сложности. Именно ассоциативная память (естественная нейронная сеть) является тем субстратом, на котором реализуются все творческие способности человека (как следствие формируемых в ассоциативной памяти когнитивных информационных сетей [1]).

Необходимо заметить, что подход к анализу информации со стороны ассоциативной памяти раскрывает одно важное отличие мозга человека от других автоматических систем обработки информации. В отличие от мозга, все существующие системы в процессе обработки информации пытаются уменьшить объем обрабатываемой информации, снять вариативность. Мозг же, наоборот, наращивает мощность представления вариантов, делая, таким образом, обработку информации все более тонкой и точной. Именно поэтому реализация нейроморфной ассоциативной памяти средствами микроэлектронной технологии в рамках проектных норм нанодиапазона, не скупящейся на объемы обрабатываемой информации и реализующей параллельную обработку информации, может стать единственным правильным направлением в дальнейшем развитии технологий обработки информации.

Параллельность обработки информации, реализуемая в ассоциативной памяти человека, является другим, но уже хорошо известным свойством, улучшающим возможности обработки информации. Дело в том, что массовое распараллеливание обработки приводит к отсутствию требования очень быстрой обработки (в отличие от вычислительной техники фоннеймановской архитектуры), т. е. к сравнительно невысоким тактовым частотам, а следовательно, — к малому энергопотреблению [2].

И, наконец, обработка специфической информации в мозге приводит к формированию представления знаний о мире (модели мира) в виде так называемых когнитивных семантических сетей [1], которые оказываются весьма удобными при обработке (структурировании) больших объемов информации [3]. Когнитивные семантические сети возникают в мозге виртуально в процессе обработки информации на субстрате естественных нейронных сетей. При формировании когнитивной информационной сети ее вершины ранжируются по степени важности в рамках конкретных ситуаций, что позволяет выявлять тематическую структуру

моделей предметных областей и ассоциативно навигировать по хранилищу — ассоциативной памяти. Технология формирования подобных семантических представлений оказывается удобной для выявления смысла (ассоциативного соотнесения входной информации с тематической структурой модели мира) в больших массивах информации различной природы. В первую очередь, это касается обработки текстовой информации, которая в 90 % случаев исчерпывает (в содержательном смысле) современные информационные потоки.

Кроме того, в процессе такой обработки, в силу ассоциативности принципов обработки, исключаются повторы в записи информации в длительном хранении, т. е. такое представление оказывается компактным и легко масштабируемым по сравнению с другими методами хранения, используемыми в традиционных видах микроэлектронной памяти.

Таким образом, нейросетевая среда (нейроморфная ассоциативная память) адекватна постановке задачи преодоления информационной сложности, в том числе при обработке текстовой информации. Под информационной сложностью понимается как наличие больших объемов информации, так и сложная структура предметных областей, представленных в этой информации.

Вопросы оценки (информационной) сложности модели мира рассматриваются в терминах количества тем, подтем и подподтем в тематических структурах текстов и квазитекстов, на основе которых формируются модели предметных областей и модель мира в их совокупности, а также сложности составляющих их семантических сетей. По числу ассоциантов ключевых понятий семантической сети можно оценивать сложность текста в ширину, а по числу уровней подтем у главной темы — определять сложность текста в глубину. Разработка этих вопросов предполагается быть представленной во второй (планируемой к печати) части работы.

Колонка коры — прототип ассоциативной памяти

Под ассоциативной памятью, как и в традиционном смысле, понимается память, адресуемая по содержанию. Имеются три отличия (одно из них внутреннее, два других — внешние), которые делают нейроморфную ассоциативную память непохожей на имевшиеся до сих пор ее реализации. Внутреннее отличие заключается в нечеткости сравнения: ячейка ассоциативной памяти откликается не только на свой код, но и на похожие (по некоторой мере) коды, если этого требует задание.

Внешние отличия касаются ее эффективного применения: это не просто среда для хранения с быстрым доступом, но и средство для формирования иерархической системы кластеров образов, составляющих модель мира, а также переранжирования (с точки зрения степени важности) контента

этих кластеров в зависимости от контекста их употребления.

В мозге человека имеются две структуры, ответственные за ассоциативную обработку и хранение информации, реализующие эти два процесса. В колонках коры больших полушарий головного мозга формируются и хранятся иерархии словарей образов событий, появляющихся на входах сенсорных систем. Гиппокамп является структурой, которая участвует в процессе запоминания, хранения и переранжирования этих образов.

Сенсорная информация поступает в кору после различных преобразований в периферии сенсорных органов в виде матрицы последовательностей, из которых каждая (информационная последовательность) поступает в определенную колонку соответствующего уровня (нейронных переключений от входа) и соответствующей модальности [3].

В колонках коры выявляется повторяемость событий во входных последовательностях, которая позволяет сформировать иерархию словарей этих событий разной частоты встречаемости (разной степени сложности).

Колонка коры формируется в основном пирамидными нейронами третьего слоя, которые, будучи электронекомпактными нейронами, учитывают временную структуру информации во входных последовательностях. Они являются корреляторами [4] с нечетким сравнением, которые, будучи обучены на свой фрагмент входной последовательности (адрес), в дальнейшем реагируют на этот адрес либо строго, либо (при понижении порога чувствительности в результате внешнего управления — в зависимости от режима функционирования: глобализация, локализация) учитывая искажения входной последовательности. Эти адреса пирамидных нейронов являются координатами точек в многомерном пространстве, т. е. колонки коры моделируют фрагменты многомерного пространства, в которое отображаются в виде последовательностей сработавших нейронов (траекторий) входные информационные последовательности.

Таким образом, ассоциативную память можно рассматривать как модель колонки коры, состоящей из множества нейроподобных элементов с временной суммацией сигналов [3]. Эти нейроподобные элементы реагируют каждый на свой n -членный фрагмент входной последовательности (адрес) и обладают пластичностью (способны запоминать число срабатываний). Необходимо помнить, что они могут менять значения своих порогов возбуждения под влиянием управляющего воздействия, таким образом, демонстрируя в той или иной степени нечеткость сравнения.

Множество таких нейроподобных элементов обладает следующими свойствами по ассоциативной структурной обработке информации. Оно реализует преобразование информационной последо-

вательности в многомерное сигнальное пространство, где возможно выявление внутренней структуры отображаемой в многомерное пространство информации: словарей событий разной частоты встречаемости, а также связей этих событий во входной информации.

Модель входного информационного потока

Сенсорные органы человека представляют собой матрицы чувствительных элементов, в той или иной степени сохраняющие топологию входной информации в процессе ее обработки: мембрана улитки внутреннего уха, сетчатка глаза, поверхность кожи и т. п. Каждый чувствительный элемент или каждая их группа, объединяющая несколько чувствительных элементов, формируют потоки информации, которые по соответствующим нервным волокнам поступают в кору, где параллельно обрабатываются. Сложность предварительной обработки в разных сенсорах у человека различна. Наиболее простой является обработка информации от поверхности кожи, сложнее — обработка слуховой информации, еще сложнее — обработка зрительной информации в сетчатке. Предмет работы в данном случае не касается предварительного анализа сенсорной информации на периферии, хотя это и интересно, поскольку обработка очень непростая. Все, что в данный момент важно знать, это то, что сенсорные потоки есть множество информационных последовательностей, параллельно поступающих в кору по волокнам, составляющим соответствующие чувствительные нервы.

Ассоциативность обращения к информации

Как говорилось выше, колонка коры (точнее, множество пирамидных нейронов третьего слоя коры, преимущественно формирующих колонку) моделирует адресами своих нейронов фрагменты многомерного сигнального пространства. Рассмотрим формализм обработки информации в колонках.

Пусть мы имеем n -мерное сигнальное пространство R^n и в нем единичный гиперкуб $G_e^n \in R^n$. Для дальнейшего изложения введем некоторые обозначения и определения.

Обозначим через $\{A\}$ — множество информационных последовательностей, элементы которых есть символы, из которых состоят входные последовательности $A = (...a_{-1}, a_0, a_1, ..., a_i, ...)$ в терминах выходов сенсорных органов. В простейшем (бинарном) случае $a_i \in \{0, 1\}$. В дальнейшем для простоты мы все рассматриваем на примере обработки бинарных последовательностей. В качестве такой последовательности можно, например, представить себе текст романа Л. Н. Толстого "Война и мир", закодированный двоичным кодом.

Обозначим через $\{\hat{A}\}$ — множество последовательностей, соответствующих множеству входных

последовательностей $\{A\}$, элементы которых \hat{a}_i есть точки пространства R^n , т. е. вершины единичного гиперкуба $\hat{a}_i \in G_e^n$, где $\hat{a}_i = (a_{i-n+1}, a_{i-n+2}, \dots, a_i)$ — последовательные фрагменты последовательности A длины n символов, сдвинутые относительно друг друга на один символ — координаты точек многомерного пространства R^n (вершины единичного гиперкуба G_e^n).

Тогда *траектория* — это последовательность элементов \hat{a}_i в многомерном пространстве R^n . Действительно, если последовательно соединить точки, являющиеся элементами последовательности \hat{A} , получим траекторию в пространстве R^n . А ее n -членным фрагментом является фрагмент длиной в n символов.

Введем преобразование F_n :

$$F_n : A \rightarrow \hat{A}, F_n(A) = \hat{A}, \quad (1)$$

где $A = (\dots, a_i, \dots, a_i \in \{0, 1\})$,

$$\hat{A} = (\dots, \hat{a}_{-2}, \hat{a}_{-1}, \dots, \hat{a}_i, \dots) = (\dots, (a_{-n-1}, a_{-n}, \dots, a_{-2}), (a_{-n}, a_{-n+1}, \dots, a_{-1}), \dots, (a_{i-n+1}, a_{i-n+2}, \dots, a_i, \dots), \dots).$$

Введенное преобразование F_n , позволяющее сформировать траекторию в n -мерном сигнальном пространстве, координаты точек которой задаются n -членными фрагментами исходной бинарной последовательности, является основой для структурной обработки информации. Оно обладает свойством ассоциативности обращения к точкам траектории \hat{A} по n -членному фрагменту последовательности A : любые n символов исходной последовательности A адресуют нас к соответствующей точке траектории \hat{A} . Ассоциативность преобразования (1) позволяет сохранить топологию структуры преобразуемой информации: одинаковые фрагменты входной последовательности преобразуются в один и тот же фрагмент траектории, разные — в разные фрагменты траектории.

В общем случае входная последовательность A может содержать одинаковые n -членные фрагменты, что приводит к возникновению точек самопересечения траектории.

Обратное к (1) преобразование вычисляется согласно следующей формуле:

$$F_n^{-1} : \hat{A} \rightarrow A, F_n^{-1}(\hat{A}) = A. \quad (2)$$

Пример. Пусть входная последовательность $A = (\dots 000 \dots 0010110010101100 \dots 000 \dots)$ отображается преобразованием F_n в трехмерное пространство. Тогда последовательности A соответствует последовательность вершин трехмерного единичного куба: $\hat{A} = F(A) = (\hat{a}_1 = 001, \hat{a}_2 = 010, \hat{a}_3 = 101, \hat{a}_4 = 011, \hat{a}_5 = 110, \hat{a}_6 = 100, \hat{a}_7 = 001, \hat{a}_8 = 010, \hat{a}_9 = 101, \hat{a}_{10} = 010, \hat{a}_{11} = 101, \hat{a}_{12} = 011, \hat{a}_{13} = 110, \hat{a}_{14} = 100,$

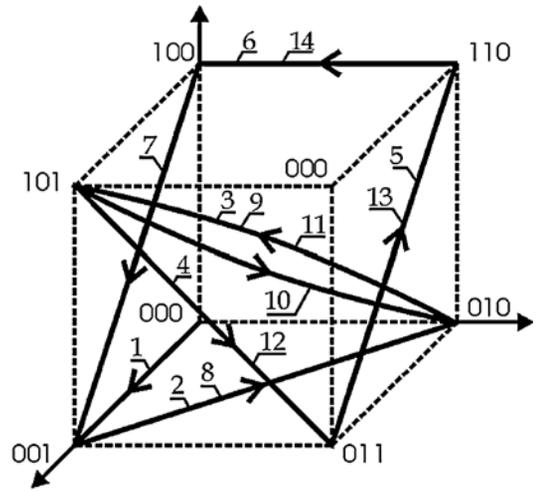


Рис. 1. Траектория последовательности $A = (\dots 000 \dots 00101100 10101100 \dots 000 \dots)$ в многомерном пространстве

$\hat{a}_{15} = 000$), а траектория будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Авто-/гетероассоциативная запись/воспроизведение

Пусть задана некоторая последовательность J и траектория $\hat{A} \in R^n$, соответствующая последовательности A . Введем функцию $M(3)$, ставящую в соответствие каждой точке траектории \hat{A} элемент последовательности J :

$$M(\hat{a}_i, j_{i+1}) = [\hat{a}_i]_{j_{i+1}}. \quad (3)$$

Полученную траекторию $[\hat{A}]_J$ будем называть траекторией, обусловленной последовательностью J :

$$[\hat{A}]_J = M(F_n(A), J). \quad (4)$$

Таким образом, функция M осуществляет запись последовательности J в точках траектории \hat{A} (в ассоциации с последовательностью A). Назовем эту функцию *функцией памяти*, последовательность J — *информационной* или *обуславливающей*, последовательность A — *несущей последовательностью*, а такой способ записи — *гетероассоциативной записью*.

Восстановление информационной последовательности J по обусловленной ею траектории $[\hat{A}]_J$ и несущей последовательности A осуществляется с помощью функции:

$$R([\hat{A}]_J) = J, \quad (5)$$

где R назовем *функцией считывания*. При этом ассоциативное отображение в многомерное пространство несущей последовательности A приводит к прохождению точек соответствующей траектории \hat{A} , что и позволяет считать символы последовательности J .

Таким образом, имея несущую последовательность и обусловленную последовательностью J траекторию, с помощью функции (5) можно восстановить исходную информационную последовательность. Такой способ воспроизведения назовем *гетероассоциативным воспроизведением*.

Пусть A — несущая последовательность. Если в качестве обуславливающей последовательности используется та же последовательность A , то имеем случай самообуславливания. Очевидно, что в этом случае обусловленная последовательность может быть получена следующим образом:

$$[\hat{A}]_A = M(F_n(A), A), \quad (6)$$

где $\hat{A} = F_n(A)$.

При самообуславливании восстановить информационную последовательность можно, используя функцию (5):

$$R([\hat{A}]_A) = A. \quad (7)$$

Такая запись называется *автоассоциативной записью*, а воспроизведение — *автоассоциативным воспроизведением*.

Таким образом, использование функций M и R совместно с преобразованием F_n , обладающим свойством ассоциативного обращения к информации, позволяет реализовать ассоциативную память с возможностью авто- и гетероассоциативной записи/воспроизведения информации.

Механизм памяти

Пусть механизм памяти (3) представляет собой счетчик, фиксирующий число проходов заданной точки траектории в заданном направлении. Очевидно, что для траектории, порожденной бинарной последовательностью согласно (1), направлений перехода из текущей точки может быть не более двух. В связи с этим целесообразно ввести два счетчика, фиксирующих число переходов заданной точки в 0 и в 1. Обозначим их C_0 и C_1 соответственно. Использование счетчиков позволяет определить (в случае предварительного обучения) для заданной точки значение наиболее вероятного перехода.

Пусть задана несущая последовательность A , а также порожденная этой последовательностью траектория A . Тогда счетчики C_0 и C_1 для i -й точки траектории \hat{A} для t -го момента времени вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} M(\hat{a}_i, a_{i+1}) &= [\hat{a}_{i+1}] = C_{\hat{a}_i}(t) = \\ &= \begin{cases} C_0(t) = C_0(t-1) + 1; C_1(t) = C_1(t-1) | a_{i+1} = 0; \\ C_0(t) = C_0(t-1); C_1(t) = C_1(t-1) + 1 | a_{i+1} = 1. \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

При воспроизведении анализируются состояния счетчиков, и текущий символ формируется в зависимости от выполнения условия:

$$a_{i+1} = R([\hat{a}_i]) = R(C_{\hat{a}_i}(t)) = \begin{cases} 0 | C_1 < C_0; \\ 1 | C_1 \geq C_0. \end{cases} \quad (9)$$

Такой механизм памяти чувствителен к числу проходов заданной точки в заданном направлении и позволяет характеризовать каждую точку траектории с точки зрения частоты появления во входной информационной последовательности любого повторяющегося фрагмента.

Введем пороговое преобразование H с порогом h . Тогда суперпозиция $H_h R M F_n(A)$ позволит выделить в сигнальном пространстве только такие точки траектории, которые были пройдены не менее h раз. Очевидно, что при $h = 1$: $\hat{A}_{(h)} = F_n(A) = \hat{A}$, т. е. будет сохранена вся информация.

Формирование словаря

Механизм памяти, чувствительный к числу проходов заданной вершины в заданном направлении, является инструментом для анализа входной последовательности с точки зрения повторяющихся ее частей, поскольку одинаковые фрагменты последовательности отображаются преобразованием F_n в одну и ту же часть траектории.

Словарь формируется из множества последовательностей $\{A\}_{k_2}$ в каждой из которых с помощью суперпозиции $H_h R M F_n$ (отображением последовательностей класса $\{A\}_{k_2}$ в n -мерное пространство и применением к ним порогового преобразования) выделяются входящие в нее не менее h раз подпоследовательности $B_j \subset A_k$. Таким образом, преобразование $H_h R M F_n$ при взаимодействии с входным множеством $\{A\}_{k_1}$ в пространстве данной мерности восстанавливает словарь $\{\hat{B}\}_{k_1}$ подпоследовательностей B_j , входящий в траектории входного множества:

$$\{\hat{B}\}_{k_1} = H_h R M F_n(\{A\}_{k_1}). \quad (10)$$

Для другого множества $\{A\}_{k_2}$ словарь $\{\hat{B}\}_{k_2}$ будет другим.

Формирование синтаксической последовательности. Структурная обработка

Сформированный словарь может быть использован для детектирования старой информации в потоке новой. Для этого необходимо поглощение фрагментов входной последовательности \tilde{A} , соответствующих словам словаря, и пропускание новой относительно словаря информации. В результате реализуется структурный подход к обработке информации.

Для решения задачи детектирования обратное преобразование F_n^{-1} модифицируется для придания ему детектирующих свойств. Модификация $F_{n,C}^{-1}$ состоит в том, чтобы выделить из входной последовательности \hat{A} , содержащей наряду со старой информацией, на основе которой был сформирован словарь (10), некоторую новую информацию. Использование преобразования $F_{n,C}^{-1}$ позволяет сформировать так называемую синтаксическую последовательность или последовательность аббревиатур C , характеризующую связи слов словаря $\{\hat{B}_j\}$ в последовательностях множества $\{A\}_k$. Обозначим через $\{B_j\}$ множество подпоследовательностей, соответствующих всем цепям слов \hat{B}_j словаря (11):

$$\{B_j\} = F_n^{-1}(\{\hat{B}_j\}), \quad (11)$$

тогда

$$F_{n,C}^{-1}(\tilde{A}, \{\hat{B}_j\}) = C, \quad (12)$$

$$C = \begin{cases} \hat{a}_i | \hat{a}_i \neq \hat{a}_i; \\ 0 | \hat{a}_i \geq \hat{a}_i, \end{cases}$$

здесь $\hat{a}_i \in \hat{A}$ и $\hat{a}_i \in \hat{A}_i$. И в другой записи множество синтаксических последовательностей формируется согласно следующему выражению:

$$\{C\} = F_{n,C}^{-1}(F_n(\tilde{A}), H_h RM(\{\hat{A}\})). \quad (13)$$

Таким образом, отображение $F_{n,C}^{-1}$ позволяет устранить из входной последовательности \tilde{A} неко-

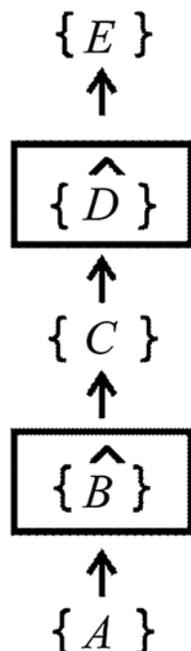


Рис. 2. Стандартный элемент многоуровневой иерархической структуры

торую информацию, содержащуюся в словаре $\{\hat{B}\}$. Тем самым создается предпосылка построения многоуровневой структуры для лингвистической (структурной) обработки входной информации. Синтаксическая последовательность C , содержащая только новую, по отношению к данному уровню, информацию, становится входной для следующего уровня. На следующем уровне, подобно описанному выше, из множества синтаксических последовательностей $\{C\}$ формируется словарь $\{\hat{D}\}$ и множество синтаксических последовательностей следующего уровня $\{E\}$. Итак, мы имеем стандартный элемент многоуровневой иерархической структуры (рис. 2). В режиме анализа на его вход поступает множество последовательностей $\{A\}$, формирующих в нижнем уровне словарь $\{\hat{B}\}$ и на его выходе — множество синтаксических последовательностей $\{C\}$, являющихся входными для верхнего уровня. В верхнем уровне на основе множества синтаксических последовательностей $\{C\}$ формируется словарь $\{\hat{D}\}$, а на его выходе — множество синтаксических последовательностей $\{E\}$. Такая обработка с восстановлением поуровневых словарей происходит на всех уровнях. В этом случае словарь следующего уровня является грамматикой для предыдущего уровня, так как его элементами, при соответствующем выборе размерностей пространств этих уровней, являются элементы связей слов предыдущего уровня.

Заключение

В работе показано, что ассоциативная память как модель иерархии колонок коры полушарий головного мозга человека позволяет сформировать статистический портрет входной информации в виде иерархии словарей входных событий различной частоты встречаемости, а также выявить связи этих событий во входном потоке. И образы событий, и их взаимосвязи позволяют построить сеть, которая может стать семантическим портретом ситуации после перенормировки весов образов событий, что будет описано далее во второй части работы.

Работа выполнена при поддержке РГНФ (проект № 15-03-00860 "Методология управления сетевыми структурами в контексте парадигмы сложности").

Список литературы

1. **Евин И. А., Кобляков А. А.** Сети, которые хранятся в нашей памяти (Когнитивные сети). URL: <http://spkurdyurnov.ru/networks/seti-kotorye-xranyatsya-v-nashej-parnyati/>
2. **DARPA SyNAPSE Program.** URL: <http://www.artificial-brains.com/darpa-synapse-program>.
3. **Харламов А. А.** Нейросетевая технология представления и обработки информации (естественное представление знаний). М.: Радиотехника, 2006.
4. **Корнеев И. Л., Гришин А. Г.** СБИС для цифрового согласованного фильтра // Электроника: наука, технология, бизнес. Февраль 2008. С. 54—57.

A. A. Kharlamov, Senior Researcher, e-mail: kharlamov@analyst.ru,
Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of Russian Academy of Sciences, Moscow,
T. V. Yermolenco, Head of Department, e-mail: etv@iai.dn.ua,
Institute of Artificial Intelligence Problems, Ukraine Donetsk

Neuronetwork Environment (Neuromorphic Associative Memory) for Negotiation of Information Complexity. Meaning Identification in Semystructured Information Corpuses. Part I. Structured Information Processing in Cortex

Human associative memory is a tool for negotiation of information complexity which is a result of its living. In the paper shown an architecture, properties and functions of associative memory for its using in negotiation of information complexity. A prototype of associative memory — hypercolumn of human cortex. Information properties of neuromorphic associative memory are showing: automatical structuring of large massives of heterogeneous information, memorization of information in learning process, filtering of formely memorized information in input flow, automatical detecting of repeated structural elements of different complexity (different periodicity of appearance) in input information flow — vocabularies hierarchy, automatical detecting of structured elements relations in the flow, cognitive semantic network forming.

Keywords: korticomorphic associative memory, structural information processing, associative (homogeneous semantic) network

References

1. Evin I. A., Koblyakov A. A. *Seti, kotorye khranyatsya v nashej pamyati* (Kognitivnye seti). URL: <http://spkurdyumov.ru/networks/seti-kotorye-xranyatsya-v-nashej-pamyati/>
2. DARPA SyNAPSE Program. URL: <http://www.artificial-brains.com/darpa-synapse-program>.

3. Kharlamov A. A. *Neirosevaya tekhnologiya predstavleniya i obrabotki informatsii (estestvennoe predstavlenie znaniy)*, Moscow: Radiotekhnika, 2006.

4. Korneev I. L., Grishin A. G. SBIS dlya tsifrovogo soglasovannogo filtra. *Electronica: nauka, tekhnologiya, biznes*, Fevral 2008, pp. 54—57.



Международная научная конференция Архангельск :: 28 марта — 1 апреля 2016 г. :: Северный (Арктический) федеральный университет Русский | English

"Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2016" — международная научная конференция, десятая в серии ежегодных конференций, посвященных развитию и применению параллельных вычислительных технологий в различных областях науки и техники. **Главная цель конференции** — предоставить возможность для обсуждения перспектив развития параллельных вычислительных технологий и представления результатов, полученных ведущими научными группами в использовании суперкомпьютерных технологий для решения задач науки и техники.

Организаторы конференции:

- Федеральное агентство научных организаций России
- Суперкомпьютерный консорциум университетов России

Тематика конференции покрывает все аспекты применения высокопроизводительных вычислений в науке и технике, включая приложения, аппаратное и программное обеспечение, специализированные языки и пакеты.

В первый день работы конференции будет объявлена **24-я редакция списка Top50** самых мощных компьютеров СНГ.

Во все дни работы конференции будет действовать **суперкомпьютерная выставка**, на которой ведущие производители аппаратного и программного обеспечения представят свои новейшие разработки в области высокопроизводительных вычислений.

Языки конференции: русский, английский.

Официальный сайт конференции: <http://aqora.guru.ru/pavt2016/>

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ CAD-SYSTEMS

УДК 621.3.049.771.14

С. В. Гаврилов, д-р техн. наук, зав. отделом, **Г. А. Иванова**, мл. науч. сотр., e-mail: pirutina_g@ipppm.ru,
Д. И. Рыжова, мл. науч. сотр., **А. Н. Соловьев**, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
А. Л. Стемповский, д-р техн. наук, академик РАН, директор,
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)

Методы синтеза помехозащищенных комбинационных блоков

Работа посвящена исследованию и разработке методов повышения помехозащищенности комбинационных схем под воздействием различных источников помех и сбоев. Рассмотрены существующие методы повышения надежности работы схем на логическом и системном уровнях. Для обеспечения необходимого уровня помехозащищенности предложен новый подход в проектировании отказоустойчивых комбинационных схем, основанный на синтезе схем защиты в базе конечных полей Галуа. Особенность предлагаемого подхода заключается в оптимизации схемы контроля за счет выбора схемы коммутации с учетом логических корреляций.

Ключевые слова: помехоустойчивость, упорядоченные диаграммы двоичных решений, поля Галуа

Введение

По мере роста степени интеграции и уменьшения технологических размеров возрастает роль повышения надежности и помехоустойчивости проектируемых устройств под воздействием различных источников помех и сбоев: технологических, радиационных, перекрестных помех, деградации во времени, скачков напряжения питания и др. В настоящее время складывается ситуация, когда фактор помехоустойчивости в микроэлектронике становится определяющим условием работоспособности и надежности разрабатываемой электронной аппаратуры. Вместе с тем, несмотря на бурное развитие современных технологий для обеспечения требуемой отказоустойчивости микросистем в основном используют широко известные методы многократного дублирования [1], ведущие часто к неоправданной избыточности. Поэтому актуальной задачей является разработка концептуальных основ и методов построения микросистем, обеспечивающих достижение требуемой надежности функционирования за счет введения управляемой структурной избыточности [2, 3].

Анализ существующих методов повышения надежности схем на логическом и системном уровнях

Защита схем на логическом уровне проектирования. Одним из подходов для решения задач в области помехозащищенного кодирования является использование линейных и циклических кодов —

кодов Боуза—Чоудхури—Хоквингема (БЧХ-коды) [4, 5]. Такие подходы основаны на использовании алгебры конечных полей [6] и, как правило, используются для защиты систем передачи и хранения данных, но не предназначены для повышения помехозащищенности комбинационных схем.

Альтернативное направление заключается в разработке и исследовании методов маскирования возникающих сбоев (*glitch*). На уровне транзисторов и $p-n$ -переходов моделируются радиационные эффекты и исследуется реакция логических элементов на такие воздействия. Попадание заряженной частицы приводит к возникновению одиночных эффектов, которые делятся на одиночные ошибки (обратимые) и отказы (необратимые). Здесь и далее будут рассматриваться только методы защиты от обратимых радиационных эффектов.

Обычно одиночные сбои оказывают большее влияние на последовательностные схемы, чем на комбинационную логику, что объясняется наличием трех факторов, которые не позволяют логике стать более чувствительной к одиночным сбоям: логическое маскирование, электрическое маскирование, временное маскирование.

Логическое маскирование состоит в том, что для ошибки в работе схемы одиночный эффект переходной ионизационной реакции (*single-event transient*) должен распространяться по чувствительному пути от места локализации до триггера-зашелки [7].

Из-за электрических свойств вентиля сбой может быть ослаблен или даже полностью маскирован, прежде чем он распространится до триггера-

зашелки [8], в этом заключается электрическое маскирование.

При временном маскировании сбоя может распространиться в схеме, только если достигнет триггера-зашелки и удовлетворит условиям установки и удержания временного сигнала (*setup and hold time*) [9].

В статье [10] предлагается подход, рассматривающий все типы маскирования одновременно с учетом их совместной зависимости от входных наборов. В работе представлена структура, основанная на ADD (алгебраические диаграммы решений) и BDD (диаграммы двоичных решений) для анализа надежности комбинационных схем:

- чувствительности выхода к сбою;
- влияния отдельных вентилях на отдельные выходы и общую надежность схемы;
- зависимости надежности схемы от длительности сбоя (*glitch*), его амплитуды и входных последовательностей.

Предложенный подход позволяет выбрать технику повышения радиационной стойкости меньшей стоимости за счет подбора размеров вентилях, которые с наибольшей вероятностью вызывают ошибку в работе схемы.

Для оценки вероятности появления ошибок в комбинационной логике в качестве символьных моделей используют диаграммы двоичных решений и алгебраические диаграммы решений. Диаграммы BDD [11, 12] являются эффективным каноническим представлением булевых функций. ADD [13] представляют собой класс символьных моделей и связанных с ними алгоритмов, применяемых не только для Булевой арифметики, но и для многих алгебраических функций. Информация о маскирующих факторах неявно генерируется внутри BDD и ADD и, следовательно, позволяет эффективно распараллеливать вычисление чувствительности выхода к сбоям из-за ошибок в различных внутренних узлах.

Объединенная обработка трех маскирующих факторов необходима по следующим причинам:

- логическое маскирование зависит от входов и топологии схемы, так как чувствительность путей в схеме различается для разных входных векторов;
- электрическое маскирование (затухание сбоя) зависит от вентилях, через которые распространяется сбой, и, таким образом, зависит от логического маскирования;
- вероятность маскирования сбоя зависит от размера сбоя на выходе (т. е. является функцией от начального размера сбоя и затухания на чувствительных путях), а также от размера и относительного времени прибытия сходящихся сбоев, которое влияет на амплитуду/длительность полученного сбоя.

Независимое рассмотрение данных факторов является неверным, так как все они зависят от входов и чувствительных путей.

Если в результате радиационного воздействия на выходе затвора G появился сбой, то он должен удовлетворять условиям установки и удержания триггера. Из этого следует, что существуют ограничения на размер сбоя:

- амплитуда сбоя на выходе F должна быть больше, чем порог переключения триггера-зашелки (правильное значение выхода — 0) или меньше, чем порог переключения (правильное значение выхода — 1);
- продолжительность сбоя на выходе F должна быть больше, чем сумма времен установки и удержания триггера.

Каждую схему анализируют исходя из двух аспектов: надежности выходов при возникновении сбоев в схеме и влияния ошибок на выходы отдельных вентилях. Для каждого выхода F_j , начальной продолжительности d_{init} и начальной амплитуды a_{init} сбоя определяется среднеквадратичная ошибка чувствительности (*mean error susceptibility*) как вероятность появления ошибки на выходе F_j в результате возникновения ошибок на внутренних вентилях. Для каждого вентиля G_j , d_{init} и a_{init} определяются минимальная, максимальная, среднеквадратичная и срединная ошибки отклонения по всем выходам F_j , на которые влияет сбой, происходящий на выходе вентиля G_j . Также было получено выражение для оценки числа одиночных ошибок (*soft error rate*).

Методы защиты схем на системном уровне. Для обеспечения сбоеустойчивости схем традиционно применяют три подхода, различающиеся степенью разделения аппаратуры для мажоритарного сравнения [14–16]:

- *Интеграция в систему трех синхронных процессоров и устройства сравнения.* Достоинство метода — возможно построение системы из стандартных микропроцессоров. Недостаток метода — восстановление данных возможно только программным способом, что ведет к большой длительности восстановления.
- *Замена каждого триггера на кристалле на схему из трех триггеров с несколькими элементами мажоритарирования.* Достоинство метода — возможно автоматическое перепроектирование разработанной БИС и восстановление данных в течение одного такта без вмешательства программного обеспечения. Недостатки метода: не позволяет обнаружить сбой или отказы в комбинационной логике; приводит к снижению быстродействия и существенному увеличению площади кристалла.
- *Мажорирование на уровне блоков с потактовым сравнением.* Суть метода заключается в том, что весь микропроцессор разбивается на блоки, для каждого блока процессора подбирается наиболее эффективный вариант защиты от сбоев и

метод восстановления данных. Достоинства метода: аппаратные затраты меньше, чем полное резервирование; возможность восстановления данных без участия программного обеспечения; потери быстродействия и площади на мажорирование меньше, чем для метода резервирования на уровне триггеров. Недостаток метода — большая трудоемкость проектирования по сравнению с полным резервированием или резервированием на уровне триггеров и отсутствие сбоеустойчивости блока при единичном отказе.

Синтез схемы защиты

В основе предлагаемой методики лежит новый подход в проектировании отказоустойчивых комбинационных схем, основанный на синтезе схем защиты в базе конечных полей Галуа (GF) с булевыми коэффициентами. Это дает возможность оптимального сочетания требований минимизации аппаратных затрат и обеспечения требуемого (заданного) уровня отказоустойчивости. В качестве концептуальной основы реализации схемы защиты предложено разделение выходного вектора (результатов работы комбинационной схемы) на подмножества разрешенных и запрещенных кодовых комбинаций, формируемых путем добавления к выходному вектору (имеющему размерность k) проверочного вектора (имеющего размерность r). При этом процедурой формирования проверочного вектора (контрольных разрядов), а также принадлежностью текущего вектора к разрешенным или запрещенным кодовым комбинациям является процедура деления данных кодовых комбинаций на двоичный многочлен $G(x)$, принадлежащий двоичным полям Галуа. В основе данного подхода лежат корректирующие свойства схемы декодирования, позволяющей обнаружить ошибки, возникающие в схеме кодирования. При этом корректирующие способности оцениваются как 2^{-r} .

В рамках данной работы предложен алгоритм структурного синтеза схемы контроля для произвольной комбинационной схемы, зависящий от выбора образующего многочлена $G(x)$, размерности выходного вектора (числа информационных разрядов k) и схемы коммутации, обеспечивающей формирование соответствия между выходом исходной схемы и входом синтезируемой схемы контроля. Структура разработанного алгоритма синтеза описана ниже.

Для описания синтеза схемы контроля будут использоваться следующие обозначения: $g^r(x)$ — образующий многочлен; r — степень образующего многочлена; y — вектор выходных сигналов комбинационной схемы $y = y_1, \dots, y_j, \dots, y_k$, где k — число выходов; z — вектор выходных сигналов схемы контроля $z = z_1, \dots, z_r$; ZM — матрица остатков от деления вектора выходных сигналов на образующий многочлен; y' — вектор, состоящий из вектора

выходных сигналов схемы y и вектора выходов схемы контроля $z = z_1, \dots, z_r$; z' — вектор выходных сигналов схемы декодирования $z' = z'_1, \dots, z'_r$.

Основная идея предлагаемого метода повышения надежности и отказоустойчивости комбинационных схем состоит в том, чтобы "свернуть" вектор выходных сигналов комбинационной схемы $y_1, \dots, y_j, \dots, y_k$, где k — число выходов, и получить итоговую сигнатурную свертку: z'_1, \dots, z'_r , где r — длина (число двоичных разрядов) итоговой сигнатуры.

В качестве примера рассмотрим синтез схемы контроля для случая:

- комбинационная схема с пятью выходами: y_1, \dots, y_5 ;
 - в качестве образующего выбран примитивный многочлен $g^3(x) = x^3 + x + 1$. При этом остаток от деления y на полином 3-й степени $G(x)$ имеет три разряда и будет обозначаться как z'_1, \dots, z'_3 .
- Функциональная схема деления вектора, состоящего из вектора выходных сигналов схемы $y_1, \dots, y_j, \dots, y_5$ и вектора выходов схемы контроля z_1, \dots, z_3 , на образующий многочлен $g^3(x) = x^3 + x + 1$ и формирования остатков z'_1, \dots, z'_3 показана на рис. 1. При этом знак \oplus обозначает суммирование по модулю 2.

Рассмотрим формирование остатка $E1, E2, E3$ от деления вектора $y_1, \dots, y_j, \dots, y_5, z_1, \dots, z_3$ на образующий полином $g^3(x) = x^3 + x + 1$. При делении вектора $y_1, \dots, y_j, \dots, y_5, z_1, \dots, z_3$ на образующий полином формируются следующие промежуточные остатки, представленные на рис. 1:

$$\begin{aligned}
 A1, A2, A3 &\Rightarrow A1 = y_2; A2 = y_1 \oplus y_3; A3 = y_1 \oplus y_4; \\
 B1, B2, B3 &\Rightarrow B1 = y_1 \oplus y_3; B2 = y_1 \oplus y_2 \oplus y_4; \\
 B3 &= y_2 \oplus y_5; \\
 C1, C2, C3 &\Rightarrow C1 = y_1 \oplus y_2 \oplus y_4; \\
 C2 &= y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_5; C3 = y_1 \oplus y_3 \oplus z_1; \\
 D1, D2, D3 &\Rightarrow D1 = y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_5; \\
 D2 &= y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus z_1; D3 = y_1 \oplus y_2 \oplus y_4 \oplus z_2; \\
 E1, E2, E3 &\Rightarrow E1 = y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus z_1; \\
 E2 &= y_3 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus z_2; E3 = y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_5 \oplus z_3.
 \end{aligned}$$

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	z_1	z_2	z_3		1	0	1	1	
y_1	0	y_1	y_1						y_1	$A1$	$B1$	$C1$	$D1$
\oplus	$A1$	$A2$	$A3$	y_5									
	$A1$	0	$A1$	$A1$									
	\oplus	$B1$	$B2$	$B3$	z_1								
		$B1$	0	$B1$	$B1$								
		\oplus	$C1$	$C2$	$C3$	z_2							
			$C1$	0	$C1$	$C1$							
			\oplus	$D1$	$D2$	$D3$	z_3						
				$D1$	0	$D1$	$D1$						
					$E1$	$E2$	$E3$						

Рис. 1. Функциональная схема деления выходного вектора на образующий полином $g(x)$

Суперпозиция с помощью BDD

В целях повышения эффективности построения схем защиты разработаны алгоритмы генерации схемы кодирования на основе модифицированных диаграмм двоичных решений (BDD). Стандартная модель BDD расширена дополнительным аппаратом поиска эквивалентных фрагментов на основе сбалансированного двоичного дерева.

Оптимизация для схем кодирования проводится за счет совместной оптимизации дублирующей и кодирующей схем. Одним из путей оптимизации является построение логических функций на основе применения аппарата BDD. Синтез булевых функций в конечных полях Галуа на основе редуцированных диаграмм двоичных решений (ROBDD) позволяет снять существующее в настоящее время ограничение на число входов и выходов проектируемых комбинационных схем. Применение методики ресинтеза полученных решений за счет учета базиса конечных полей Галуа обеспечивает достижение оптимального структурного решения. Использование предлагаемой методики обеспечивает управляемость и предсказуемость процесса проектирования схем при достижении оптимального сочетания заданных требований по отказоустойчивости и минимизации структурных затрат.

Проведенные исследования показали, что на качество результата в терминах занимаемой площади существенное влияние оказывает не только перепорядочивание входов, как в случае стандартной BDD, но и порядок коммутации выходов в схеме кодирования.

Учет логических корреляций

Для выбора оптимального варианта коммутации выходов в схеме кодирования предлагается использовать оценочную функцию, вычисленную на основе расчета взаимных корреляций между выходами [17–21]. Для демонстрации предлагаемого подхода рассмотрим схему, изображенную на рис. 2.

Схема имеет три выхода. Если в качестве образующего полинома выбрать полином второй сте-

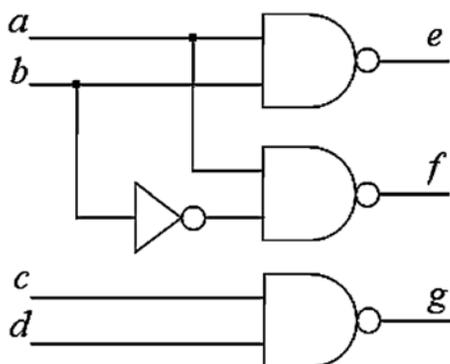


Рис. 2. Пример логической схемы с корреляциями между выходами e и f

пени ($x^2 + x + 1$), то кодированная схема будет выглядеть следующим образом:

$$y = x_1 \oplus x_2;$$

$$z = x_2 \oplus x_3,$$

где \oplus — операция сложения по модулю два.

Существует $N!$ вариантов коммутации выходов комбинационной схемы и входов схемы кодирования, где N — число выходов. Для комбинационной схемы с тремя выходами число комбинаций равно 6. Если рассмотреть полученную схему кодирования, можно заметить, что от перестановки x_1 и x_3 местами результат не изменится, таким образом, из шести возможных комбинаций остаются три:

$$1) x_1 = e, x_2 = f, x_3 = g;$$

$$2) x_1 = f, x_2 = g, x_3 = e;$$

$$3) x_1 = g, x_2 = e, x_3 = f.$$

От выбора коммутирования зависит размер схемы контроля. Варианты BDD-схемы контроля для возможных комбинаций изображены на рис. 3. Из рисунка видно, что в первом и третьем случае число промежуточных узлов равно 4, во втором — 6.

Для выбора оптимального варианта коммутации предлагается учитывать логические корреляции между выходами. В данном примере существуют логические корреляции между выходами e и f . Для снижения структурных затрат при синтезе схемы контроля коррелирующие выходы должны входить в одно выражение. Для поиска логических корреляций между выходами можно воспользоваться методом распространения логических корреляций на основе правила резолюций [22, 23].

Пусть задана пара (V, R) , где $V = \{a, b, \dots\}$ — множество булевых переменных, а R — множество булевых соотношений типа $A = B$; A, B — выражения на множестве V . Множество R преобразуется в одно соотношение $g = 0$, где g — это ДНФ (дизъюнктивная нормальная форма, т. е. сумма произведений литералов). Для вывода новых ограниче-

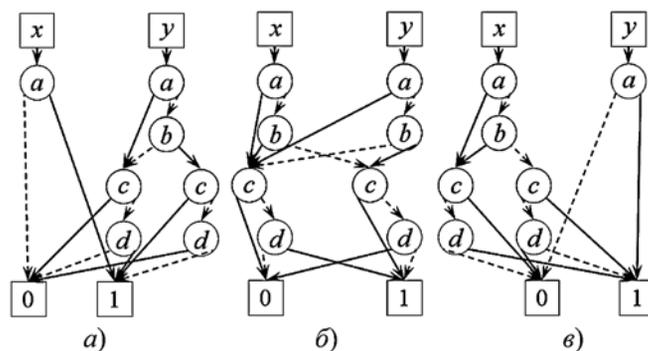


Рис. 3. Варианты BDD-схемы кодирования

ний предлагается использовать следующее правило резолюции:

$$a \cdot B = 0, \bar{a} \cdot C = 0 \mapsto B \cdot C = 0,$$

где B, C — произведения литералов.

Логические корреляции распространяются вдоль схемы от входов до выходов. Для выбора оптимального варианта коммутации следует учитывать логические корреляции, имеющие в своем составе хотя бы один из выходов. Корреляции разной степени оказывают разное влияние на оптимизацию схемы, поэтому для учета корреляций различных степеней предлагается следующая эвристическая формула:

$$S^*(o_i, o_j) = \sum_{k=1} n_k(o_i, o_j) \cdot 2^{-k},$$

где $S^*(o_i, o_j)$ — функция учета логических корреляций между i -м и j -м выходами схемы; n_k — число корреляций k -го порядка.

Наибольший эффект от оптимизации схемы кодирования достигается при условии вхождения в одну формулу выходов схемы, имеющих взаимные корреляции. Для всех выходов дублирующей схемы применяют предложенные методы анализа логических корреляций в цифровой схеме для получения весовых функций. На основе полученных весовых функций выбирается порядок коммутации выходов дублирующей схемы.

Заключение

В рамках данной работы рассмотрены существующие методы повышения надежности работы схем на логическом и системном уровнях. Разработан алгоритм синтеза устройства кодирования в базе полей Галуа. Предложены методы преобразования булевых функций в базе операций по модулю 2 на основе упорядоченных диаграмм двоичных решений. Предлагается вариант оптимизации схем кодирования за счет выбора варианта коммутирования выходов дубликата основной схемы на основе результатов анализа логических корреляций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01036).

Список литературы

1. Шишкевич А. А. Оценка показателей надежности вычислительных устройств с трехкратным мажорированием при отказах и сбоях // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 4. С. 84—88.
2. Соловьев А. Н., Стемповский А. Л., Тельпухов Д. В., Соловьев Р. А., Мячиков М. В. Моделирование возникновения неисправностей для оценки надежностных характеристик логических схем // Информационные технологии. 2014. № 11. С. 30—36.
3. Соловьев А. Н., Стемповский А. Л. Методы повышения отказоустойчивости работы устройства управления микросис-

темы за счет введения структурной избыточности // Информационные технологии. 2014. № 10. С. 17—22.

4. Сагалович Ю. Л. Введение в алгебраические коды: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2007. 262 с.

5. Poolakkaparambil M., Mathew J. BCH Code Based Multiple Bit Error Correction in Finite Field Multiplier Circuits // ISQED. 2011. P. 1—6.

6. Poolakkaparambil M., Mathew J., Jabir A. Multiple Bit Error Tolerant Galois Field Architectures Over GF(2^m) // Electronics. 2012. P. 3—22.

7. Shivakumar P., Kistler M., Keckler S. W., Burger D. Modeling the Effect of Technology Trends on the Soft Error Rate of Combinational Logic // Dependable Systems and Networks. 2002. P. 389—398.

8. Wang F., Xie Y., Rajaraman R. Soft Error Rate Analysis for Combinational Logic Using An Accurate Electrical Masking Model // 20th International Conference on VLSI Design. 2007. P. 165—170.

9. Krishnaswamy S. On the Role of Timing Masking in Reliable Logic Circuit Design // Design Automation Conference. 2008. P. 924—929.

10. Miskov-Zivanov N., Marculescu D. MARS-C: Modeling and Reduction of Soft Errors in Combinational Circuits // Design Automation Conference. 2006. P. 767—772.

11. Gavrilo S., Glebov A. BDD-based Circuit Level Structural Optimization for Digital CMOS // Proc. of MALOPD'99 Workshop, 1999.

12. Bryant R. E. Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation // IEEE Trans. on Computers. 1986. P. 677—691.

13. Гаврилов С. В., Гудкова О. Н., Щелоков А. Н. Логико-временной анализ нанометровых схем на основе интервального подхода // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7 (132). С. 85—91.

14. РД 134-0139—2005. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы оценки стойкости к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам. М.: ЦНИИмаш. 2005. 78 с.

15. ГОСТ 27.310—95. Надежность в технике. Анализ видов последствий и критичности отказов. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1995. 22 с.

16. Соболев С. А. Функциональный метод оценки соответствия аппаратуры требованиям по отказам, вызванным ОЯЧ // Вопросы атомной науки и техники. 2013. № 3. С. 121—132.

17. Гаврилов С. В., Глебов А. Л., Стемповский А. Л. Методы логического и логико-временного анализа цифровых КМОП СБИС. М.: Наука, 2007. 223 с.

18. Гаврилов С. В. Методы анализа логических корреляций для САПР цифровых КМОП СБИС. М.: Техносфера, 2011. 136 с.

19. Gavrilo S. V., Glebov A. L., Soloviev R. A. etc. Delay Noise Pessimism Reduction by Logic Correlations // In Proc. of ICCAD. 2004. P. 160—167.

20. Гаврилов С. В., Рыжова Д. И., Стемповский А. Л. Методы повышения точности оценки пикового тока на логическом уровне на основе анализа логических корреляций // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 7. С. 66—75.

21. Гаврилов С. В., Гудкова О. Н., Северцев В. Н. Интервальный статический временной анализ КМОП-схем с учетом логических корреляций // Конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем — 2012": сб. научн. тр. / Под общей ред. А. Л. Стемповского. 2012. С. 113—118.

22. Glebov A. L., Gavrilo S. V., Blaauw P., Zolotov V., Panda R., Oh C. False-noise analysis using resolution method // International Symposium on Quality Electronic design, San Jose, CA, Mar. 18—21. 2002. P. 437—442.

23. Стемповский А. Л., Гаврилов С. В., Глебов А. Л. Анализ помехоустойчивости цифровых схем на основе метода резолюций // Электроника, Известия вузов. 2004. № 6. С. 64—71.

Methods of Noise Immunity Combinational Blocks Synthesis

This article is dedicated to research and develop methods for increasing the microelectronic circuits' noise immunity under the influence of various sources of failures.

The role of improving the reliability and noise immunity of icsigned devices under the influence of various sources of failures is increases. At present time, the noise immunity factor in microelectronics is becoming critical condition of reliability and working capacity of the developed electronic equipment. One of the key components are combinational circuits. Therefore, research and development of methods for noise immunity improving of microelectronic combinational circuits is actual problem.

The operation of division by the polynomial generator in binary Galois field is proposed to use to ensure the necessary level of noise immunity (error detection with a predetermined degree of multiplicity) for the synthesis of the coder circuit. Optimization of coder circuit is proposed by choosing variant of outputs commutation basic circuit duplicate based on the results of logical correlations analysis. The existing methods for improving the circuits' reliability on logical and system levels are considered. Synthesis of protection circuits in basis of binary Galois fields is proposed to use to ensure the necessary level of noise immunity for the synthesis of the coder circuit.

Keywords: noise tolerance, binary decision diagram (BDD), Galois field

References

1. Shishkevich A. A. Ocenka pokazatelej nadezhnosti vychislitel'nyh ustrojstv s trehkratnym mazhorirovaniem pri otkazah i sbojah, *Izvestija vusov. Jelektronika*, 2013, no. 4, pp. 84–88 (in Russian).
2. Solov'ev A. N., Stempkovskij A. L., Tel'puhov D. V., Solov'ev R. A., Mjachikov M. V. Modelirovanie vozniknovenija neispravnostej dlja ocenki nadezhnostnyh harakteristik logicheskikh shem, *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 11, pp. 30–36 (in Russian).
3. Solov'ev A. N., Stempkovskii A. L. Metody povyshenija otkazoustojchivosti raboty ustrojstva upravlenija mikrosistemy za schet vvedenija struktumoj izbytochnosti, *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 10, pp. 17–22 (in Russian).
4. Sagalovich Ju. L. *Vvedenie v algebraicheskie kody: Uchebnoe posobie*, Moscow: MFTI, 2007. 262 p. (in Russian).
5. Poolakkaparambil M., Mathew J. BCH Code Based Multiple Bit Error Correction in Finite Field Multiplier Circuits, *ISQED*, 2011, pp. 1–6.
6. Poolakkaparambil M., Mathew J., Jabir A. Multiple Bit Error Tolerant Galois Field Architectures Over $GF(2^m)$, *Electronics*, 2012, pp. 3–22.
7. Shivakumar P., Kistler M., Keckler S. W., Burger D. Modeling the Effect of Technology Trends on the Soft Error Rate of Combinational Logic, *Dependable Systems and Networks*, 2002, pp. 389–398.
8. Wang F., Xie Y., Rajaraman R. Soft Error Rate Analysis for Combinational Logic Using An Accurate Electrical Masking Model. *20th International Conference on VLSI Design*, 2007, pp. 165–170.
9. Krishnaswamy S. On the Role of Timing Masking in Reliable Logic Circuit Design, *Design Automation Conference*, 2008, pp. 924–929.
10. Miskov-Zivanov N., Marculescu D. MARS-C: Modeling and Reduction of Soft Errors in Combinational Circuits, *Design Automation Conference*, 2006, pp. 767–772.
11. Gavrilo S., Glebov A. BDD-based Circuit Level Structural Optimization for Digital CMOS, *Proc. of MALOPD '99 Workshop*, 1999.
12. Bryant R. E. Graph-Based Algorithms for Boolean Function Manipulation, *IEEE Trans. on Computers*, 1986, pp. 677–691.
13. Gavrilo S. V., Gudkova O. N., Shhelokov A. N. Logiko-vremennoj analiz nanometrovyyh shem na osnove interval'nogo podhoda, *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2012, no. 7 (132), pp. 85–91 (in Russian).
14. RD 134-0139—2005. *Apparatura, pribory, ustrojstva i oborudovanie kosmicheskikh apparatov. Metody ocenki stojkosti k vozdejstviyu zarjzhennyh chastic kosmicheskogo prostranstva po odinochnym sbojam i otkazam*. Moscow: CNIImash, 2005, 78 p. (in Russian).
15. GOST 27.310—95. *Nadezhnost' v tehnike. Analiz vidov, posledstvij i kritichnosti otkazov. Osnovnye polozenija*, Moscow: Izd-vo standartov, 195, 22 p. (in Russian).
16. Sobolev S. A. Funkcional'nyj metod ocenki sootvetsviya apparatury trebovanijam po otkazam, vyzvannym OJaCh, *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*, 2013, no. 3, pp. 121–132 (in Russian).
17. Gavrilo S. V., Glebov A. L., Stempkovskii A. L. *Metody logicheskogo i logiko-vremennogo analiza cifrovyyh KMOP SBIS*, Moscow: Nauka, 2007, 223 p. (in Russian).
18. Gavrilo S. V. *Metody analiza logicheskikh korreljacij dlja SAPR cifrovyyh KMOP SBIS*, Moscow: Tehnosfera, 2011. 136 p. (in Russian).
19. Gavrilo S. V., Glebov A. L., Soloviev R. A. etc. Delay Noise Pessimism Reduction by Logic Correlations. *In Proc. of ICCAD*, 2004, pp. 160–167.
20. Gavrilo S. V., Ryzhova D. I., Stempkovskij A. L. Metody povyshenija tochnosti ocenki pikovogo toka na logicheskom urovne na osnove analiza logicheskikh korreljacij, *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2014, no. 7, pp. 66–75 (in Russian).
21. Gavrilo S. V., Gudkova O. N., Severcev V. N. Interval'nyj staticheskij vremennoj analiz KMOP-shem s uchedom logicheskikh korreljacij, *Konferencija "Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem — 2012"*: sb. nauchn. tr. Pod obshej red. A. L. Stempkovskogo, 2012, pp. 113–118 (in Russian).
22. Glebov A. L., Gavrilo S. V., Blaauw D., Zolotov V., Panda R., Oh C. False-noise analysis using resolution method, *International Symposium on Quality Electronic design*, San Jose, CA, Mar. 18–21, 2002, pp. 437–442.
23. Stempkovskij A. L., Gavrilo S. V., Glebov A. L. Analiz pomehoustojchivosti cifrovyyh shem na osnove metoda rezoljucij, *Jelektronika, Izvestija vuzov*, 2004, no. 6, pp. 64–71 (in Russian).

И. А. Кузьмина, ассистент, kuzminainna@yandex.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Проектирование оптимальной структуры распределительной сети энергоснабжения с учетом перспектив развития города

Представлены разработанные автором модели, методы и алгоритмы решения задачи перспективного развития городских распределительных сетей энергоснабжения; дано описание реализующего их программного комплекса ELNET. Приведены некоторые результаты расчета перспективного развития сети энергоснабжения, по размерам и параметрам близкой к энергосети района мегаполиса; доказана эффективность и работоспособность предложенных технических решений.

Ключевые слова: городская распределительная сеть энергоснабжения, перспективное развитие энергосети, модель энергосети, оптимизация, декомпозиция, редукция, кластеризация, эвристический алгоритм, генетический алгоритм, диаграмма Вороного

Введение

Городские распределительные сети энергоснабжения (далее — энергосети) являются сложной системой неоднородной структуры и представляют собой совокупность распределительных подстанций (РП) и трансформаторных подстанций (ТП), питающих и распределительных линий электропередачи, энергоприемников и охватывают всех потребителей города, включая промышленные предприятия, электрифицированный транспорт и т. д. [1]. Энергосети включают в себя узлы двух уровней напряжения — 10 и 0,4 кВ.

Масштаб и структура энергосети зависят от размера города, мощности и числа городских потребителей (коммунально-бытовых, промышленных, транспортных и пр.), их расположения на плане города. Энергосеть подвержена постоянным изменениям — строятся новые узлы сети, ликвидируются старые, подключаются новые потребители и изменяются нагрузки подключенных ранее потребителей, устаревшее электротехническое оборудование заменяется на новое и т. д. Современные темпы развития мегаполисов чрезвычайно высоки — за год энергосеть "разрастается" на 5...7 %, что соответствует подключению нескольких тысяч новых потребителей и строительству десятков и даже сотен новых ТП и РП [2].

Высокая плотность взаимозависимых узлов, быстрые темпы развития, а также необходимость учета большого числа различных критериев при выборе решения делают задачу проектирования энергосети оптимальной топологии многопараметрической, многокритериальной, многовариантной и трудно-преодолимой [3].

В литературе как отечественной, так и зарубежной предложены различные модели оптимизации энергосетей. Показано, что данную задачу можно решать как в непрерывной, так и в дискретной по-

становках [4]. Для решения этих задач используют различные алгоритмы и методы, такие как методы динамического программирования [5], метод ветвей и границ [6], эвристические алгоритмы [7], алгоритмы поиска с запретами [8], эволюционное моделирование [9, 10].

Большая часть литературы по электроснабжению городов включает в себя различные методики и требования к определению параметров разных элементов энергосети (номинального напряжения, сечения кабельных линий (КЛ), числа и мощности устанавливаемых на ТП трансформаторов и т. д.), а также вопросы оптимизации режимов работы, вопросы качества электроэнергии и надежности энергоснабжения [11–13]. В ряде работ также выполнен анализ схемы соединений, местоположений подстанций энергосети и т. д. [14].

Анализ имеющейся литературы по проектированию энергосетей показал наличие ряда следующих актуальных вопросов, требующих исследования.

1. Связанное решение всего комплекса вопросов задачи перспективного развития энергосетей (ПРЭ) описано лишь в нескольких трудах [например, 15]. В подавляющем числе работ рассматривается лишь один из аспектов проблемы (выбор мест строительства ТП, определение оптимального варианта распределения потребителей и т. д.).

2. Большая часть предложенных в литературе постановок задачи носит непрерывный характер (отсутствуют ограничения на местности). Такой подход может быть применен лишь в очень ограниченном числе случаев.

3. Как правило, задачу определения мест строительства ТП/РП ставят в контексте размещения единичной подстанции. Подходы к решению такой задачи не могут быть эффективно применены для размещения некоторого набора подстанций различных мощностей.

4. Приведенные затраты на строительство энергосетей, используемые в большинстве работ как критерии оценки оптимальности решения, не учитывают важные характеристики энергосети — надежность энергоснабжения и качество электроэнергии.

5. Предложенные математические модели преимущественно подразумевают строительство энергосети "с нуля" (т. е. не учитываются уже существующие объекты энергосети), что является неприемлемым в условиях современного уровня электрификации, когда все города России электрифицированы.

На основании вышеизложенного сделано заключение об актуальности исследования задачи ПРЭ.

1. Постановка задачи перспективного развития энергосети

В общем случае задача ПРЭ рассматривается как задача установления пути оптимального развития энергосети с точки зрения конфигурации, загрузки оборудования, нагрузок подстанций и т. д. [16]. Оптимальное развитие подразумевает обеспечение наилучших технико-экономических показателей энергосети. При этом энергосеть должна удовлетворять требованиям к надежности и качеству энергоснабжения, к воздействию на окружающую среду.

При решении задачи ПРЭ города рассматривают следующие основные вопросы [3]:

- выбор числа и местоположения РП;
- выбор числа и местоположения ТП, а также определение их мощности;
- выбор варианта подключения новых потребителей к энергосети, а также определение параметров возводимых кабельных линий (КЛ);
- определение варианта включения новых ТП в энергосеть.

Результатом решения задачи ПРЭ является нахождение такого варианта развития энергосети, при котором обеспечивается возможность надежного и высококачественного энергоснабжения всех намечаемых к присоединению и уже присоединенных потребителей электроэнергии при наименьших затратах на расширение энергосети и эксплуатационных расходов на ее обслуживание.

Исходными данными для задачи ПРЭ служат сведения об исходной структуре и параметрах энергосети, а также о подключаемой к ней нагрузке.

В рамках настоящей работы задача ПРЭ поставлена как детерминированная, т. е. спрогнозированную возросшую нагрузку на энергосеть считаем однозначно определенной в виде совокупности подключаемых потребителей.

Модель энергосети представляет собой совокупность объектов следующих типов:

- T — трансформаторная подстанция;
- R — распределительная подстанция;
- C — потребитель;
- L — кабельная линия.

Объекты каждого типа характеризуются набором параметров. Состав вектора параметров является расширяемым и содержит такие характеристики объектов энергосети, как географические координаты объектов, длина и сечение КЛ, запрашиваемая мощность потребителей и пр. Подробно модель энергосети представлена в работе [17].

Исходная энергосеть с подключенной нагрузкой (всеми присоединенными к ней потребителями) представляет собой направленный граф

$$G^{исх} = (R^{исх}, T^{исх}, L^{исх}),$$

где $R^{исх}$, $T^{исх}$, $L^{исх}$ — исходные множества узлов энергосети типа R , T и L соответственно. Элементы множества $T^{исх}$, $R^{исх}$ являются вершинами графа $G^{исх}$, элементы множества $L^{исх}$ соответствуют его дугам.

Совокупность всех подключаемых к энергосети потребителей определяет множество $C^{подкл} = CH^{подкл} \cup CL^{подкл}$, где $CH^{подкл}$, $CL^{подкл}$ — множества потребителей, подключаемых к энергосети на уровнях напряжения 10 и 0,4 кВ соответственно.

Пример фрагмента топологии энергосети представлен на рис. 1.

Вектор варьируемых параметров представлен в следующем виде:

$$X = (X_i, X1_j, X2_j, (x_k, y_k), X_{нов}^R, X_{нов}^T),$$

где X_i — неизвестный номер ТП/РП, к которой будет подключен потребитель C_i ; $X1_j, X2_j$ — номера ТП/РП, к которым подключен ТП T_j ; (x_k, y_k) — географические координаты новой РП/ТП; $X_{нов}^R, X_{нов}^T$ — числа новых РП и ТП, строительство которых необходимо выполнить для подключения всех потребителей множества $C^{подкл}$ к энергосети.

Значения компонентов вектора варьируемых параметров $X_i, X1_j, X2_j$ являются элементами дис-

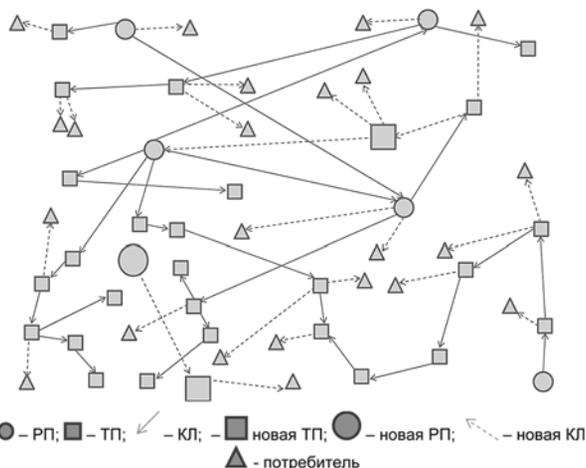


Рис. 1. Схема фрагмента энергосети с включенными в структуру энергосети потребителями, новыми ТП и РП

кретного множества уникальных номеров ТП и РП. Переменные $X_{\text{нов}}^R, X_{\text{нов}}^T$ — целочисленные. Координаты (x_k, y_k) выбирают из множества O — допустимых мест строительства новых РП/ТП.

На ряд параметров объектов типов R, T, L энергосети наложены базовые (обязательные) и пользовательские (дополнительные) ограничения типа равенств и неравенств, которые определяют базовую D_X и пользовательскую D_U области допустимых значений вектора варьируемых параметров.

Определены частные критерии оптимальности развития энергосети $Z(X) = (Z_1(X), Z_2(X), \dots, Z_z(X))$, на первые \tilde{z} которых наложены критериальные ограничения, формирующие одну область допустимых значений вектора варьируемых параметров D_Z . Задачу ПРЭ ставим в виде

$$Z(X^*) = \min_{X \in D} Z(X),$$

где X^* — оптимальные значения компонентов вектора варьируемых параметров; $D = D_X \cap D_U \cap D_Z$ — итоговое множество допустимых значений этого вектора.

2. Методы решения задачи ПРЭ

В статье приведены следующие разработанные автором методы решения задачи ПРЭ:

- метод редукции к совокупности вложенных задач глобальной минимизации (метод редукции);
- метод декомпозиции.

Метод редукции заключается в решении вместо исходной задачи совокупности трех вложенных подзадач глобальной оптимизации меньшей размерности.

- *Подзадача 1* подразумевает определение числа и мест строительства новых РП и ТП.
- *Подзадача 2* заключается в определении оптимального варианта подключения новых потребителей к энергосети.
- *Подзадача 3* позволяет определить варианты возможного подключения новых РП и ТП, "построенных" при решении подзадачи 1, к существующей энергосети.

Методу соответствует декомпозиция вектора X на три составляющие:

$$X = \{X^1, X^2, X^3\}. \quad (1)$$

Здесь $X^1 = \{(x_i, y_i), X_{\text{нов}}^R, X_{\text{нов}}^T\}$; $X^2 = \{X_{ij}\}$; $X^3 = \{X1_j, X2_j\}$.

Указанная декомпозиция вектора варьируемых параметров позволяет свести исходную задачу к задаче вида

$$\min_{X \in D} Z(X^*) = \min_{X^1 \in D} \min_{X^2 \in D(X^1)} \min_{X^3 \in D(X^1, X^2)} Z(X).$$

Здесь $Z(X)$ — скалярный критерий оптимальности, полученный из вектора $Z(X)$, например, методами свертывания частных критериев в скалярный;

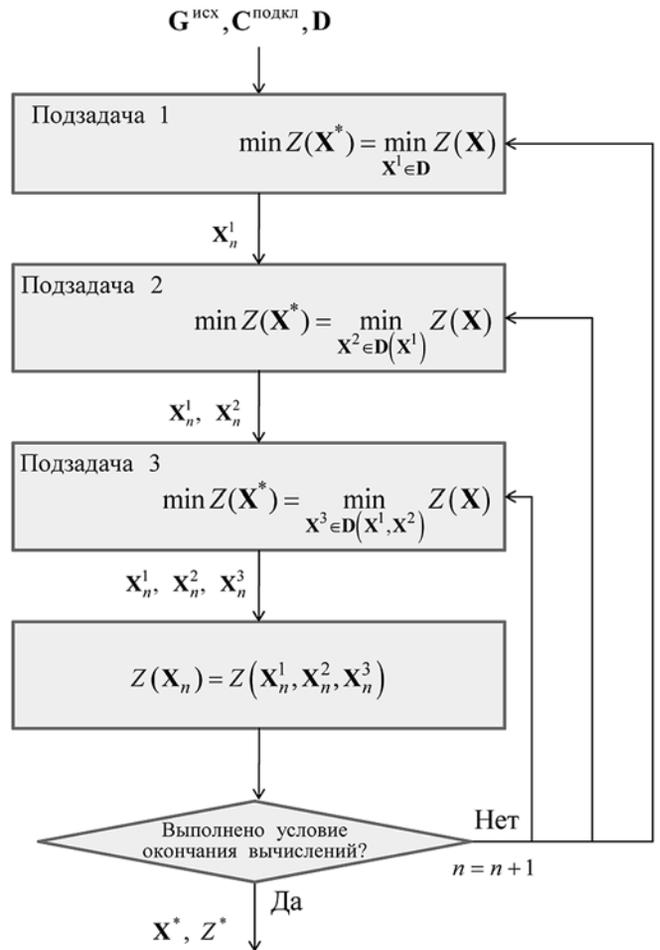


Рис. 2. Схема метода редукции

$D(X^1)$ — подобласть области допустимых значений вектора варьируемых параметров D при фиксированном векторе X^1 ; $D(X^1, X^2)$ — аналогичная подобласть D при фиксированных X^1 и X^2 .

Схема метода представлена на рис. 2. Здесь и далее n — номер итерации.

Методу декомпозиции соответствует аналогичное методу редукции представление вектора варьируемых параметров в виде (1). Для связи локальных подзадач 1–3 определен вектор координирующих параметров $S = S^{\text{lim}} \cup S^{\text{st}}$, где S^{lim} , S^{st} — подвекторы параметров лимитирующей и стимулирующей координации соответственно.

При лимитировании координирующие параметры S^{lim} включаются в систему ограничений подзадач:

$$W_S(X, S^{\text{lim}}) = \{W_i(X, S^{\text{lim}}) \geq 0, i \in [1...ws]\}. \quad (2)$$

Ограничения (2) задают область допустимых значений вектора варьируемых параметров $D_S = (X | W_S(X, S^{\text{lim}}) \geq 0)$.

Стимулирующая координация локальных задач проводится с помощью связующих параметров, которые входят в целевую функцию: $Z(X) \rightarrow Z(X, S^{\text{st}})$.

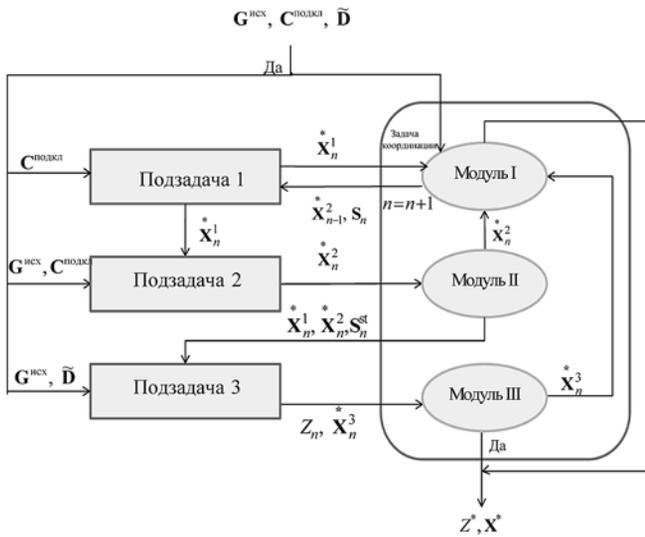


Рис. 3. Схема метода декомпозиции

С учетом векторов S^{lim} , S^{st} задачу ПРЭ можно представить в следующем виде

$$Z(X^*, S) = \min_{X \in D} Z(X, S^{\text{st}}), \tilde{D} = D_X \cap D_U \cap D_Z \cap D_S$$

Схема метода декомпозиции представлена на рис. 3.

3. Алгоритмы решения задачи ПРЭ

Алгоритмы решения подзадач 1 и 2 рассматриваются в части строительства ТП и подключения к ним потребителей на уровне 0,4 кВ. Данные алгоритмы также могут быть применены для решения аналогичных задач строительства РП и подключения к ним потребителей на уровне напряжения 10 кВ.

Подзадача 1.

Алгоритм на основе метода k-средних. Реализует кластеризационный метод *k-средних*, основной идеей которого является задание некоторого начального разбиения новых потребителей на кластеры с последующим изменением кластерных центров

(предполагаемых мест строительства РП/ТП) и перераспределением новых потребителей.

Алгоритм, реализующий метод разделительной кластеризации. В основу алгоритма положен иерархический метод кластеризации, достоинством которого, по сравнению с методом *k-средних*, является отсутствие необходимости задания числа кластеров. Основная идея алгоритма заключается в том, что на первом этапе решения задачи все новые потребители помещаются в один кластер, который в дальнейшем последовательно делится на подкластеры до выполнения условия окончания деления.

Эвристический алгоритм. Суть применяемого в нем подхода — последовательное выделение из множества подключаемых к энергосети новых потребителей групп, включающих в себя максимальное число потребителей, для которых может быть построена РП/ТП.

В качестве оценки эффективности алгоритмов использованы два индикатора: 1) число ТП, строительство которых необходимо выполнить $X_{\text{нов}}^T$; 2) время вычислений t . Эксперименты проводили посредством мультистарта 20 запусков программы.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что среднее время решения задачи \tilde{t} алгоритмами *k-средних* и разделительной кластеризации более чем в 2 раза превышает время решения задачи эвристическим алгоритмом. При этом среднее число построенных ТП $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ при решении задачи эвристическим алгоритмом на 10 % меньше, чем при решении алгоритмом, реализующим метод *k-средних*, и на 20 % меньше, чем при решении задачи алгоритмом разделительной кластеризации (рис. 4, а).

Наилучший результат по индикатору $X_{\text{нов}}^T$ достигнут при решении задачи эвристическим алгоритмом и алгоритмом, реализующим метод *k-средних*. Наихудший результат по тому же индикатору получен при решении задачи алгоритмом, реализующим метод разделительной кластеризации.

Зависимости среднего времени вычислений \tilde{t} и среднего числа построенных объектов $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ от числа подключаемых к энергосети потребителей N приведены на рис. 4, б.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о значительном росте времени вычислений \tilde{t} алгоритма, построенного на основе метода *k-средних*, и алгоритма разделительной кластеризации с увеличением числа подключаемых потребителей. При этом все алгоритмы обеспечивают примерно одинаковые значения первого индикатора — количество построенных ТП $X_{\text{нов}}^T$.

Подзадача 2.

Эвристический алгоритм ограничен перебором. Основной принцип алгоритма — добавлять первый возможный вариант подключения потребителя

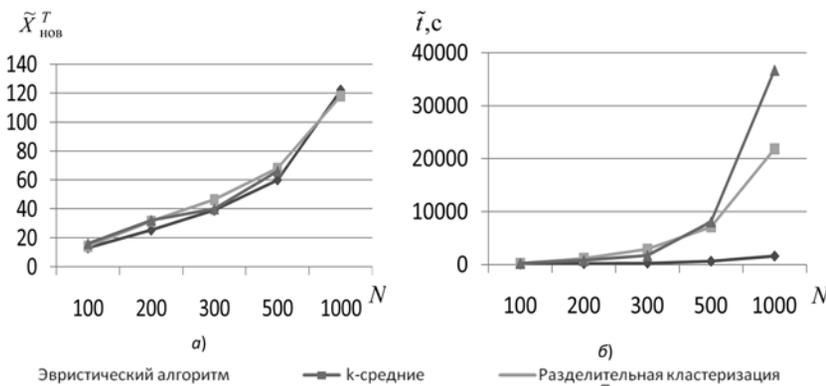


Рис. 4. Зависимость среднего числа построенных объектов $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ (а) и среднего времени вычислений \tilde{t} (б) от числа подключаемых потребителей N

с сортировкой в порядке убывания стоимостей подключения. Данный алгоритм может быть отнесен к классу так называемых "жадных" алгоритмов решения оптимизационных задач.

Генетический алгоритм (ГА). Ставим в соответствие каждому подключаемому потребителю $CL_j^{\text{подкл}}$ один ген хромосомы. Значением гена (аллелью) является номер H_i РП/ТП, к которой будет подключен потребитель $CL_j^{\text{подкл}}$. Длина хромосомы равна числу элементов множества $CL^{\text{подкл}}$.

Алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного. Алгоритм сводится к последовательному построению диаграмм Вороного для всех ТП энергосети с последующими попытками подключения к ним всех потребителей, попавших в область ТП. На последующих этапах построения диаграмм Вороного из рассмотрения исключаются ТП, подключение потребителей к которым не представляется возможным.

Анализ эффективности алгоритмов выполнен на основании двух индикаторов качества — суммарной стоимости построенных КЛ d^{sum} и времени выполнения расчетов t . Эксперименты выполнялись посредством мультистарта 20 запусков программы. Некоторые результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 5.

Анализ результатов вычислений показывает, что лучшие значения по индикатору d^{sum} получены при решении тестовых задач эвристическим алгоритмом ограниченного перебора и алгоритмом, основанном на построении диаграмм Вороного. Решение задачи генетическим алгоритмом в среднем на 12,5 % хуже лучшего значения для тестовой задачи.

При увеличении числа подключаемых потребителей описанные выше тенденции сохраняются.

Подзадача 3.

Решение подзадачи 3 проводится с применением ГА. Для этого каждой новой ТП $T_i^{\text{НОВ}}$ ставятся в соответствие два гена хромосомы: первый ген соответствует ТП/РП, от которой в i -ю ТП производится подача электроэнергии; второй ген — ТП/РП, куда передается электроэнергия от ТП $T_i^{\text{НОВ}}$. Значением гена (аллелью) является номер ТП/РП H_j , к которой будет подключена ТП $T_i^{\text{НОВ}}$. Длина хромосомы равна $2tn$, где tn — число новых ТП.

Выполненные автором вычислительные эксперименты подтвердили возможность применения разработанного алгоритма для решения практически значимых задач.

4. Программный комплекс ELNET

Программный комплекс (ПК) ELNET предназначен для выполнения автоматизированного про-

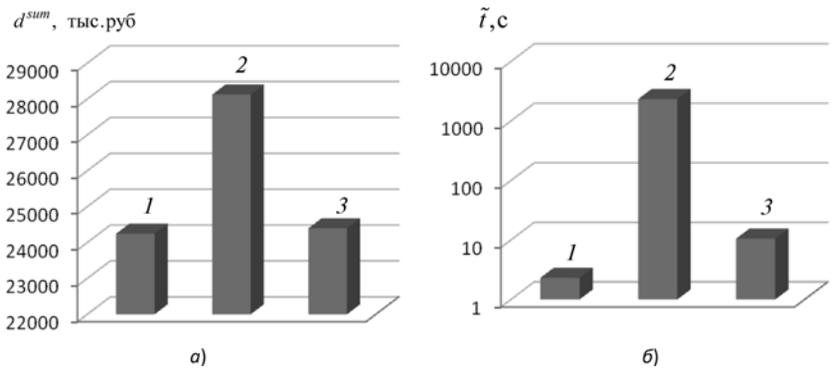


Рис. 5. Сравнительный анализ средней стоимости строительства КЛ \tilde{d}^{sum} (а) и среднего времени выполнения алгоритмов \tilde{t} (б): 1 — эвристический алгоритм; 2 — генетический алгоритм; 3 — алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного

ектирования энергосети с учетом перспектив развития города.

ПК ELNET выполняет следующие функции:

- определение варианта подключения новых потребителей к энергосети;
 - определение числа и мест строительства новых ТП и РП, выбор типа подстанций и их характеристик;
 - определение конфигурации энергосети 10 кВ.
- Основная экранная форма ПК приведена на рис. 6.

ПК ELNET состоит из шести перечисленных ниже модулей.

- **Графический модуль** реализует оконный интерфейс взаимодействия "пользователь — система". Модуль также отвечает за визуализацию схемы энергосети.
- **Модуль управления (диспетчер)** предназначен для организации взаимодействия всех модулей системы между собой.
- **Модуль ввода/вывода данных** выполняет функции считывания и временного хранения сведений об энергосети.

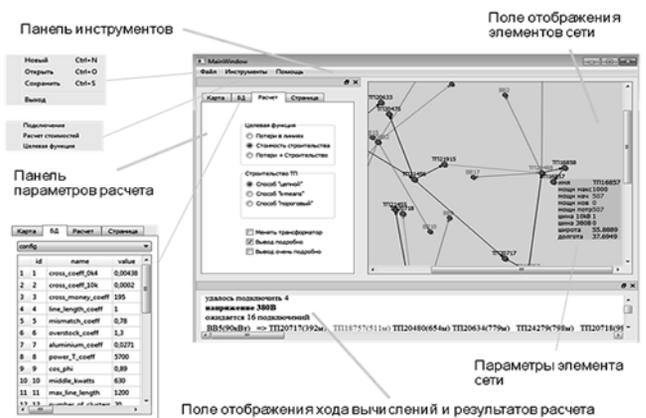


Рис. 6. Графический интерфейс ПК ELNET

- *Модуль решений подзадач* — это основной вычислительный модуль ПК ELNET, реализующий методы и алгоритмы решения задачи ПРЭ.
- *Модуль расчета параметров энергосети* предназначен для расчета параметров энергосети, проверки условий выполнения ограничений, расчета значений критериев оптимальности и т. п.
- *База справочных данных* содержит сведения, необходимые для расчета режимов энергосетей, а также параметры методов и алгоритмов решения.

5. Расчет перспективного развития энергосети района мегаполиса

Для оценки работоспособности и эффективности разработанных моделей, методов, алгоритмов и их программных реализаций автором поставлена и решена задача ПРЭ района города площадью около 27 км² и населением ~420 000 жителей. Существующая энергосеть района состоит из 393 ТП и 47 РП. Предполагается подключение к энергосети 1719 новых потребителей суммарной мощностью более 47 тыс. кВт, 93 из которых — на уровне напряжения 10 кВ; 1626 — на уровне напряжения 0,4 кВ. Предполагается наличие 2000 мест возможного строительства новых ТП/РП.

При решении задачи учитывались следующие ограничения: отсутствие перегрузки ТП и РП; отсутствие перегрузки КЛ; однонаправленность КЛ; наличие свободных мест присоединения в ТП и РП; длина КЛ менее максимально допустимого значения.

Рассмотрены пять следующих экономических критериев:

- стоимость подключения новых потребителей к энергосети;
- стоимость подключения новой ТП к энергосети;
- стоимость строительства новых ТП и РП;
- потери электрической энергии в КЛ 0,4 и 10 кВ, проложенных от ТП до новых потребителей;
- потери электрической энергии в трансформаторах.

Решение задачи ПРЭ проведено методами редукции и декомпозиции. На рис. 7 приведены некоторые результаты выполненных расчетов.

Минимальное значение целевой функции достигнуто при решении задачи методом редукции.

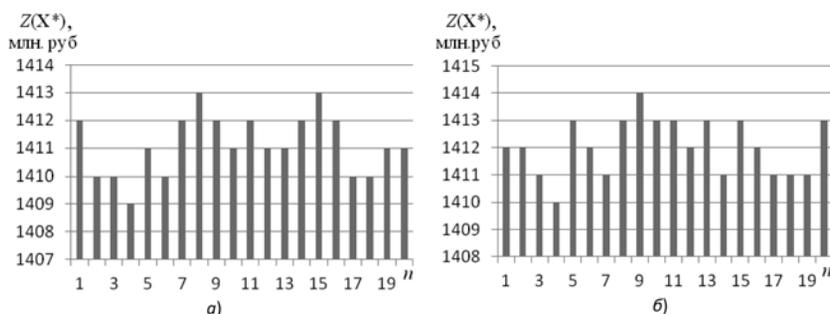


Рис. 7. Результаты решения задачи методами редукции (а) и декомпозиции (б)

При этом методом декомпозиции достигались значения целевой функции, близкие к минимальному. Среднее время решения задачи за одну итерацию равно 459 с для метода редукции и 875 с для метода декомпозиции.

Из результатов решения следует, что для обеспечения электроэнергией всех подключаемых к энергосети потребителей требуется построить 128 ТП и 3 РП, проложить 19 453 м КЛ. Анализ полученных данных показал, что оба метода позволяют находить допустимые варианты решения задачи ПРЭ за приемлемое время.

Заключение

В работе представлены разработанные автором модели, методы и алгоритмы, позволяющие выполнять решение всего комплекса вопросов, входящих в состав задачи ПРЭ. Предложенные технические решения позволяют учитывать ограничения на местности, проводить расчеты с учетом различных произвольных составов критериев оптимальности и ограничений, а также все значительные особенности решения задачи ПРЭ.

В работе также приведено описание разработанного на основании предложенных технических решений программного комплекса автоматизированного решения задачи ПРЭ ELNET.

Описанные в работе результаты экспериментов, выполненных в ПК ELNET, показали эффективность предложенных моделей, методов и алгоритмов и возможность их применения для решения практически значимых задач.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д-ру физ.-мат. наук, профессору А. П. Карпенко за существенный вклад в постановку и решение задачи исследования, а также всестороннюю поддержку и внимание к работе.

Список литературы

1. **Справочник** по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Издательство НЦЭНАО, 2006. 349 с.
2. **Пообъектная** информация по заключенным МКС — филиалом ОАО "МОЭСК" договорам технологического присоединения в г. Москве за 2014 г. URL: http://www.moesk.ru/client/raskritie_informacii/zayavki/#tab-ras_inf_2014-link.
3. **Ананicheva С. С., Калинин М. А.** Практические задачи электрических сетей: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. 112 с.
4. **Веников В. А.** Электрические системы. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.
5. **Дале В. А., Кришан З. П., Паэтле О. Г.** Динамическая оптимизация развития электрических сетей. Рига: Зинатне, 1990. 248 с.
6. **Miguez E., Cidras J., Diaz-Dorado E., Garcia-Dornelas J. L.** An improve branch exchange algorithm for large scale distribution network planning // IEEE Trans. Power Syst., 2002. Vol. 17, N. 4. P. 931—936.
7. **Свеженцева О. В.** Эвристические алгоритмы закрепления множества потребителей за источниками питания // Труды Всероссийской на-

учно-практической конференции "Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири". Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. С. 397—402.

8. **Ramirez-Rosado I. J., Dominguez-Navarro J. A.** New multi objective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of distribution systems // *IEEE Trans. Power Systems*. 2006. Vol. 21, N. 1. P. 224—233.

9. **Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E.** Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies // *IEEE Trans. Power Syst.* 2003. Vol. 18, N. 4. P. 1594—1600.

10. **Свеженцева О. В., Воропай Н. И.** Оптимизация размещения источников питания при формировании рациональной конфигурации системы электроснабжения // *Электричество*. 2012. № 10. С. 7—14.

11. **Булатов Б. Г.** САПР и модели оптимального развития энергосистем: конспект лекций. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 69 с.

12. **Радкевич В. Н.** Проектирование систем энергоснабжения: учеб. пособие. Минск: НПО "ПИОН", 2001. 292 с.

13. **Маньков В. Д.** Основы проектирования систем энергоснабжения: справочное пособие. СПб.: НОУ ДПО "УМИТЦ "ЭлектроСервис", 2010. 664 с.

14. **Свеженцева О. В.** Методы и алгоритмы обоснования рациональной конфигурации систем электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, НИИГТУ, 2012.

15. **Киселев А. Н.** Технико-экономический анализ городских распределительных электрических сетей с учетом их развития: дис. ... канд. техн. наук. М., МЭИ, 2002.

16. **Фадеева Г. А., Федин В. Т.** Проектирование распределительных электрических сетей. Минск: Высшая школа, 2009. 368 с.

17. **Карпенко А. П., Кузьмина И. А.** Математическая модель распределительной городской сети энергоснабжения с учетом ее перспективного развития // *Наука и образование*. 2014. № 5. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>.

I. A. Kuzmina, Assistant, kuzminainna@yandex.ru,
Moscow State Technical University named after the Bauman

The Optimal Struct of Urban Distributing Power Network Development with Long-Term City Future Development

In this paper the author made models, methods and algorithms for optimal struct of urban distributing power network development with long term city future development problem solution are given.

In this work, the urban distributing power network model is a directed graph. The model is expandable and includes all power network elements (transformer substation, distribution substation, cable line, power consumers) parameters needed for solving the problem.

The optimal struct of urban distributing power network development with long-term city future development problem state like deterministic, multivariable, multicriterial optimization task. Two methods of solving posed problem — decomposition method and reduction method — are given. Both of this methods, propose splitting the problem into three tasks. Author made algorithms of solving this tasks based on clustering methods, heuristic algorithm, genetic algorithm, Voronoy diagram etc.

Software system ELNET, which realize this models, methods and algorithms also presented.

Some results of made distributing power network development calculations provided. This calculations analysis showed, that author made models, methods, algorithms and software system may effectively used for optimal struct of urban distributing power network development with long-term city future development problem solution.

Keywords: urban distributing power network, long-term power network development, urban power network model, optimization, decomposition, reduction, clustering, heuristic algorithm, genetic algorithm, Voronoy diagram

References

1. **Spravochnik** po proektirovaniyu jelektricheskikh setej, Ed. D. L. Fajbisovich. Ed. 2. Moscow, Izdatel'stvo NCJeNAO, 2006, 349 p. (in Russian).

2. **Poob#ektnaja** informacija po zakljuchennym MKS — filialom OAO "MOJeSK" dogovorom tehnologicheskogo prisoedinenija v c Moskve za 2014 g. URL: http://www.moesk.ru/client/raskritie_informacii/zayavki/#tab-ras_inf_2014-link (in Russian).

3. **Ananicheva S. S., Kalinkina M. A.** Prakticheskie zadachi jelektricheskikh setej: Uc. pos. Ekaterinburg, UrFU, 2012, 112 p. (in Russian).

4. **Venikov V. A.** Jelektricheskie sistemy. Jelektricheskie seti. Moscow, Vysshaja shkola, 1998. 511 p. (in Russian).

5. **Dale V. A., Krishan Z. P., Pajetle O. G.** Dinamicheskaja optimizacija razvitiya jelektricheskikh setej. Riga: Zinatne, 1990, 248 p. (in Russian).

6. **Miguez E., Cidras J., Diaz-Dorado E., Garcia-Dornelas J. L.** An improve branch exchange algorithm for large scale distribution network planning. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2002, vol. 17, no. 4, pp. 931—936.

7. **Svezhenцева O. V.** Jevristicheskie algoritmy zakreplenija mnozhestva potrebitelej za istochnikami pitanija. *Vseross. nauch.-prakt. konf. "Povyshenie jeffektivnosti proizvodstva i ispol'zovanija jenerгии v uslovijah Sibiri"*, Irkutsk, IrGTU, 2009, pp. 397—402.

8. **Ramirez-Rosado I. J., Dominguez-Navarro J. A.** New multi objective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of distri-

bution systems, *IEEE Trans. Power Systems*, 2006, vol. 21, no. 1, pp. 224—233.

9. **Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E.** Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2003, vol. 18, no. 4, pp. 1594—1600.

10. **Svezhenцева O. V., Voropaj N. I.** Optimizacija razmeshhenija istochnikov pitanija pri formirovanii racional'noj konfiguracii sistemy jelectrosnabzhenija, *Jelektrichestvo*, 2012, no. 10, pp. 7—14 (in Russian).

11. **Bulatov B. G.** *SAPR i modeli optimal'nogo razvitiya jenergosistem, konspekt lekcij*, Cheljabinsk, JuUrGU, 2005, 69 p. (in Russian).

12. **Radkevich V. N.** *Proektirovanie sistem jenergosnabzhenija, uchebnoe posobie*, Minsk, NPOOO "PION", 2001, 292 p. (in Russian).

13. **Man'kov V. D.** *Osnovy proektirovanija sistem jenergosnabzhenija, spravochnoe posobie*, Saint Petersburg, NOU DPO "UMITC "Jelektro Servis", 2010, 664 p. (in Russian).

14. **Svezhenцева O. V.** *Metody i algoritmy obosnovanija racional'noj konfiguracii sistem jelektricheskikh setej*, dis. ... kand. teh. nauk, Irkutsk, NIIGTU, 2012 (in Russian).

15. **Kiselev A. N.** *Tehniko-jekonomicheskij analiz gorodskih raspredelitel'nyh jelektricheskikh setej s uchetom ih razvitiya*, dis. ... kand. teh. nauk, Moscow, MJeI, 2002 (in Russian).

16. **Fadeeva G. A., Fedin V. T.** *Proektirovanie raspredelitel'nyh jelektricheskikh setej*, Minsk, Vysshaja shkola, 2009, 368 p. (in Russian).

17. **Karpenko A. P., Kuz'mina I. A.** Математическая модель распределительной городской сети энергоснабжения с учетом ее перспективного развития, *Наука и образование*, 2014, no. 5, URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>.

УДК 004.41

В. Н. Гридин¹, д-р техн. наук, проф., директор, **Г. Д. Дмитриевич**², д-р техн. наук, проф.,
Д. А. Анисимов², канд. техн. наук, мл. науч. сотр.

¹ Центр информационных технологий в проектировании РАН,
г. Одинцово, Московская обл., e-mail: info@ditc.ras.ru

² Санкт-Петербургский электротехнический университет

Методика построения веб-сервисов для расчета чувствительности передаточных функций к вариации параметров

Рассматриваются вопросы построения веб-сервисов для расчета чувствительности передаточных функций к вариации параметров. Приводится методика расчета векторной чувствительности передаточных функций к выбранному варьируемому параметру и скалярной чувствительности передаточных функций по отношению ко всем возможным варьируемым параметрам. Предлагается структура программного обеспечения, основанная на компактной обработке разреженных матриц с использованием сжатия данных, что обеспечивает высокое быстродействие выполнения вычислительных операций, имеющее большое значение при функционировании распределенной системы в сети Интернет.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, веб-технологии, веб-сервисы, сервис-ориентированная архитектура, распределенные системы

Введение

Важнейшим этапом проектирования электронной аппаратуры является расчет чувствительности их основных характеристик к вариации параметров компонентов. К таким характеристикам относятся, прежде всего, передаточные функции электронных схем в частотной области. Известные алгоритмы решения этой задачи позволяют выполнить расчет как векторной чувствительности передаточных функций к выбранному варьируемому параметру, так и расчет скалярной чувствительности передаточных функций по отношению ко всем возможным варьируемым параметрам для выбранного единственного значения переменной [1, 2]. Однако практическая программная реализация этих методов при решении задач большой размерности оказывается недостаточно эффективной в связи со значительными затратами вычислительных ресурсов и большим временем, которое занимает процесс решения описания с сильно разреженными матрицами. Поскольку адаптация существующих систем автоматизации схемотехнического проектирования к новым задачам повышенной размерности оказывается практически невозможной вследствие отсутствия соответствующей документации, то актуальной является задача дальнейшего совершенствования и создания новых высокопроизводительных систем, в основу которых положены более эффек-

тивные алгоритмы и методы построения программного обеспечения. К таким методам относятся, прежде всего, методы, основанные на компактной обработке разреженных матриц, входящих в математическое описание проектируемых схем.

В настоящее время широкое внедрение в системы автоматизированного проектирования интернет-технологий, позволяющих обеспечить доступ к информационным ресурсам удаленных баз данных и организацию дистанционного взаимодействия распределенных коллективов пользователей САПР, является общепризнанным требованием [3, 4]. Одним из направлений реализации таких технологий является построение систем автоматизированного проектирования на основе веб-сервисов, позволяющих приложениям взаимодействовать друг с другом независимо от платформы, на которой они развернуты, а также от языка программирования [5, 6].

Существенным достоинством технологии веб-сервисов является возможность их постоянной модификации и расширения путем добавления новых, более продуктивных методов. Интеграция на базе веб-сервисов при разработке децентрализованных САПР позволяет перейти к описанию интерфейсов и взаимодействий на базе XML, обеспечивая возможность модификации и развития построенного программного обеспечения в условиях сохранения выбранного интерфейса. Это позволяет ввиду сла-

босвязанности отдельных подсистем обеспечивать взаимодействие между веб-сервисами и клиентскими приложениями на произвольной платформе и проводить адаптацию существующих приложений к меняющимся условиям проектирования. Основная нагрузка по выполнению вычислительных операций при такой архитектуре ложится на веб-сервисы, решающие все задачи моделирования проектируемых систем, на клиентские приложения возлагаются только простейшие функции подготовки данных и отображения результатов моделирования.

Учитывая актуальность задачи проектирования электронной аппаратуры в условиях внешних воздействий, необходимо включать в распределенные сервис-ориентированные системы автоматизации схемотехнического проектирования веб-сервисы для расчета чувствительности передаточных функций к вариации параметров компонентов электронных схем. При этом такие веб-сервисы должны содержать как базирующиеся на дифференцировании уравнений методы расчета векторной чувствительности передаточных функций к выбранному варьируемому параметру, так и основанные на присоединенной схеме методы расчета скалярной чувствительности передаточных функций по отношению ко всем возможным варьируемым параметрам для выбранного единственного значения переменной.

Целью работы является создание методики построения веб-сервисов, обеспечивающих расчет как векторной, так и скалярной чувствительности передаточных функций электронных схем к вариации параметров компонентов. В качестве варьируемых параметров могут выступать значения сопротивления, емкости или индуктивности произвольного двухполюсника схемы типа R , C или L , и параметры передач управляемых частотно-зависимых источников типа ИТУН (источники тока, управляемые напряжением), ИНУН (источники напряжения, управляемые напряжением), ИТУТ (источники тока, управляемые током) или ИНУТ (источники напряжения, управляемые током).

Основной задачей при построении программного обеспечения веб-сервиса является реализация компактной обработки разреженных матриц на основе сжатия данных, что обеспечивает высокое быстродействие выполнения вычислительных операций, имеющее большое значение для работы распределенной системы в сети Интернет. Технология сжатия данных основана на использовании двух этапов процедуры расчета — символьном и численном. На символьном этапе строится и обрабатывается "портрет" моделируемой схемы и определяется формат всех компактных массивов с учетом появления новых ненулевых элементов в процессе LU -факторизации, а на численном этапе выполняется расчет моделируемой схемы в уточненном формате.

Построение метода веб-сервиса на основе дифференцирования уравнений

Пусть имеется передаточная функция $T = x_k/s_l$, x_k — потенциальная или токовая переменная; s_l — значение задающего источника напряжения или тока. Чувствительность передаточной функции T к вариации параметра w , в качестве которого могут выступать значения сопротивления, емкости или индуктивности некоторого двухполюсника схемы типа R , C или L , а также параметры передачи γ , μ , β , γ управляемых источников ИТУН, ИНУН, ИТУТ, ИНУТ, определяется следующими выражениями:

$$D_w^T = \frac{\partial T}{\partial w} \text{ — абсолютная чувствительность;}$$

$$S_w^T = \frac{\partial T}{\partial w} \frac{w}{T} = D_w^T \frac{w}{T} \text{ — относительная чувствительность;}$$

$$U_w^T = \frac{\partial T}{\partial w} w = D_w^T w \text{ — полуотносительная чувствительность.}$$

Для расчета абсолютной чувствительности методом дифференцирования уравнений следует выполнить дифференцирование уравнения схемы $WX + S = 0$ по параметру w , что приводит к уравнению чувствительности

$$W\bar{X} + \bar{S} = 0, \quad (1)$$

$$\text{где } \bar{X} = \frac{\partial X}{\partial w}; \bar{S} = \frac{\partial W}{\partial w} X.$$

Если принять что $s_l = 1$, то $T = x_k$, и, следовательно, составляющие вектора \bar{X} будут определять составляющие вектора абсолютной чувствительности D_w^T .

Для практической реализации метода необходимо выполнить дифференцирование по параметру w уравнения компонента:

$$p_i = wf(j\omega)q_j + s_j, \text{ где } f(j\omega) = j\omega \text{ для } w = C \text{ и } w = L,$$

$$f(j\omega) = \frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T_2} \text{ для управляемого источника.}$$

В результате получим

$$\bar{p}_i = wf(j\omega)\bar{q}_j + \bar{s}_i, \text{ где } \bar{p}_i = \frac{\partial p_i}{\partial w}, \bar{q}_j = \frac{\partial q_j}{\partial w}, \bar{s}_i = q_j.$$

Отсюда следует, что составляющие \bar{s}_i вектора \bar{S} могут быть найдены по значениям переменных q_j схемы.

Блок-схема для расчета чувствительности передаточных функций на основе дифференцирования уравнений может быть построена в виде, приведенном на рис. 1.

Для обеспечения гарантированного функционирования клиентских и серверных приложений в гетерогенных средах в веб-сервисе не используется

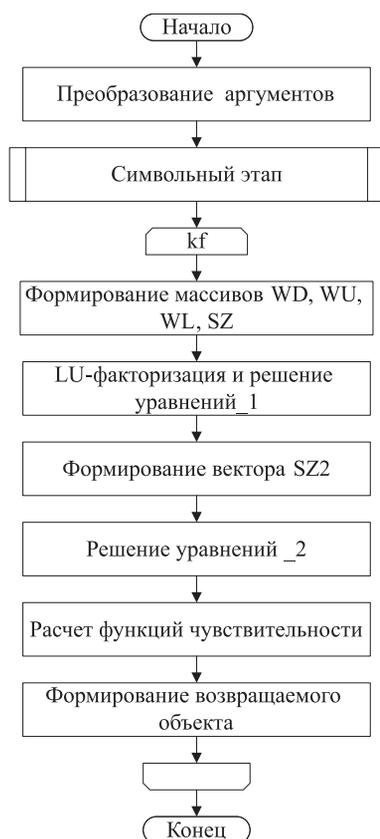


Рис. 1. Блок-схема для расчета на основе дифференцирования уравнений

передача информации через многомерные массивы. Поэтому если в описании компонентов какого-либо вида используется двумерный массив некоторого типа T с именем arr_comp , число строк которого (число компонентов данного вида) имеет значение $ncomp$, а число столбцов массива имеет значение $ncol$, т. е. $T\ arr_comp = new\ T[ncomp + 1, ncol]$, где строка с нулевым индексом не используется, то такой массив в клиентском приложении упаковывается по столбцам в одномерный массив с именем Arr_comp , т. е. $T\ Arr_comp = new\ T[(ncol-1)*ncomp + 1]$, при этом элемент с нулевым индексом не используется.

Аналогичным образом в методах веб-сервиса упаковываются многомерные массивы, в которых отображаются результаты их работы.

Заголовок метода веб-сервиса имеет вид

```

float[] getCalcV(int[] In_r, float[] z_r, int nr, int[]
In_c, float[] z_c, int nc, int[] In_l, float[] z_l, int nl, int[]
In_ju, float[] Z_ju, int nju, int[] In_eu, float[] Z_eu, int
neu, int[] In_ji, float[] Z_ji, int nji, int[] In_ei, float[]
Z_ei, int nei, int[] In_tr, float[] Z_tr, int ntr, int[] In_tri,
float[] z_tri, int ntri, int[] In_ou, int noui, int[] In_tb,
float[] Z_tb, int ntb, int[] In_tu, float[] Z_tu, int ntu,
int[] In_ou, float[] Z_ou, int nou, int nv, int lp, int lm,
String ts, String tv, int kv, float[] f, int nf)
  
```

В начале списка аргументов определяются все аргументы, задающие описание компонентов мо-

делируемой схемы и ее размерность. Последние семь аргументов передают директивы расчета, при этом аргументы lp и lm определяют узлы подключения задающего единичного источника s_p , аргумент ts определяет тип задающего единичного источника s_j ($ts = e$ для источника напряжения и $ts = j$ для источника тока), аргумент tv определяет тип варьируемого параметра ($tv = R, C, L, JU, EU, JI$ или EL), аргумент kv определяет номер варьируемого компонента, аргумент f — массив частот и аргумент pf — число частотных точек.

В первом блоке приведенной блок-схемы выполняется обратное преобразование всех одномерных массивов, имя которых начинается с прописного символа, в двумерные массивы. Далее выполняется символьный этап двухэтапной процедуры расчета [7, 8], в котором формируются элементы индексной матрицы C , элементы которой определяют наличие или отсутствие соответствующего элемента в полном описании.

После выполнения символьного этапа становится известен формат численных массивов, что позволяет сформировать объекты WD, WU, WL, SZ, X , которые будут использоваться для расчета вектора переменных X , необходимого для возможности применения уравнения чувствительности (1). Здесь также создается объект $SZ2$, в котором будут формироваться вектор источников \bar{S} уравнения чувствительности и объект $X2$, составляющие которого будут определять комплексные значения абсолютной чувствительности D_w^T передаточных функций схемы.

Дальнейшее функционирование блок-схемы осуществляется в частотном цикле, где вначале обнуляются все численные массивы, а затем проводится формирование массивов WD, WU, WL, SZ . Следующим шагом является численная LU -факторизация, которая выполняется виртуально на основании описания схемы в компактных массивах WD, WU, WL , и решение уравнений, результаты которого отображаются в массиве X . Далее выполняется формирование массива $SZ2$ и повторный расчет переменных, его результаты заносятся в массив, составляющие которого определяют комплексные значения абсолютной чувствительности D_w^T для передаточных функций схемы. Здесь также выполняется расчет относительной чувствительности S_w^T и полуотносительной чувствительности U_w^T , а также определяются относительная модульная и полуотносительная фазовая чувствительности схемы.

Результатом работы метода будут значения относительной модульной и полуотносительной фазовой чувствительностей, а также вещественная и мнимая части абсолютной чувствительности всех узлов для всех частот.

Эффективность метода сжатия данных на основе строчно-столбцового фиксированного формата

может быть определена выражением $\beta = \frac{M}{M_1}$, где

M — объем памяти, занимаемой при обработке полной разреженной матрицы; M_1 — объем памяти, занимаемой при обработке компактных массивов. Учитывая структуру используемых массивов, нетрудно убедиться, что эффективность метода определяется выражением

$$\beta = \frac{8n^2}{n^2\alpha 9 + n} \cong \frac{8}{9\alpha} = \frac{1}{1,1\alpha},$$

где $\alpha = m/n^2$ — коэффициент разреженности, определяемый отношением числа ненулевых элементов m к общему числу элементов полной матрицы.

Так, например, если $\alpha = 0,2$, что характерно для больших слабосвязанных схем, то эффективность метода сжатия данных составляет $\beta = 4,5$.

Построение метода веб-сервиса на основе присоединенной схемы

В настоящем разделе рассматривается реализация расширения веб-сервиса методом, основанном на использовании присоединенных схем. Целесообразность включения в веб-сервис такого метода объясняется тем, что основанный на дифференцировании уравнений метод getCalcV предоставляет возможность рассчитать только чувствительность передаточных отношений к вариации единственного параметра, который передан методу в качестве аргумента. Вместе с тем часто требуется, чтобы при выполнении расчета одновременно определялись все функции чувствительности некоторой переменной к вариации всех параметров. Такую возможность предоставляет способ расчета функций чувствительности, основанный на применении присоединенной схемы [1, 2].

Переход от основной схемы к присоединенной схеме иллюстрируется рис. 2.

Абсолютная чувствительность передаточной функции к вариации произвольного параметра w определяется выражением [1]

$$D_w^T = (X^{\Pi})^T \frac{\partial W}{\partial w} X, \quad (2)$$

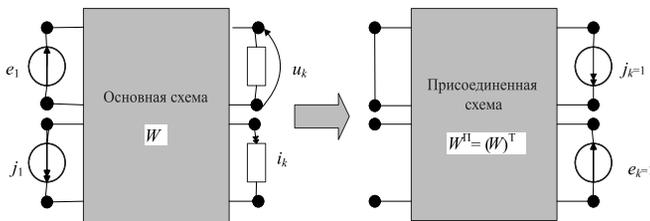


Рис. 2. Переход к присоединенной схеме

где $(X^{\Pi})^T$ — транспонированный вектор базисных переменных присоединенной схемы; X — вектор базисных переменных основной схемы.

Для управляемого источника, все полюса которого относятся к u -группе и управляющая переменная q_w подключена между узлами x_k и x_l , а управляемый источник p_w — между узлами x_i и x_j , можно записать уравнение общего вида

$$p_w = wq_w f(j\omega),$$

где $f(j\omega) = 1$ для двухполюсников типа R ; $f(j\omega) = j\omega$ для двухполюсников типа C и L ; $f(j\omega) = (1 + j\omega T_1)/(1 + j\omega T_2)$ для частотно-зависимых управляемых источников.

Поскольку $p_w = x_i - x_j$, $q_w = x_k - x_l$, то в наиболее общем случае варьируемый параметр w может быть расположен в матрице основной схемы W на пересечении k -го, l -го столбца и i -й, j -й строк.

Учитывая такую структуру матрицы W на основании соотношения (2) можно записать скалярное выражение для абсолютной чувствительности передаточной функции T к изменению параметра w управляемого источника в следующем виде:

$$D_w^T = (x_i^{\Pi} - x_j^{\Pi})(x_k - x_l)f(j\omega), \quad (3)$$

где x_i^{Π} , x_j^{Π} и x_k , x_l — составляющие векторов X^{Π} и X соответственно.

Для двухполюсника, входящего в группу u -полюсов, имеем $i = k$, $j = l$, и, следовательно, выражение (3) записывается в таком виде:

$$D_w^T = (x_k^{\Pi} - x_l^{\Pi})(x_k - x_l)f(j\omega), \quad (4)$$

где x_k^{Π} , x_l^{Π} и x_k , x_l — составляющие векторов X^{Π} и X соответственно.

Нетрудно убедиться, что выражение (3) справедливо также для управляемых источников любого другого типа с произвольным распределением полюсов между группами u и z , а выражение (4) — для двухполюсников, входящих в группу z -полюсов. Отсюда следует, что для расчета значений чувствительности выбранной передаточной функции к вариации параметров w всех компонентов достаточно определить соответствующие базисные переменные исходной схемы и присоединенной схемы. При этом матрица присоединенной схемы определяется простым транспонированием матрицы основной схемы.

Таким образом, блок-схема для расчета значений чувствительности передаточной функции к изменению параметров w всех компонентов на основе метода присоединенных схем может быть построена в виде, приведенном на рис. 3.

Заголовок метода веб-сервиса имеет вид

```
float[] getCalcV2(int[] In_r, float[] z_r, int nr, int[] In_c, float[] z_c, int nc, int[] In_l, float[] z_l, int nl,
```

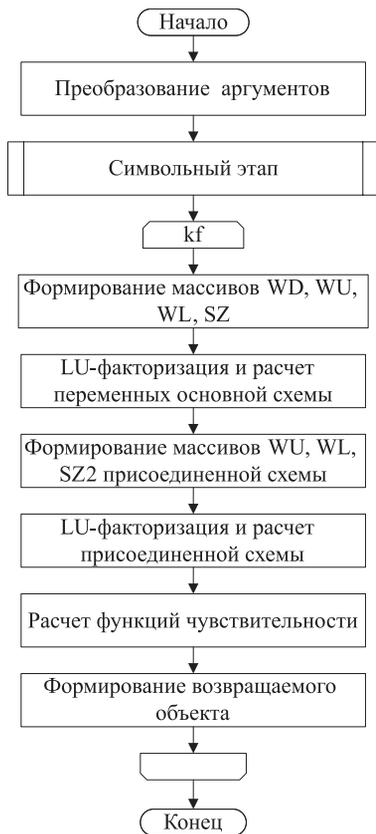


Рис. 3. Блок-схема для расчета чувствительности на основе присоединенной схемы

int[] In_ju, float[] Z_ju, int nju, int[] In_eu, float[] Z_eu, int neu, int[] In_ji, float[] Z_ji, int nji, int[] In_ei, float[] Z_ei, int nei, int[] In_tr, float[] Z_tr, int ntr, int[] In_tri, float[] z_tri, int ntri, int[] In_oui, int noui, int[] In_tb, float[] Z_tb, int ntb, int[] In_tu, float[] Z_tu, int ntu, int[] In_ou, float[] Z_ou, int nou, int nv, int lp, int lm, int kp, int km, String ts, float[] f, int nf)

Описание аргументов осуществляется аналогично описанию, рассмотренному в предыдущем разделе, за исключением того, что в директивах расчета задаются выходные узлы kp , km и отсутствует аргумент tv , определяющий тип варьируемого параметра, и аргумент kv , определяющий номер варьируемого компонента, поскольку при вызове метода `getCalcV2` рассчитываются функции чувствительности для всех компонентов. Реализация блока преобразования аргументов совпадает с процедурой, описанной в предыдущем разделе.

После создания требуемых объектов осуществляется переход к символьному этапу расчета. После выполнения символьного этапа на основании формата численных массивов формируются объекты WD , WU , WL , SZ , X , которые будут использоваться для расчета вектора переменных X основной схемы и расчета присоединенной схемы. Поскольку информация, содержащаяся в массивах WU , WL , будет использоваться как для основной, так и для при-

соединенной схем, необходимо скопировать массивы WU и WL в рабочие массивы (например, $WU1$ и $WL1$) и при выполнении LU -факторизации для основной схемы использовать массивы $WU1$ и $WL1$.

При расчете вектора переменных X основной схемы используется массив SZ , который формируется на основании значений переданных аргументов $ts = e_l$ или $ts = j_l$ и описания соответствующих задающих источников основной схемы. Формирование массивов $WU1$ и $WL1$ присоединенной схемы осуществляется простым копированием массива WL в массив $WU1$ и массива WU в массив $WL1$, что реализует в виртуальной форме требуемое транспонирование исходной матрицы. Далее выполняется LU -факторизация для присоединенной схемы и формирование ее задающего вектора, что позволяет выполнить расчет вектора переменных присоединенной схемы.

Расчет значений чувствительности выполняется на основании приведенных выше выражений для абсолютной, относительной и полурасчетной чувствительностей схемы для заданной комплексной схемной функции T .

Метод возвращает упакованный массив значений относительной модульной и полурасчетной фазовой чувствительностей, а также вещественную и мнимую части абсолютной чувствительности выбранной передаточной функции для всех варьируемых параметров компонентов схемы и для всех частотных точек.

Поскольку в блок-схеме программной реализации на основе присоединенной схемы используется тот же способ сжатия данных, что и в блок-схеме на основе дифференцирования уравнений, то оценка эффективности рассматриваемого подхода совпадает с результатами, приведенными в предыдущем разделе.

Заключение

Отличительной особенностью разработанной методики построения веб-сервиса для расчета чувствительности частотных характеристик передаточных функций в распределенных системах автоматизированного проектирования является реализация компактной обработки разреженных матриц на основе сжатия данных, что обеспечивает высокое быстродействие выполнения вычислительных операций, имеющее большое значение для работы распределенной системы в сети Интернет. Методика позволяет построить программное обеспечение веб-сервиса, включающего в себя метод, базирующийся на дифференцировании уравнений, и метод, использующий присоединенные схемы.

С помощью метода веб-сервиса, основанного на дифференцировании уравнений, выполняется расчет абсолютной и относительной векторной чувствительностей передаточных функций в частотной области к выбранному варьируемому параметру для

всей совокупности базисных переменных. В качестве варьируемых параметров могут выступать значения сопротивления, емкости или индуктивности произвольного двухполюсника схемы типа R , C или L и параметры передач управляемых частотно-зависимых источников типа ИТУН, ИНУН, ИТУТ или ИНУТ.

Метод веб-сервиса с использованием присоединенных схем позволяет рассчитать значения как абсолютной, так и относительной скалярной чувствительности передаточных функций в частотной области по отношению ко всем возможным варьируемым параметрам для выбранного значения анализируемой переменной. Предлагаемая блок-схема программного обеспечения позволяет воспользоваться результатами формирования компактных массивов основной схемы для расчета присоединенной схемы.

Практическая реализация результатов работы дает возможность существенно повысить производительность веб-сервисов и обеспечивает повышение надежности функционирования распределенной системы вследствие уменьшения времени взаимодействия с сервером в процессе эксплуатации САПР.

Работа выполнена по Программе 2 ОНИТ РАН "Научные основы создания гетерогенных телекоммуникационных и локационных систем и их элементной

базы" и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 15-07-0119 а.

Список литературы

1. **Влах И., Сингхал К.** Машинные методы анализа и проектирования электронных схем: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1988. 560 с.
2. **Анисимов В. И., Дмитриевич Г. Д., Ежов С. Н.** и др. Автоматизация схемотехнического проектирования на мини-ЭВМ. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. 198 с.
3. **Анисимов В. И., Гридин В. Н.** Методы построения систем автоматизированного проектирования на основе Интернет-технологий и компактной обработки разреженных матриц // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 1. С. 3—7.
4. **Коваленко О. С., Курейчик В. М.** Обзор проблем и состояний облачных вычислений и серверов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7. С. 146—153.
5. **Анисимов Д. А., Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д.** Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-сервисов // Автоматизация в промышленности. 2011. № 1. С. 9—11.
6. **Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А.** Построение систем автоматизированного проектирования на основе Web-технологий // Информационные технологии. 2011. № 5. С. 23—26.
7. **Гридин В. Н., Дмитриевич Г. Д., Анисимов Д. А.** Построение веб-сервисов систем автоматизации схемотехнического проектирования // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 4. С. 79—84.
8. **Анисимов Д. А.** Методы построения систем автоматизации схемотехнического проектирования на основе веб-сервисов // Известия СПбГЭТУ. 2012. № 1. С. 56—61.

V. N. Gridin, Professor, Director, Center for Information Technology
in the Design of the RAS, e-mail: gddm@inbox.ru,

G. D. Dmitrevich, Professor, **D. A. Anisimov**, Junior Researcher, Petersburg Electrotechnical University

A Method for Constructing Web Services to Calculate the Sensitivity Transfer Functions to the Variation of Parameters

Questions of construction of web services to calculate the sensitivity transfer functions to the variation of parameters in distributed systems, computer-aided design. The technique of calculating the sensitivity vector transfer functions to the selected variable parameters and scalar sensitivity transfer functions with respect to all possible variable parameters. We consider the structure of the software, based on the compact processing of sparse matrices using data compression, which provides high performance computing activities, which is of great importance to the work of a distributed system when working on the Internet.

Keywords: computer-aided design, web technology, web services, service-oriented architecture, distributed systems

References

1. **Vlakh I., Singhal K.** *Mashinnye metody analiza i proektirovaniya elektronnykh skhem*, per. s angl. Moscow, Radio i svyaz, 1988, 560 p. (in Russian).
2. **Anisimov V. I., Dmitrevich G. D., Ezhov S. N.** et al. *Avtomatizatsiya skhemotekhnicheskogo proektirovaniya na mini-EVM*. Leningrad, Izd-vo Leningr. un-ta, 1983, 198 p. (in Russian).
3. **Anisimov V. I., Gridin V. N.** Metody postroeniya sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya na osnove Internet-tekhnologii i kompaktnoi obrabotki razrezhennykh matrits. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve*, 2009. no. 1, pp. 3—7 (in Russian).
4. **Kovalenko O. S., Kureichik V. M.** Obzor problem i sostoyanii oblachnykh vychislenii i serverov. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki.*, 2012, no. 7, pp. 146—153 (in Russian).
5. **Anisimov D. A., Gridin V. N., Dmitrevich G. D.** Postroenie sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya na osnove Web-servisov. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2011. no. 1, pp. 9—11 (in Russian).
6. **Gridin V. N., Dmitrevich G. D., Anisimov D. A.** Postroenie sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya na osnove Web-tekhnologii. *Informatsionnye tekhnologii*, 2011, no 5, pp. 23—26 (in Russian).
7. **Gridin V. N., Dmitrevich G. D., Anisimov D. A.** Postroenie veb-servisov sistem avtomatizatsii skhemotekhnicheskogo proektirovaniya. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, 2012. no. 4, pp. 79—84 (in Russian).
8. **Anisimov D. A.** Metody postroeniya sistem avtomatizatsii skhemotekhnicheskogo proektirovaniya na osnove veb-servisov. *Izvestiya SPbGETU*, 2012 no. 10, pp. 56—61 (in Russian).

Е. В. Цвященко, аспирант, e-mail: eugene.tsviashchenko@gmail.com,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Анализ адекватности модели согласования реплик в конечном счете в базах данных NoSQL

Анализируется модель согласования реплик в конечном счете в базах данных NoSQL. Описывается процесс подготовки и проведения натурного эксперимента в облаке для доказательства адекватности модели. Приводятся спецификации программ, с помощью которых осуществляется доступ к системе NoSQL, и программы обработки журналов. Часть полученных экспериментальным путем данных использовалась для адаптации модели, а другая часть — для оценки адекватности. Выполнен анализ адекватности модели.

Ключевые слова: база данных NoSQL, согласованность в конечном счете, адекватность, адаптация, вероятность рассогласования, реплика

Введение

Современные распределенные хранилища данных должны быть масштабируемыми, доступными и быстрыми. Эти системы, как правило, распределяют данные между различными машинами (и часто через центры обработки данных) и обеспечивают их тиражирование (репликацию) по двум причинам: во-первых, для обеспечения высокой доступности в случае отказа компонентов и, во-вторых, чтобы обеспечить высокую производительность обработки запросов на нескольких репликах. Такие системы баз данных, построенные на парадигме распределенных хранилищ "ключ/значение", получили название NoSQL (Not-Only-SQL) [1]. Но использование реплик порождает проблему чтения несогласованных данных из разных реплик. Важной характеристикой систем NoSQL является вероятность того, что в процессе распространения обновления данных по нескольким репликам поступит запрос на чтение старых записей. В работе [2] разработана модель оценки такой вероятности. Целью данной статьи является доказательство адекватности этой модели.

Поддержание требуемого уровня согласованности для каждой конкретной предметной области может регулироваться следующими параметрами:

- N — число узлов, на которые в конечном счете будет реплицирована запись (может быть с некоторой задержкой);
- W — число узлов, на которые данные должны быть фактически записаны перед тем, как пользователю (или приложению) будет отправлен

ответ об успешном завершении операции (если $W < N$, то система все еще продолжает реплицировать данные на оставшиеся $N - W$ узлов);

- R — число узлов, от которых база данных ожидает ответа для успешного завершения чтения-записи [3].

В работе [4] вводятся понятия *строгой согласованности* записи базы данных (случай $W + R > N$) и *согласованности в конечном счете* ($W + R \leq N$).

Строгая согласованность позволяет всегда получать актуальную версию записи, но это приводит к большим задержкам ожидания завершения обновления W реплик базы данных и чтения записей из R реплик. Для широкого класса приложений это имеет решающее значение. Например, для фирмы Amazon дополнительные задержки в 100 мс привели к 1 % падению продаж. В то же время 500 мс задержки в поисковой системе Google привели к снижению трафика на 20 % [4].

Согласованность в конечном счете (КС-согласованность) существенно уменьшает время реакции системы, но в таких системах всегда присутствует определенная вероятность доступа к рассогласованным данным, так как реплики будут согласованы только через некоторое время распространения обновлений. В статье рассмотрен наиболее важный случай такой согласованности (когда $W = R = 1$), обеспечивающий наибольшее быстродействие по записи и чтению данных.

Итак, увеличение задержки выполнения операций записи и чтения данных (для строгой согласованности) связаны с большими экономическими

потерями, но вместе с тем, снижение задержки (для КС-согласованности) приводит к увеличению вероятности рассогласования данных: чем меньше реплик участвуют в запросе чтения, тем меньше гарантий получить самые последние актуальные данные. Приложения часто могут терпеть слабую согласованность, используя "осторожные" шаблоны проектирования, такие как компенсации (например, "воспоминания", "догадки" и "извинения"), ассоциативные и коммутативные операции (например, анализ сроков и журналов, предупреждения) [5]. Тем не менее, при оценке рисков возникает острая необходимость в моделировании согласования реплик и оценке вероятности рассогласования данных при чтении [4].

В статье анализируется адекватность модели КС-согласования реплик для случая $W = R = 1$, разработанной в работе [2]. Для доказательства адекватности был выполнен натурный эксперимент на кластере NoSQL Riak [6] размером до 25 узлов. В работе приводятся спецификации прикладных программ, разработанных для проведения эксперимента и анализа статистики. Часть полученных результатов использовалась для адаптации модели, а другая часть — для оценки ее адекватности.

Эксперименты проводили в облачной среде, когда пользователь не должен заботиться об инфраструктуре и операционной системе [7]. Главными преимуществами в использовании облаков в вычислениях являются: быстрое изменение конфигурации выделенных ресурсов, включая число узлов в компьютерном кластере; плата только за использование ресурсов. Пользователь может запускать на выполнение базы данных NoSQL с большим объемом необходимой оперативной памяти и места для хранения данных тогда, когда это необходимо.

Обзор публикаций по теме статьи

Несмотря на важность проблемы рассогласования реплик в кластерной архитектуре баз данных NoSQL [4, 8—11] научных публикаций по этой тематике немного в связи со сложностью теоретического решения задачи оценки показателей КС-согласования реплик. Это обусловлено необходимостью учета сложных механизмов репликации, а также параметров аппаратных ресурсов, задействованных в процессе тиражирования обновленных данных. Можно выделить пять следующих работ, близких данной тематике.

В работе [4] предлагается подход к количественному измерению показателей КС-согласованности через "вероятностно ограниченное устаревание" записи (пары <ключ, значение>). "Вероятностно ограниченное устаревание" оценивается следующими показателями: k — устаревание, t — видимость и (k, t) — устаревание.

Вероятность, что считанный из распределенного хранилища набор версий записей не будет содер-

жать актуальную версию записи, является функцией, зависящей от времени. Однако формула

$$p = 1 - p_{sk} = 1 - \left(\frac{C_{N-W}^R}{C_N^R} \right)^k, \quad (1)$$

определяющая вероятность того, что считанный из распределенного хранилища набор версий записей будет содержать версию из последних k -обновлений, не учитывает распространение обновлений (вероятность не зависит от времени) [4]. Здесь N , W , R — параметры, регулирующие требуемый уровень согласованности (см. введение).

В формуле

$$p = 1 - p_{skt} = 1 - \left(\frac{C_{N-W}^R}{C_N^R} + \sum_{c \in [W, N)} \frac{C_{N-c}^R}{C_N^R} [P_w(c+1, t) - P_w(c, t)] \right)^k \quad (2)$$

авторы попытались учесть распространение обновлений во времени [4]. Но они предлагают получить функцию $P_w(c, t)$ с помощью имитационного моделирования или измерений, что, на наш взгляд, является нереальным (в работе [4] эта функция так и не была получена). В формулах (1), (2) не учитывается интенсивность запросов на чтение.

В работе [8] показатели КС-согласованности измерялись экспериментально. Эксперимент состоял в последовательном считывании записи до того момента, пока устаревшее значение не перестанет возвращаться. Разница между временем последнего считывания устаревшей версии пары <ключ/значение> и временем последнего обновления записи отражала окно рассогласованности.

Для экспериментов была разработана очень простая система хранения с уровнем репликации $N = 3$, $W = 1$, $R = 1$. Для наглядности была добавлена искусственная задержка перед реплицированием (тиражированием) данных, равная 1000 мс. Обновление выполнялось раз в 5 с, чтение — раз в 10 мс. Каждые 10 мин добавлялся читающий процесс, таким образом, их число в ходе эксперимента изменялось от 1 до 12.

Сравнивались размеры окон рассогласованности, полученные из журналов базы данных NoSQL, с результатами проведенных экспериментов. Из результатов сравнения видно, что наблюдаемое значение окна рассогласованности (полученное из экспериментов) никогда не превышает размера окна рассогласованности, ориентированного на данные (т. е. полученного из журналов). Также видно, что после некоторого числа читающих процессов трудно достичь высокой точности наблюдаемого значения.

Приводятся результаты измерений окна рассогласования реплик в облачной среде AMAZON S3 в зависимости от зоны обновления и чтения записей.

Модели не разрабатывались, поэтому не ясно, насколько сделанные выводы являются общими.

В статье [9] предлагается метод *LibRe* (Library For Replication) согласования данных в базах данных NoSQL. Метод основывается на КС-согласованности. Как известно, для КС-согласованного хранилища данных характерна некоторая задержка распространения изменений в базе данных (окно рассогласованности), в течение которой возможно чтение неактуальных записей. Но этот режим согласованности обеспечивает большую производительность системы. Задача состоит в том, чтобы добиться высокой согласованности данных при чтении в сочетании с высокой скоростью доступа к данным.

Подход заключается в следующем. Управляющий модуль *LibRe* располагается рядом с балансировщиком нагрузки. Балансировщик передает на вход *LibRe* для каждой операции обновления набор узлов, на которых будет выполнена данная операция. После выполнения операции *LibRe* хранит некоторое время информацию о том, какие узлы ее выполнили. Для каждой операции чтения *LibRe* возвращает набор узлов, где операция обновления уже выполнена.

Этот подход имеет существенные недостатки: не каждая база данных NoSQL позволяет встраивать подобный модуль; его работа увеличивает время выполнения операций обновления и чтения данных.

В статье [10] рассматривается проблема согласованности и долговечности в распределенных хранилищах данных через применение "bolt-on" слоя. Данный слой предполагает причинную согласованность — согласованность, основанную на связи (случилось — до). Данная согласованность является сильной (строгой). Операции приложения создают упорядоченные отношения между операциями (случилось — до), и система учитывает этот порядок. Таким образом, все операции записи описывают причинную историю.

Каузальные связи (причинные) чаще всего описываются в двух видах: потенциальная и явная причинная связь. В потенциальной каузальности все записи, которые могут повлиять на другую запись, должны быть видны до того, как станет видна последняя запись. Явная причинная связь создается напрямую в приложении.

В статье предлагается архитектура bolt-on: на каждую клиентскую машину предлагается ввести прослойку (*shim*), содержащую метаданные и локальное хранилище. Каждый клиент обращается к данной прослойке, которая в свою очередь обращается к КС-согласованному хранилищу данных. Данный слой ограничивает нарушения согласованности, которые может "увидеть" клиент. Хранилище данных ответственно за распределение процессов записи: для того чтобы прочитать новые версии дру-

гих процессов, каждый *shim* отправляет соответствующий запрос к хранилищу данных.

Локальное хранилище содержит согласованный набор записей, с которыми могут проводиться операции чтения и добавления в любое время без нарушения ограничений безопасности. Данный набор записей обозначается как "причинная вырезка данных" $x_1 \rightarrow y_1 \rightarrow z_1$ (causal sat). Пусть другой клиент сохранил запись $y_2 \rightarrow \text{NULL}$. При поиске последней версии записи y_2 прослойка *shim* должна убедиться, что в хранилище была запись y_1 . Иначе причинная связь $x_1 \rightarrow y_2$ будет утеряна. В статье описаны алгоритмы работы с *shim*, а также процедуры проверки целостности причинных связей.

Такой подход можно использовать для узкого круга приложения, например, для уточнения целей при поиске данных. КС-согласованность не рассматривалась.

В статье [11] предлагается метод обеспечения причинной согласованности со сходящейся обработкой конфликтов (CAUSAL + CONSISTENCY). Данный вид согласованности является расширением классической причинной согласованности. Классический метод причинной связи не рассматривает конкурирующие операции обновления, т. е. операции работы над одним ключом, например, $\text{put}(x, a)$ и $\text{put}(x, b)$. Потенциальной причинной связи между этими операциями нет. Следовательно, в КС-согласованной системе возможны конфликты и рассогласования при определенных условиях. Конфликты нежелательны по двум причинам: во-первых, реплики могут логически "разойтись"; во-вторых, полученные расхождения могут логически исключать друг друга, что требует специальной обработки. Предложенное в статье [11] расширение классического метода заключается во введении *сходящейся обработки конфликтов*. Обработкой конфликтов занимается специальная функция h , запускаемая для каждой реплики. Функция должна быть коммутативной и ассоциативной. Сходимость заключается в равенстве результатов выполнения функций $h(a, h(b, c))$ на одной реплике и $h(c, h(b, a))$ — на другой, где $a \rightarrow b \rightarrow c$ — некоторая последовательность операций обновлений и чтений (put и get).

Преимущества метода: усиление согласованности данных за счет введения коммутативной и ассоциативной функций обработки конфликтов.

Недостатки: обнаружение конфликтов является сложной задачей, решение которой вносит существенные задержки в работу системы. Например, одним из трех компонентов системы обнаружения конфликтов является введение явной причинной связи между операциями put текущей и предыдущей версий записи, что требует выполнения дополнительной операции dep_check (проверка зависимости).

Из приведенного анализа следует, что задача разработки новой модели анализа рассогласования реплик является актуальной.

В публикации [2] разработана модель КС-согласования реплик ($W = R = 1$). Будем считать, что обновлена $(N + 1)$ -я реплика и изменения (обновления) распространяются на остальные реплики $1, \dots, N$. Из процесса обновления реплик, описанного в документации NoSQL системы Riak [6], можно сделать вывод о синхронном характере распространения изменений. Для этого режима была получена вероятность того, что в процессе обновления реплик поступит хотя бы одно требование на чтение из необновленных реплик:

$$P = (1 - Q_1(0)) + \sum_{i=2}^N ((1 - Q_i(0)) \prod_{j=1}^{i-1} Q_j(0)); \quad (3)$$

$$Q_{i+1}(z) = \psi_{i+1}(\lambda(N-i)(1-z)), i = 0 \dots (N-1).$$

Здесь $N + 1$ — общее число реплик для обновляемой записи (изменение записи выполняется на $(N + 1)$ -й реплике); λ — интенсивность чтения записи из каждой реплики ($1, \dots, N$), на которую распространяются обновления; $\Psi_{i+1}(s)$ — преобразование Лапласа—Стилтьеса (ПЛС) времени обновления $(i + 1)$ -й реплики. ПЛС имеет достаточно сложный вид [2], поэтому модель (3) нуждается в проверке адекватности.

Обозначим $C = \{K, V, \mu_{ns}, \mu_p\}$ — множество измеренных параметров системы, $X = \{N, \lambda\}$ — настраиваемые параметры, т. е. параметры, которые меняются от одного эксперимента к другому; $Y = \{\mu_n, \mu_m, \mu_{do}, PRT\}$ — адаптируемые параметры модели.

Здесь K — размер ключа записи; V — размер значения записи; μ_{ns} — интенсивность передачи данных по шине сети, соединяющей подсети (байт/с); μ_p — число процессорных циклов в секунду; N — число реплик, на которые распространяются обновления; λ — интенсивность чтения записи из каждой реплики $1, \dots, N$ (1/с); μ_n — интенсивность передачи данных по шине локальной сети (байт/с); μ_m — интенсивность чтения данных из оперативной памяти (байт/с); μ_{do} — интенсивность ввода/вывода данных на диск (байт/с); PRT — число итераций, необходимых для вычисления хеша ключа.

Описание экспериментальной установки

Рассмотрим некоторые особенности развертывания компьютерного кластера в облачной среде применительно к решению задачи оценки адекватности модели КС-согласования реплик. На рынке существует большое число компаний, предоставляющих облачные вычислительные ресурсы. Ресурсы бывают виртуальными и выделенными. Выделенными облачными ресурсами (узлами) являются узлы, которым соответствуют физически отдельные

серверы. В отличие от выделенных узлов, виртуальные узлы — это виртуальные машины. Аренда выделенных серверов намного дороже, поэтому в нашем эксперименте использовались виртуальные узлы, предоставленные компанией *DigitalOcean* (DO) [12]. Так как вероятность доступа к рассогласованным данным оценивалась при работе пользователя с одной записью <ключ/значение>, база данных NoSQL не нагружала оперативную память, что позволило арендовать недорогие виртуальные серверы с малым объемом оперативной памяти.

Все виртуальные узлы, предоставляемые поставщиком облачных ресурсов, используют ресурсы многопроцессорных машин с SSD дисками. Это позволяет сделать предположение, что другие клиенты DO, которым предоставлены виртуальные узлы на том же физическом сервере, не будут нагружать именно тот процессор, на котором запущена наша виртуальная машина. Следовательно, производительность нашего виртуального узла существенно не зависит от фоновой загрузки процессора, что позволяет отнести параметр μ_p (число процессорных циклов, выполняемых в секунду) к множеству измеренных параметров системы (т. е. к C). При инициализации узла доступно несколько опций, среди которых можно выделить опцию *private networking*. При включении данной опции все узлы, арендованные пользователем, гарантированно находятся в одном центре обработки данных (ЦОД), что означает отсутствие подкластеров сети. Следовательно, параметр μ_{ns} — интенсивность передачи данных по сети, соединяющей подсети, — можно не учитывать.

При первоначальной настройке узла (*Droplet*) необходимо выбрать операционную систему (ОС) или снимок, ранее созданный пользователем. Использовалась ОС Ubuntu Server 14.04 [13], предустановленная поставщиком. В качестве системы NoSQL была использована база данных Riak. Для установки и настройки Riak необходимо выполнить ряд действий на каждом из $N + 1$ узлов. Установка базы данных "с нуля" требует много времени. Поэтому для ускорения подготовки кластера общая часть действий по установке системы, описанных в [6], была выполнена один раз на одном узле, далее был сделан снимок узла, который впоследствии был растиражирован на остальные узлы. Индивидуальная часть действий по настройке Riak, описанная в [6], была сохранена в качестве *bash*-скрипта. Данные скрипты являются *Linux* аналогом *bat*-скриптов для ОС *Windows*. После установки и настройки системы все узлы были соединены в кластер, для чего предусмотрены следующие команды Riak:

- 1) riak-admin cluster join riak@<ip_first_node>;
- 2) riak-admin cluster plan;
- 3) riak-admin cluster commit.

Команда 1 выполнялась на каждом узле, кроме одного, к которому присоединены остальные узлы (*ip_first_node*). После выполнения команды 1 необходимо было проверить конфигурацию кластера на любом из узлов командой 2, после чего сохранить изменения командой 3. После выполнения всех команд кластер был готов к работе, однако потребовалось некоторое время для переноса уже хранящихся данных из первого узла на все остальные. В течение этого времени система может отвечать *not found* на запросы клиентов. Так как исследуется КС-согласованность, настройки согласованности для каждого эксперимента задавались следующим образом: ($N + 1$, $W = 1$, $R = 1$).

Подготовка эксперимента

В модели входящий поток требований на чтение к одной реплике принимался пуассоновским с параметром λ . Для того чтобы эксперимент соответствовал модели, требования на чтение должны поступать независимо к каждой из $1, \dots, N$ реплик с интенсивностью λ . К ($N + 1$)-му узлу поступают требования на изменение записи с интенсивностью $1,25$ (1/с). Для выполнения последовательного чтения и записи были разработаны соответствующие прикладные программы. База данных Riak предоставляет библиотеки для доступа к системе на языках Java, Erlang, Python, Ruby, из которых была выбрана библиотека Java. Java-приложения транслируются в промежуточный байт-код, который исполняется на любой виртуальной машине, что облегчило отладку приложения. Все процессы чтения и записи выполнялись непосредственно на узлах. Ниже приведен алгоритм процесса записи, выполняемого на узле $N + 1$.

Вход: N_ITER_W — число итераций, KEY — ключ обновляемой записи, REC_VAL — счетчик версии записи (значение).

Алгоритм:

```
REC_VAL = 1
ЦИКЛ по N_ITER_W
    TIME_STAMP = CURR_TIME
    ЗАПИСАТЬ в БД пару <KEY, REC_VAL>
    ЗАПИСАТЬ в журнал CURR_TIME
    ЗАПИСАТЬ в журнал REC_VAL
    REC_VAL + = 1
    DELAY = EXPONENTIAL(1.25)
    DELAY -= (CURR_TIME - TIME_STAMP)
    ЗАДЕРЖАТЬ выполнение на время DELAY
КОНЕЦ ЦИКЛА
```

Функция $CURR_TIME$ возвращает текущее время системы в миллисекундах. Уменьшение $DELAY$ компенсирует время выполнения алгоритма. При проведении подобных экспериментов в кластере возникает вопрос синхронизации часов между виртуальными узлами. Эту проблему решает по-

ставщик, устанавливая единое время при инициализации узлов.

Ниже приведен алгоритм процессов чтения, выполняемых на узлах $1, \dots, N$.

Вход: λ — интенсивность поступления требований на чтение, KEY — ключ обновляемой записи, N_ITER_W — число итераций процесса записи.

Алгоритм:

```
N_ITER_R = N_ITER_W / 1.25 * lambda
ЦИКЛ по N_ITER_R
    TIME_STAMP = CURR_TIME
    СЧИТАТЬ из БД пару <KEY, REC_VAL>
    ЗАПИСАТЬ в журнал CURR_TIME
    ЗАПИСАТЬ в журнал REC_VAL
    DELAY = EXPONENTIAL(lambda)
    DELAY -= (CURR_TIME - TIME_STAMP)
    ЗАДЕРЖАТЬ выполнение на время DELAY
КОНЕЦ ЦИКЛА
```

После завершения процессов чтения и записи на каждом узле журналы должны быть скопированы на локальную машину для расчета экспериментальной вероятности. Ниже приведен алгоритм программы оценки вероятности.

Вход: LOG_W — файл журнала процесса записи, $LOGS_R$ — файлы журналов процессов чтения, N_ITER_W — число итераций записи.

Алгоритм:

```
COUNT = 0
ДЛЯ каждой записи <TIME_W, REC_VAL_W>
    из журнала LOG_W
    ЕСЛИ  $\exists < TIME\_R, REC\_VAL\_R > \in LOGS\_R: TIME\_R \geq TIME\_W \square$ 
        REC_VAL_R < REC_VAL_W,
        TO COUNT + = 1
КОНЕЦ ДЛЯ
ВЕРНУТЬ COUNT / N_ITER_W
```

Увеличение переменной $COUNT$ на единицу объясняется следующим: после того как завершена операция записи в одну реплику, поступило хотя бы одно требование на чтение из еще необновленных реплик.

Проведение эксперимента

Перед проведением эксперимента необходимо определить значение переменной N_ITER_W для каждого из экспериментов. Для этого воспользуемся теоремой Ляпунова [14]. Известно, что функция

распределения случайной величины $\frac{\sum_{i=1}^k \xi_i}{k} - M(\xi)$

стремится к нормальному закону при увеличении объема выборки k . Поэтому

$$P\left(\left|\frac{\sum_{i=1}^k \xi_i}{k} - M(\xi)\right| < \delta\right) \approx \gamma = 2\Phi(x) = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

$$x = \frac{\delta\sqrt{k}}{\sigma}, \delta = \frac{x\sigma}{\sqrt{k}}, \quad (4)$$

где σ — оценка среднеквадратического отклонения случайной величины ξ_i ; величина x зависит от надежности γ : $x_{\gamma=0,95} = 1,96$, $x_{\gamma=0,99} = 2,58$, $x_{\gamma=0,999} = 3,29$. Случайная величина ξ_i определяется на i -й итерации обновления записи так: если после обновления этой записи хотя бы один клиент прочитает старую версию записи, то $\xi_i = 1$, иначе $\xi_i = 0$. Эти величины распределены по одинаковому закону, поэтому математическое ожидание $M(\xi_i) = M(\xi)$ — это и есть оцениваемая вероятность P (см. (3)). Так как случайная величина ξ_i принимает значение 1 с вероятностью P и 0 с вероятностью $1 - P$, то

$$\sigma = \sqrt{P(1 - P)}. \quad (5)$$

Пусть необходимо получить точность оценки вероятности P с надежностью $\gamma = 0,95$. Тогда из (4) с учетом (5) получим

$$k \geq (x\sigma/\delta)^2 = \frac{1,96^2 P(1 - P)}{\delta^2} = \frac{3,84 P(1 - P)}{\delta^2}. \quad (6)$$

Рассчитаем объем выборки k по выражению (6):

- 1) пусть $P \sim 10^{-3}$, $\delta = 0,001$, тогда $k \geq 3840$;
- 2) пусть $P = 2,5 \cdot 10^{-2}$, $\delta = 0,005$, тогда $k \geq 3744$.

Основываясь на приведенных выше расчетах, объем выборки для всех экспериментов можно принять равным 4000.

Были проведены две серии экспериментов. В табл. 1 приведены значения настраиваемых параметров X (N и λ) и результаты первой серии экспериментов.

В табл. 2 приведены значения настраиваемых параметров X и результаты второй серии экспериментов.

Анализ результатов эксперимента

1. Адаптация модели КС-согласованности реплик

Значения общих параметров множества S для всех серий экспериментов представлены ниже:

- $K = 20$ байт — размер ключа изменяемой записи;
- $V = 1024$ байт — размер значения изменяемой записи;
- $\mu_{ns} = 0$ (т. е. не учитывался) — интенсивность передачи данных по сети, соединяющей подсети;
- $\mu_p = 2400 \cdot 10^6$ — число операций, выполняемых в секунду процессором Intel Xeon CPU E5-2630L v2.

Задача адаптации модели решалась методом наименьших квадратов по схеме

$$\sum_{i=1}^L (P(C, X_i, Y) - Z_i)^2 \xrightarrow{Y} \min,$$

где функцию $P(C, X_i, Y)$ определяет формула (3); Z_i — вероятность, полученная при проведении i -го эксперимента; L — число экспериментов, по которым проводилась адаптация модели (они отмечены в табл. 1 и 2 серым цветом. Остальные эксперименты были использованы при оценке адекватности модели (3)). Оптимальные значения адаптируемых параметров Y были получены методом наискорейшего спуска [15].

Эксперименты проводились в два подхода, в разное время, следовательно, при разной фоновой загрузке ресурсов. Фоновая загрузка узлов зависит от работы других клиентов облачных ресурсов и может меняться время от времени. Поэтому адаптация модели проводилась отдельно для первой и второй

Таблица 1

Результаты первой серии экспериментов

N	λ	Оценка вероятности	N	λ	Оценка вероятности
3	10	0,025	16	3	0,192
	15	0,039		5	0,325
	20	0,065		10	0,539
	30	0,082		15	0,692
8	10	0,174	24	3	0,228
	15	0,223		5	0,375
	20	0,324		7	0,471
	30	0,415		10	0,611

Таблица 2

Результаты второй серии экспериментов

N	λ	Оценка вероятности	N	λ	Оценка вероятности
4	16	0,118	6	5	0,092
	18	0,126		7	0,130
	20	0,155		10	0,163
	22	0,176		12	0,203
	24	0,185		15	0,223
	26	0,201		17	0,274
	28	0,221		20	0,330
	30	0,280		22	0,358

Таблица 3

Адаптируемые параметры

Первая серия экспериментов		Вторая серия экспериментов	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
μ_n	35,1 Мбит/с	μ_n	18,6 Мбит/с
μ_m	8330 Мбайт/с	μ_m	6440 Мбайт/с
μ_{do}	215 Мбайт/с	μ_{do}	215 Мбайт/с
PRT	16	PRT	16

серии экспериментов. После решения вариационной задачи были получены адаптируемые параметры, представленные в табл. 3.

2. Анализ адекватности модели КС-согласованности реплик

В табл. 4 представлены результаты натуральных экспериментов, которые были использованы при анализе адекватности модели (см. в табл. 1 и 2 неотмеченные строки), а также результаты соответствующих модельных экспериментов.

Средняя относительная погрешность (за исключением максимального и минимального значений) по двум сериям экспериментов составила 9,4 %, а для некоторых экспериментов получена погрешность меньше 1 %. На рис. 1 и 2 показаны зависимости вероятности рассогласования P от λ при различных значениях N , построенные по результатам натуральных и модельных экспериментов. На рисунках "мод" и "экс" обозначают графики, построенные соответственно по модели и экспериментальным данным. Из рис. 1 видно, что погрешность увеличивается с ростом N . Это можно объяснить увеличением влияния фоновой нагрузки. В реальной ситуации значение N редко устанавливают выше 10, поэтому большая погрешность при $N = 24$ не является критичной.

Полученное при адаптации модели значение интенсивности передачи байта данных внутри сегмента сети μ_n (см. табл. 3) означает, что сеть сильно перегружена (например, другими клиентами сети). На рис. 3 показано, какой была бы зависимость вероятности P от интенсивности λ , если сеть не была бы пе-

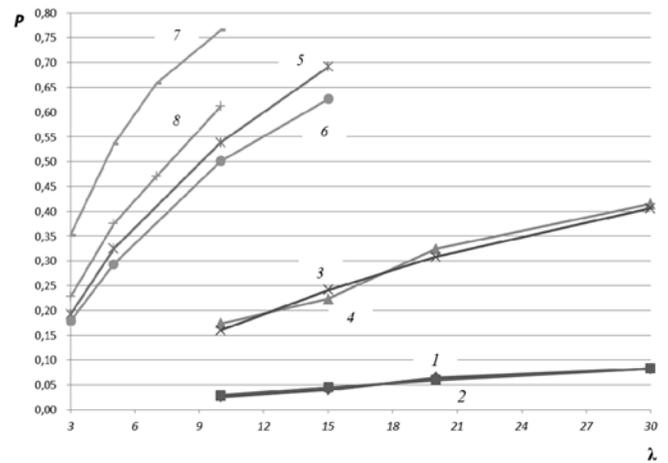


Рис. 1. Зависимости вероятности поступления хотя бы одного требования на чтение в процессе обновления N реплик от λ для первой серии экспериментов: 1 — $N = 3_{\text{мод}}$, 2 — $N = 3_{\text{экс}}$, 3 — $N = 8_{\text{мод}}$, 4 — $N = 8_{\text{экс}}$, 5 — $N = 16_{\text{экс}}$, 6 — $N = 16_{\text{мод}}$, 7 — $N = 24_{\text{мод}}$, 8 — $N = 24_{\text{экс}}$

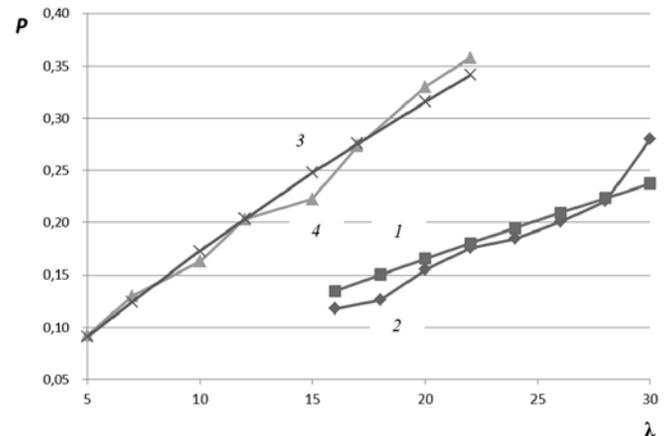


Рис. 2. Зависимости вероятности поступления хотя бы одного требования на чтение в процессе обновления N реплик от λ для второй серии экспериментов: 1 — $N = 4_{\text{мод}}$, 2 — $N = 4_{\text{экс}}$, 3 — $N = 6_{\text{мод}}$, 4 — $N = 6_{\text{экс}}$

Таблица 4

Анализ адекватности модели

N	λ	Вероятность		Относительная погрешность, %
		Эксперимент	Модель	
3	15	0,039	0,045	15,4
	20	0,065	0,059	9,23
8	15	0,223	0,241	7,72
	20	0,324	0,308	4,94
16	5	0,325	0,294	9,54
	10	0,539	0,501	7,05
24	5	0,375	0,535	42,0
	7	0,471	0,658	39,7
4	16	0,118	0,135	14,4
	20	0,155	0,165	6,45
	24	0,185	0,195	5,41
	28	0,221	0,224	1,36
6	7	0,130	0,124	4,62
	12	0,203	0,204	0,50
	17	0,274	0,276	0,73
	22	0,358	0,341	4,75

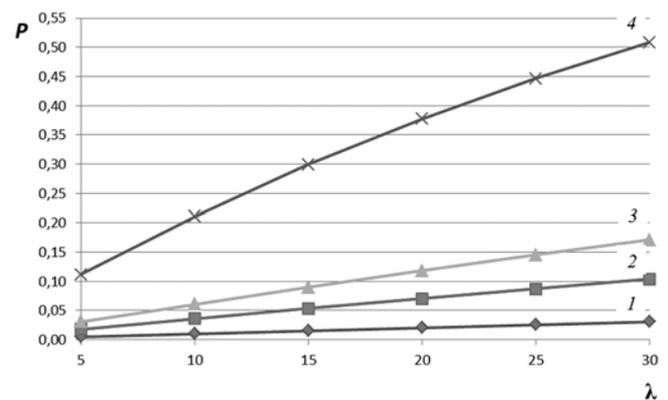


Рис. 3. Зависимости поступления хотя бы одного требования на чтение в процессе обновления N реплик от λ для $\mu_n = 100$ Мбит/с: 1 — $N = 3_{\text{мод}}$, 2 — $N = 6_{\text{мод}}$, 3 — $N = 8_{\text{мод}}$, 4 — $N = 16_{\text{мод}}$

регружена — например, при $\mu_n = 100$ Мбит/с (расчеты выполнены на модели). Вероятность рассогласования снижается более чем в 2 раза.

В работе [4] приведено выражение (1), согласно которому вероятность, что считанная из распределенного хранилища версия записи не будет актуальной (т. е. последней обновленной, $k = 1$), равна (для случая $W = R = 1$):

$$P = 1 - \frac{1}{N+1}, \quad (7)$$

где $N + 1$ — число реплик записи.

Значения этой вероятности представлены в табл. 5 для разных N .

Таблица 5
Значение вероятности P по формуле (7)

N	3	4	6	8	16	24
P	0,750	0,800	0,857	0,889	0,941	0,960

Эти значения никак не соответствуют экспериментальным данным (см. рис. 1, 2). Объясняется это тем, что формула (7) является упрощенной и не учитывает ни механизма распространения обновлений по репликам, ни интенсивности чтения записей из этих реплик. Разработанная модель (3) не имеет указанных недостатков, а также учитывает параметры аппаратных ресурсов (оперативной памяти, диска, сети и процессора), задействованных в процессе тиражирования обновленных данных [2].

Заключение

По результатам натурального эксперимента, выполненного с базой данных NoSQL Riak в облачной среде компании *Digital Ocean* на кластере с числом узлов до 25, доказана адекватность разработанной модели (3) (см. табл. 4). Средняя относительная погрешность составила 9,4 %. Сильное расхождение модели с экспериментом наблюдается только при $N = 24$, но подобное значение N редко встречается в реальных системах.

Задача адаптации модели (3) решалась методом наименьших квадратов. При этом была использована только часть полученных экспериментальных данных, другая часть использовалась для доказательства адекватности модели.

Приведены алгоритмы работы прикладных программ для проведения натуральных экспериментов для режима КС-согласования реплик и оценки вероятности того, что за время обновления N реплик

поступит хотя бы одно требование на чтение из обновленных реплик (т. е. вероятности чтения неактуальных данных). На основе теоремы Ляпунова обоснован объем выборки, необходимый для достижения надежности оценки, равной 0,95.

Список литературы

1. **NoSQL**. [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/NoSQL> (дата обращения 09.03.2015).
2. **Григорьев Ю. А., Цвященко Е. В.** Анализ характеристик согласования реплик в конечном счете в базах данных NoSQL // Информатика и системы управления. 2014. № 3. С. 3—11.
3. **Редмон Э., Уилсон Д. Р.** Семь баз данных за семь недель. Введение в современные базы данных и идеологию NoSQL. М.: ДМК Пресс, 2013. 384 с.
4. **Bailis P., Venkataraman Sh., Franklin M. J., Hellerstein J. M., Stoica I.** Probabilistically Bounded Staleness for Practical Partial Quorums, 2012: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2012/EECS-2012-4.pdf> (дата обращения 09.03.2015).
5. **Alvaro P., Conway N., Hellerstein J. M., and Marczak W. R.** Consistency analysis in Bloom: a CALM and collected approach // CIDR, 2011. P. 249—260.
6. **Riak** documentation. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.basho.com/index.html> (дата обращения 09.03.2015).
7. **Романова А. О.** Научные вычисления в облаках // Молодежный научно-технический вестник. Электронный журнал. № 9, 2012. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/479373.html>.
8. **Bermbach D., Tai S.** Eventual Consistency: How soon is eventual? // ACM MW4SOC '11, December 12, 2011, Lisboa, Portugal. [Электронный ресурс]. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2093186>. Проверено 22.03.2014.
9. **Kumar S. P., Chiky R., Lefebvre S., Soudan E. G.** LibRe: A Consistency Protocol for Modern Storage Systems // ACM COMPUTE'13 Aug 22—24, 2013, Vellore, Tamil Nadu, India.
10. **Bailis P., Chodsi A., Hellerstein J. M., Stoica I.** Bolt-on Causal Consistency // ACM SIGMOD'13, June 22—27, 2013, New York, 2013. P. 761—772.
11. **Lloyd W., Freedman M. J., Kaminsky M., Andersen D. G.** Don't Settle for Eventual: Scalable Causal Consistency for Wide-Area Storage with COPS // ACM SOSP' 11, October 23—26, 2011, Cascais, Portugal. — pp. 401—416.
12. **Digital Ocean**. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.digitalocean.com> (дата обращения 09.03.2015).
13. **Ubuntu OS 14.04**. [Электронный ресурс]. URL: <http://releases.ubuntu.com/14.04> (дата обращения 09.03.2015).
14. **Теорема Ляпунова**. [Электронный ресурс]. URL: режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Ляпунова (дата обращения 09.03.2015).
15. **Метод наименьших квадратов**. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_наименьших_квадратов (дата обращения 09.03.2015).
16. **Сар Theorem**. [Электронный ресурс]. URL: режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/CAP_theorem (дата обращения 09.03.2015).
17. **Григорьев Ю. А.** Анализ свойств баз данных NoSQL // Информатика и системы управления. 2013. № 2. С. 3—13.
18. **Григорьев Ю. А., Цвященко Е. В.** Сильная и слабая согласованность в базах данных NoSQL // Информатика и системы управления. 2014. № 4. С. 14—23.

Adequacy Analysis of the Model of Replicas Agreement Eventually in NoSQL Databases

In this paper the model of replicas agreement eventually in NoSQL databases is analyzed. With the model, we can estimate the probability, that in process of updating N replicas, at least one read request from stale replicas will be received. In order to prove model adequacy the processes of preparation and conduct of the experiment in the cloud are described. For experiment were used virtual cluster with up to twenty five nodes, provided by Digital Ocean company. The specifications of the programs that provides for access to the NoSQL database and log processing are given. After completion of the experiments the one part of obtained results was used for model adaptation and the second part — for adequacy evaluating. Adaptive parameter "intensity data within the network segment" value was calculated as near 35 Mb/s for the first experiments series and near 18 Mb/s for the second means that the cloud network is busy. The analysis showed, that average relative error accounted for 9 percent. Strong disagreement with the experimental model is only observed at $N = 24$, but like the value of N is rare in real systems. Finally, we consider how the probabilities would change if the network was not busy.

Keywords: NoSQL database, eventually consistency, adequacy, adaptation, inconsistency probability, replica

References

1. **NoSQL**. [Electronic resource]. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/NoSQL> (accessed 09.03.2015).
2. **Grigoriev Y. A., Tsviashchenko E. V.** Analis haracteristik soglasovannosti replic v konechnom schete v basah dannix NoSQL, *Informatika i sistemi upravleniya*, 2014, no. 3, pp. 3—11.
3. **Redmon E., Yilson D. R.** *Sem bas dannix za sem nedel. Vvedeni v sovremennye basi dannix i ideologiju NoSQL*, Moscow: DMK Press, 2013. 384 p.
4. **Bailis P., Venkataraman Sh., Dranklin M. J., Hellerstein J. M., Stoica I.** Probabilistically Bounded Staleness for Practical Quorums, 2012. [Electronic resource]. URL: [http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechI pts/2012/EECS-2012-4.pdf](http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechI%20pts/2012/EECS-2012-4.pdf) (accessed 09.03.2015).
5. **Alvaro P., Conway N., Hellerstein J. M., and Marczak W. R.** Consistency analysis in Bloom: a CALM and collected approach, *CIDR*, 2011, pp. 249—260.
6. **Riak** documentation. [Electronic resource]. URL: <http://docs.basho.com/index.html> (accessed 09.03.2015).
7. **Romanova A. O.** Nauchnie vichisleniya v oblakax, *Molodezhniy nauchno-tehnicheskij vestnik*, Electronic Journal, 2012, no. 9, URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/479373.html>
8. **Bermbach D., Tai S.** Eventual Consistency: How soon is eventual? *ACM MW4SOC '11, December 12, 2011, Lisboa, Portugal*. [Electronic resource], URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2093186> (accessed 22.03.2014).
9. **Kumar S. P., Chiky R., Letebvre S., Soudan E. G.** LibRe: A Consistency Protocol for Modern Storage Systems. *ACM COMPUTE '13*, Aug 22—24, 2013, Vellore, Tamil Nadu, India.
10. **Bailis P., Ghodsi A., Hellerstein J. M., Stoica I.** Bolt-on Causal Consistency. *ACM SIGMOD '13*, June 22—27. New York. 2013, pp. 761—772.
11. **Lloyd W., Freedman M. J., Kaminsky M., Andersen D. G.** Don't Settle for Eventual: Scalable Causal Consistency for Wide-Area Storage with COPS, *ACM SOSP '11*, October 23—26, 2011, Cascais, Portugal, 2011, pp. 401—416.
12. **Digital Ocean**. [Electronic resource], URL: <https://www.digitalocean.com> (accessed 09.03.2015).
13. **Ubuntu OS 14.04**. [Electronic resource], URL: <http://releases.ubuntu.com/14.04> (accessed 09.03.2015).
14. **Lapunov theorem**. [Electronic resource], URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%9B%D1%8F%D0%BF%D1%83%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0 (accessed 09.03.2015).
15. **Least squares**. [Electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares (accessed 09.03.2015).
16. **CAP Theorem**. [Electronic resource], URL: http://en.wikipedia.org/wiki/CAP_theorem (accessed 09.03.2015).
17. **Grigoriev Y. A.** Analiz svojstv baz dannix NoSQL, *Informatika i sistemi upravleniya*, 2013, no. 2, pp. 3—13.
18. **Grigoriev Y. A., Tsviashchenko E. V.** Silnaya i slabaya soglasovannost v basah dannih NoSQL, *Informatika i sistemi upravleniya*, 2014, no. 4, pp. 14—23.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК [519.6 + 004.4]:550.3

О. В. Мандрикова^{1, 3}, д-р техн. наук, зав., лаб., e-mail: oksanam1@mail.ru,

И. С. Соловьев^{1, 2}, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: kamigsol@yandex.ru,

Т. Л. Заляев¹, мл. науч. сотр., e-mail: tim.aka.geralt@mail.ru

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка

² Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

им. В. И. Ульянова, г. Санкт-Петербург

Методы анализа вариаций геомагнитного поля и данных космических лучей

Предложен метод моделирования вариации геомагнитного поля, основанный на вейвлетах, и вычислительные решения по оценке энергетических характеристик поля. На основе совмещения вейвлетов с нейронными сетями построены аппроксимации временного хода космических лучей. С использованием разработанных средств выполнен анализ данных, выделены возрастания интенсивности геомагнитных возмущений, предшествующие магнитной буре, и аномалии во временном ходе космических лучей в период основной фазы бури.

Ключевые слова: геомагнитное поле, космические лучи, вейвлет-преобразование, нейронные сети, магнитные бури

Введение

Работа направлена на изучение процессов в околоземном пространстве в периоды возмущений на основе создания методов и алгоритмов анализа, распознавания и интерпретации регистрируемых данных. В возмущенные периоды анализируемые данные имеют сложную нестационарную структуру, содержат негладкие локальные особенности, возникающие в случайные моменты времени и несущие главную информацию об исследуемых процессах. Отсутствие теоретического аппарата, обеспечивающего адекватное описание данных, приводит к неизбежной потере и искажению информации и требует применения современных методов, среди которых важное значение имеют методы распознавания образов и цифровой обработки сигналов [1–9].

В периоды магнитных бурь в вариациях геомагнитного поля наблюдаются колебания в разных частотных диапазонах. Формирующиеся локальные структуры определяются возмущенностью поля и свидетельствуют об интенсивности и характере развития магнитной бури. Сложная структура геомагнитных данных ограничивает возможности методов спектрального анализа, не дающих информации о локальных изменениях, протекающих в физическом процессе, и их масштабных характеристиках.

В данной работе для анализа геомагнитных данных предлагается использовать вейвлет-преобразование. Аппарат вейвлет-преобразования в на-

стоящее время получает широкое распространение в задачах обработки и анализа сложных структур данных. На основе вейвлет-преобразования предложены способы анализа особенностей, возникающих в геомагнитном поле в периоды мощных солнечных вспышек [1, 9], разработаны алгоритмы автоматического определения периодов начальной фазы бури [2], созданы алгоритмы удаления шума и исключения периодической компоненты, вызванной вращением Земли [3, 4]. Разработан метод выделения аномальных изменений в геомагнитных данных [10]. Авторами данной статьи на основе вейвлет-преобразования впервые создана технология автоматического выделения невозмущенного уровня горизонтальной составляющей магнитного поля Земли [11, 12], которая позволила значительно уменьшить погрешности процедуры автоматического вычисления индекса геомагнитной активности (K-индекса) по сравнению с рекомендуемым в INTERMAGNET методом адаптивного сглаживания (KAsm — Adaptive Smoothing method), и в настоящее время используется в обсерваториях "Паратунка" (п-ов Камчатка, ИКИР ДВО РАН) и "Якутск" (г. Якутск, ИКФИА СО РАН). В данной статье описан разработанный авторами метод описания вариации геомагнитного поля (на примере H-компоненты), основанный на вейвлетах, и построенные с его использованием вычислительные решения по выделению геомагнитных возмуще-

ний, оценке их интенсивности и определению периодов повышенной геомагнитной активности. Предлагаемые теоретические средства могут быть реализованы в автоматическом режиме, близком к реальному времени, и адаптированы для различных магнитных обсерваторий.

Ценную информацию об изменении топологии геомагнитного поля во время магнитных бурь дают исследования динамики потока космических лучей [13]. Наблюдаемые на поверхности Земли вариации космических лучей являются интегральным результатом различных солнечных, гелиосферных и атмосферных явлений и имеют сложную внутреннюю структуру. Наиболее существенные изменения в параметрах космических лучей вызывают выбросы коронарной массы и следующие за ними изменения в параметрах межпланетного поля и солнечного ветра [14].

Для изучения динамики потока космических лучей в настоящее время получают развитие методы адаптивной аппроксимации, вейвлет-преобразование и нейронные сети [6, 7, 13, 16]. Преимущество нейросетевого представления аппроксимируемой функции заключается в большой гибкости базовых функций и их способности к адаптации [15]. Использование нейронных сетей при первичной обработке данных космических лучей позволило повысить эффективность процедуры подавления шума по сравнению с медианными методами [5]. На использовании нейронных сетей основан метод автоматического определения внезапного начала магнитных бурь [16]. Авторами статьи на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений с нейронными сетями разработан метод аппроксимации временного хода космических лучей и выявления аномальных изменений, связанных с повышенной активностью Солнца. Метод описан в данной работе, он позволяет подавить шум, выделить характерные вариации и детально изучить их структуру.

На основе предлагаемых средств выполнен совместный анализ данных геомагнитного поля и космических лучей в период сильной магнитной бури 5 сентября 2012 г. В анализе использовались минутные данные международной сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET (www.intermagnet.org) и данные нейтронных мониторов, полученные в рамках проекта NMDB (www.nmdb.eu/). При моделировании вариаций космических лучей выделены аномальные изменения (Форбуш-эффекты), возникающие на фоне повышенной геомагнитной активности. На основе детального анализа геомагнитных данных в периоды, предшествующие развитию главной фазы бури, в геомагнитном поле выделены локальные возрастания интенсивности возмущений, возникающие в разных частотных диапазонах. Наиболее сильные геомагнитные возмущения наблюдаются в периоды аномальных изменений хода космических лучей.

2. Описание методов

2.1. Описание вариации геомагнитного поля на основе вейвлетов

Вариация геомагнитного поля (Н-компонента напряженности магнитного поля Земли) в вейвлет-пространстве может быть представлена в виде [11]

$$f_0(t) = \sum_n c_{-m,n} \varphi_{-m,n}(t) + \sum_{j \in I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) + \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) = f_{\text{спок}}(t) + f_{\text{возм}}(t) + e(t). \quad (1)$$

Здесь компонента $f_{\text{спок}}(t) = \sum_n c_{-6,n} \varphi_{-6,n}(t)$ описывает невозмущенный уровень вариации, а компонента $f_{\text{возм}}(t) = \sum_{j \in I} g_j(t)$, где $g_j(t) = \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ описывает возмущения, возникающие в периоды возрастания геомагнитной активности; $e(t) = \sum_{j \notin I} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t)$ является шумовой компонентой; $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$ — вейвлет-базис; $\varphi_j = \{\varphi_{j,n}\}_{n \in Z}$ — скейлинг-функция; $c_{j,n} = \langle f, \varphi_{j,n} \rangle$, $d_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$, I — набор индексов возмущенных компонент, j — масштаб.

В качестве меры магнитной возмущенности компоненты $g_j(t)$ на масштабе j определена величина $A_j = \max_n |d_{j,n}|$ [11, 12]. Для определения набора индексов I можно использовать следующий критерий:

$$j \in I, \text{ если } m(A_j^v) > m(A_j^k) + \varepsilon, \quad (2)$$

где m — выборочное среднее; v — индекс возмущенной вариации поля; k — индекс спокойной вариации поля; ε — некоторое положительное число.

Предполагая, что величина A_j^k имеет нормальное распределение с некоторыми средними μ^k и дисперсией $\sigma^{2,k}$, величину ε можно оценить как $\hat{\varepsilon} = x_{\frac{1-\alpha}{2}} \sqrt{\sigma^{2,k}}$, где $x_{\frac{1-\alpha}{2}}$ — квантиль уровня $\frac{1-\alpha}{2}$ стандартного нормального распределения.

В частности, для данных станции Паратунка (Камчатский край) оценка набора индексов I выполнялась с использованием геомагнитных данных за периоды 2002, 2005, 2008 гг., содержащие 63 возмущенных вариаций поля и 64 спокойных вариаций поля.

В работе рассматривались три возможных состояния геомагнитного поля: состояние h_0 — поле спокойное; состояние h_1 — поле слабовозмущенное; состояние h_2 — поле возмущенное. В соответствии с данными состояниями поля введены следующие состояния коэффициентов $d_{j,n}$:

$$\begin{aligned} h_j^0 & \text{ — коэффициент спокойный;} \\ h_j^1 & \text{ — коэффициент слабовозмущенный;} \\ h_j^2 & \text{ — коэффициент возмущенный.} \end{aligned}$$

В качестве *меры магнитной возмущенности коэффициента* в соответствии с работой [17] логично определить его амплитуду. Тогда, в соответствии с введенными состояниями коэффициентов, из соотношения (1) получим следующее представление вариации геомагнитного поля:

$$f(t) = f_{trend}(t) + \sum_{j,n} F_0(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t) + \sum_{j,n} F_1(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t) + \sum_{j,n} F_2(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t) + e(t); \quad (3)$$

$$F_0(x) = \begin{cases} x, & \text{если } |x| \leq T_{j,1}; \\ 0, & \text{если } |x| > T_{j,1}; \end{cases} \quad (4)$$

$$F_1(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j,1} \text{ или } |x| > T_{j,2}; \\ x, & \text{если } T_{j,1} < |x| \leq T_{j,2}; \end{cases}$$

$$F_2(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x| \leq T_{j,2}; \\ x, & \text{если } |x| > T_{j,2}, \end{cases}$$

где компонента $g_1(t) = \sum_{j,n} F_1(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t)$ описывает слабые геомагнитные возмущения (коэффициенты компоненты $g_1(t)$ имеют *слабовозмущенное* состояние), компонента $g_2(t) = \sum_{j,n} F_2(d_{j,n})\Psi_{j,n}(t)$ описывает сильные геомагнитные возмущения (коэффициенты компоненты $g_2(t)$ имеют *возмущенное* состояние), $T_{j,1} > T_{j,2}$. Коэффициенты $d_{j,n}$, для которых $|d_{j,n}| \leq T_{j,1}$, будем считать *спокойными*.

Пороговые функции $F_0(x)$, $F_1(x)$ и $F_2(x)$ в (4) определяют *правила выбора решения* о состоянии коэффициентов. В силу случайной природы исследуемого объекта использование любого правила неминуемо связано с возможностью ошибочных решений. В работе использовалось *правило выбора решения*, определяемое путем минимизации *апостериорного риска* [18].

Пороги $T_{j,1}$ и $T_{j,2}$ разбивают пространство коэффициентов X на три непересекающиеся области X_0 , X_1 и X_2 , а *правило выбора решения* устанавливает соответствие между решениями о состоянии коэффициента и областями. Для заданного состояния h_j^i средняя величина потерь может быть определена как

$$J_j^i(x) = \sum_{l=0}^2 \Pi_{il} P\{x \in X_l / h_j^i\},$$

где Π_{il} — функция потерь, $P\{x \in X_l / h_{j,возм}^i\}$ — условная вероятность попадания выборки в область X_l , если в действительности имеет место состояние h_j^i , $i \neq l$, i, l — индексы состояний (знак "/" означает условную вероятность). Усредняя условную функцию риска по всем состояниям h_j^i , $i = 0, 1, 2$, получаем

средний риск: $J = \sum_{i=0}^2 p_i J_j^i$, где p_i — априорная веро-

ятность состояния h_j^i . Наилучшим правилом будет такое, для которого средний риск будет наименьшим (*байесовский риск*). Поскольку мы не знаем априорное распределение состояний p_i , для выбора наилучшего правила будем использовать *апостериорный риск*. В этом случае апостериорные вероятности $P\{h_j^i/x\}$, $i = 0, 1, 2$, представляют наиболее полную характеристику состояний h_j^i при располагаемых априорных данных. Для простой функции потерь $\Pi_{il} = \begin{cases} 1, & i \neq l; \\ 0, & i = l, \end{cases}$ апостериорный риск

$J_l(x) = \sum_{i \neq l} P\{h_j^i/x \in X_l\}$ и критерием качества выбора решения является критерий наименьшей частоты ошибок.

Путем минимизации апостериорного риска $J_l(x)$ в работе были оценены пороги $T_{j,1}$ и $T_{j,2}$, $j \in I$ для районов Камчатки и Якутска. Критерием оценки состояния коэффициентов являлся К-индекс. В оценках было принято, что:

1) коэффициенты принадлежат области X_0 (имеют *спокойное состояние*), если текущее значение К индекса равно 0 или 1;

2) коэффициенты принадлежат области X_1 (имеют *слабовозмущенное состояние*), если текущее значение К-индекса равно 2, 3 или 4;

3) коэффициенты принадлежат области X_2 (имеют *возмущенное состояние*), если текущее значение К-индекса более 4.

Введенные состояния коэффициентов характеризуют состояние геомагнитного поля и их оценка (на основе принятого *правила выбора решения*) позволяет фиксировать моменты возрастания геомагнитной активности. Ниже в данной работе (см. п. 2.3) с использованием этого подхода предложены вычислительные решения по оценке изменений энергетических характеристик поля и выделению периодов повышенной геомагнитной активности. В целях получения более детальной информации о состоянии геомагнитного поля применяют непрерывные вейвлет-преобразования.

2.2. Оценка изменений энергетических характеристик поля и выделение периодов повышенной геомагнитной активности

Относительно каждого базисного вейвлета Ψ непрерывное вейвлет-преобразование определяется формулой [19]

$$(W_\Psi f)(b, a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

$$f \in L^2(\mathbb{R}), a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0.$$

Так как вейвлет Ψ имеет нулевое среднее значение, при стремлении масштаба a к нулю коэффи-

циенты $(W_\Psi f)(b, a)$ характеризуют свойства функции f в окрестности b . Это свойство непрерывного вейвлет-преобразования позволяет получать детальную информацию о локальных свойствах функции f .

Учитывая эквивалентность дискретных и непрерывных вейвлет-преобразований [19], в соответствии с введенной выше мерой магнитной возмущенности коэффициента, интенсивность геомагнитных возмущений в момент времени $t = b$ на анализируемом масштабе a будем оценивать на основе величины

$$e_{b,a} = |(W_\Psi f)(b, a)|. \quad (5)$$

Тогда путем применения пороговых функций к величине $e_{b,a}$ на анализируемом масштабе a можно оценить состояния коэффициентов и выделить частотно-временные интервалы, содержащие слабые и сильные геомагнитные возмущения:

$$P_{T_{a,1}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,1}; \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,1}; \end{cases}$$

$$P_{T_{a,2}}(e_{b,a}) = \begin{cases} 0, & \text{если } e_{b,a} < T_{a,2}; \\ e_{b,a}, & \text{если } e_{b,a} \geq T_{a,2}, \end{cases}$$

где порог $T_{a,1}$ позволяет выделить слабые и сильные возмущения, а порог $T_{a,2}$ — сильные возмущения.

На основе (5) получаем, что интенсивность возмущений поля в $t = b$ определяется формулой

$$E_b = \sum_a e_{b,a}.$$

2.3. Аппроксимация временного хода космических лучей на основе совмещения кратномасштабных вейвлет-разложений и нейронных сетей

В качестве $f(t)$ рассмотрим временной ход космических лучей. Предположим, что пространство исходных дискретных данных есть $V_0 = \text{clos}_{L^2(R)}(\varphi(2^0 t - n))$ (т. е. $j = 0$). Выполним кратномасштабное вейвлет-разложение функции $f_0(t)$ до уровня m и получим ее представление в виде [19]:

$$f_0(t) = g_{-1}(t) + g_{-2}(t) + \dots + g_{-m}(t) + f_{-m}(t) =$$

$$= \sum_{j=-1}^{-m} \sum_n d_{j,n} \Psi_{j,n}(t) + \sum_n c_{-m,n} \varphi_{-m,n}(t). \quad (6)$$

Для сглаженной компоненты $f_{-m}(t) = \sum_n c_{-m,n} \times \varphi_{-m,n}(t)$ выполним операцию вейвлет-восстановления: $f_0^{(-m)}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(-m)} \varphi_{0,n}(t)$, где верхний индекс $(-m)$ соответствует разрешению компоненты до выполнения операции вейвлет-восстановления.

Далее, на основе нейронной сети для компоненты $f_0^{(-m)}$ строим отображение: $y: f_0^{(-m)} \rightarrow \hat{f}_0^{*(-m)}$.

Для построения отображения используем прямо-направленную нейронную сеть переменной структуры (нейронная сеть переменной структуры — это сеть, структура которой определяется путем минимизации ошибки на обучающем множестве [20]). Обучающее множество формируем из данных, регистрируемых в периоды спокойного геомагнитного поля, которое характеризует состояние околоземного пространства. В этом случае обученная нейронная сеть будет воспроизводить регулярные изменения аппроксимируемых данных (характерные для спокойных условий околоземного пространства). Обучение сети выполняем на основе алгоритма обратного распространения ошибки [15].

Если в построенном отображении $\hat{f}_0^{*(-m)}$ — действительный выход сети, а $f_0^{*(-m)}$ — желаемый, то $f_0^{*(-m)} = y(f_0^{(-m)})$ — неизвестная функция, а $\hat{f}_0^{*(-m)}$ — ее аппроксимация, которую воспроизводит нейронная сеть. При подаче на вход обученной сети значений функции $f_0^{(-m)}$ из интервала $[t_n - Q + 1, t_n]$ сеть становится способной вычислить упрежденные ее значения на временном интервале $[t_n + 1, t_n + S]$, где Q — число нейронов входного слоя сети; t_n — текущий дискретный момент времени; S — длина интервала упреждения.

Ошибка сети (ошибка аппроксимации) в момент времени t_n определяется как разность между желаемым $f_0^{*(-m)}$ и действительным $\hat{f}_0^{*(-m)}$ выходными значениями функции: $e_m[t_n] = \sum_{i=1}^S |f_{0,i}^{*(-m)}[t_n] - \hat{f}_{0,i}^{*(-m)}[t_n]|$, где i — шаг упреждения данных, квадратные скобки обозначают дискретные моменты времени.

Алгоритм построения сети и выбора уровня вейвлет-разложения, основанный на минимизации ошибки аппроксимации, приведен ниже.

Если во временном ходе данных возникает аномальное изменение, то абсолютные значения ошибок сети возрастут [21]. Поэтому путем аппроксимации данных и оценки ошибок сети может быть выполнено обнаружение аномальных изменений, которое может быть основано, например, на проверке условия

$E_{m,U} = \frac{1}{U} \sum_{n=1}^U e_m[t_n] > T$, где U — длина окна наблюдения; T — некоторое наперед заданное пороговое значение.

2.4. Алгоритм построения нейронной сети и выбора уровня вейвлет-разложения

Шаг 1. Получаем представление сглаженной компоненты ряда в виде

$$f_0^{(-m)}(t) = \sum_n c_{0,n}^{(-m)} \varphi_{0,n}(t),$$

где $m = 1$.

Шаг 2. Массив данных $\{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=1}^N$, где N — длина массива, делим на блоки:

$$\{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=1}^Q, \{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=n+1}^{Q+1}, \dots, \{c_{0,n}^{(-m)}\}_{n=N-Q}^N.$$

Длина блока $Q = 6$.

Шаг 3. Из полученных блоков данных формируем обучающую матрицу размерности $Q \times V$, где Q — длина входного вектора сети, V — число обучающих векторов.

Шаг 4. Строим сеть переменной структуры.

Шаг 5. Используя тестовые данные $\{c_{0,l}^{(-m)}\}_{l=l_0}^L$, оцениваем ошибку сети:

$$E_m = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^S |\varepsilon_i^{(-m)}[l]|,$$

где $\varepsilon_i^{(-m)}[l] = \hat{c}_{0,l}^{i,(-m)} - c_{0,l}^{i,(-m)}$ — ошибка сети в дискретный момент времени l с шагом упреждения i , $c_{0,l}^{i,(-m)}$ — желаемое, $\hat{c}_{0,l}^{i,(-m)}$ — действительное выходные значения сети в дискретный момент времени l с шагом упреждения i , S — длина выходного вектора сети, L — длина массива тестовых данных.

Шаг 6. Оцениваем разницу $\Delta = E_m - E_{m-1}$. Если $\Delta \leq 0$, то переходим к шагу 7. Если $\Delta > 0$, то искомый уровень разложения $m^* = m - 1$, шаг 7 не выполняем.

Шаг 7. Если $m \leq \log_2 N$ (максимальный допустимый уровень разложения M определяется длиной массива данных N : $M \leq \log_2 N$), увеличиваем на 1 уровень разложения ($m = m + 1$) и выполняем шаги 2—5. Если $m > \log_2 N$, искомый уровень разложения $m^* = m$.

2.5. Выбор вейвлета

В данной работе *кратномасштабное вейвлет-разложение* функции $f_0(t)$ (формула (6)) выполнялось с использованием вейвлетов семейства Койфлеты. Койфлеты — единственные из ортогональных функций, которые имеют носитель наименьшего размера при достаточном числе нулевых моментов в *масшта-*

бирующей функции φ [19]: $\int_{-\infty}^{+\infty} t^r \varphi(t) dt = 0$ при $r = \overline{1, p}$.

Данное свойство обеспечивает наилучшее приближение функции в сглаженных компонентах кратномасштабных вейвлет-разложений [19]: если функ-

ция f принадлежит C^r (C^r — пространство функций, r раз непрерывно дифференцируемых) в окрестности $2^{-m}n$ с $r \leq p$, то $2^{-m/2} \langle f, \varphi_{-m,n} \rangle \approx f(2^{-m}n) + O(2^{-m(r+1)})$. Порядок приближения возрастает с ростом p , результирующей Койфлет имеет носитель размера $3p - 1$.

Аппроксимацию данных космических лучей с наименьшей ошибкой позволили получить Койфлеты порядка $p = 3$.

На основе предлагаемого метода для станций Новосибирск и Афины были построены нейронные сети, аппроксимирующие временной ход сглаженной компоненты космических лучей по данным нейронных мониторов. Результаты работы нейронных сетей представлены ниже. В обучении сетей использовались минутные данные за период 2005—2013 гг. Для учета солнечного цикла и связанного с ним изменения уровня космических лучей обучение сетей выполнялось отдельно для каждого года. Построенные нейронные сети имеют трехслойную структуру и выполняют следующее преобразование данных:

$$c_{j,n+1}(t) = \alpha_\chi^3 \left(\sum_\phi \omega_{\chi\phi}^3 \alpha_\phi^2 \left(\sum_\beta \omega_{\phi\beta}^2 \alpha_\beta \left(\sum_n \omega_{\beta n}^1 c_{j,n}(t) \right) \right) \right),$$

где $\omega_{\beta n}^1$ — весовые коэффициенты нейрона β входного слоя сети; $\omega_{\phi\beta}^2$ — весовые коэффициенты нейрона ϕ скрытого слоя сети; $\omega_{\chi\phi}^3$ — весовые коэффициенты нейрона χ выходного слоя, $\alpha_\beta^1(z) = \alpha_\phi^2(z) = \frac{2}{1 + \exp(-2z)} - 1$, $\alpha_\chi^3(z) = a * z + b$, $j = -5$.

3. Результаты применения разработанных средств

На рис. 1, 2 (см. вторую и третью стороны обложки) представлены результаты обработки данных геомагнитного поля и космических лучей в период магнитной бури 5—6 сентября 2012 г. Анализируемая магнитная буря была зафиксирована на Земле 5 сентября 2012 г. Скорость солнечного ветра достигла значений 500...600 км/с в связи с приходом ускоренного потока от СМЕ 2 сентября 2012. Детальный анализ рис. 1, 2 показывает, что накануне бури на анализируемых станциях в разных частотных диапазонах возникли локальные увеличения интенсивности геомагнитных возмущений и сформировались периоды слабой геомагнитной активности (примерно 06:00—08:00 по мировому времени (UT), 10:30—12:30 UT, 17:00—18:00 UT 4 сентября и с 22:00 UT до момента начала бури). Приход ударной волны произошел 05 сентября в 1:00 UT и одновременно на обеих станциях зафиксировано начало Форбуш-эффекта (на станции Новосибирск наблюдалось возрастание ошибки ней-

ронной сети). Максимальные значения интенсивности возмущений поля зафиксированы 5 сентября в период с 6:43 до 6:48 по мировому времени (UT), которые совпадают с периодами сильной геомагнитной активности (на станции Новосибирск наблюдалось максимальное понижение уровня космических лучей и возрастание ошибки нейронной сети в 10 раз, по сравнению со спокойным периодом). Можно отметить, что на станции Афины зафиксированы короткие Форбуш-эффекты с быстрым восстановлением, а на станции Новосибирск — более длительный Форбуш-эффект.

Выводы

С использованием предложенной модели вариации геомагнитного поля, описывающей ее спокойный ход и геомагнитные возмущения, построены вычислительные решения, позволяющие фиксировать моменты возникновения геомагнитных возмущений и получать количественные оценки степени возмущенности поля.

На основе совмещения вейвлет-преобразования с нейронными сетями разработан метод аппроксимации временного хода космических лучей по данным нейтронных мониторов и выделения аномальных изменений, возникающих в периоды повышенной солнечной активности. Метод позволяет детально изучать структуру данных космических лучей и выделять аномальные изменения в их временном ходе в периоды Форбуш-эффектов. На основе метода для станций Новосибирск и Афины построены нейронные сети, аппроксимирующие временной ход сглаженной компоненты космических лучей.

Совместный анализ данных геомагнитного поля и космических лучей в периоды сильных магнитных бурь показал, что наиболее сильные возмущения геомагнитного поля наблюдаются в периоды аномального изменения хода космических лучей и фиксируются на основе предложенного метода. Замечено, что накануне бурь в локальные моменты времени в разных частотных диапазонах может наблюдаться слабое возрастание геомагнитной активности, связанное с приближающейся бурей. Данный результат повысит точность оценки состояния околоземного пространства при выполнении прогноза космической погоды.

В будущем планируется адаптация разработанных средств для большего числа станций регистрации и создание на их основе интегрированной программной среды, обеспечивающей возможности проведения пространственно-временного анализа данных.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-11-00194 и при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0058 от 12.02.2013 г.

1. **Nayar S. R. P., Radhika V. N. and Seena P. T.** Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet Techniques // Proceedings of the ILWS Workshop Goa, India, February 19–24. 2006.
2. **Hafez A. G., Ghamry E., Yayama H. and Yumoto K.** Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis // Advances in Space Research. 2013. N. 51. P. 39–49.
3. **Xu Z., Zhu L., Sojka J., Kokoszka P., Jach A.** An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the Dst index // J. Atmos. Solar–Terr. Phys. 2008. N. 70. P. 1579–1588.
4. **Jach A., Kokoszka P., Sojka J. and Zhu L.** Wavelet-based index of magnetic storm activity // J. Geophys. Res. 2006. Res. 111. DOI: 10.1029/2006ja011635.
5. **Paschalis P., Sarlanis C. and Mavromichalaki H.** Artificial Neural Network Approach of Cosmic Ray Primary Data Processing // Solar Physics. 2013. N. 182 (1). P. 303–318.
6. **Macpherson K. P., Conway A. J. and Brown J. C.** Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural networks // J. Geophys. Res. 2001. N. 100. P. 735–744.
7. **Woolley J. W., Agarwal P. K. and Baker J.** Modeling and Prediction of Chaotic Systems with artificial neural networks // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 2010. Vol. 63. P. 2117. DOI: 10.1002/flid.2117.
8. **Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A. and Heumez B.** Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory // Earth Planets Space. 2012. N. 64 (9). P. 743–752.
9. **Роганова Н. М., Бондарь Т. Н., Иванов В. В.** Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэронаука. 2004. № 2. С. 276–282.
10. **Zaouar N., Hamoudi M., Manda M., Balasis G. and Holschneider M.** Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance // Earth Planets Space. 2013. N. 65 (12). P. 1525–1540.
11. **Мандрикова О. В., Соловьев И. С.** Вейвлет-технология обработки и анализа вариаций магнитного поля Земли // Информационные технологии. 2011. № 1. С. 34–38.
12. **Mandrikova O. V. and Solovev I. S.** The method of the extracting disturbance and estimates of the Earth's magnetic field is based on the wavelet-packet // Proceedings of 11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis, Samara, Russia, September 23–28. 2013.
13. **Козлов В. И., Марков В. В.** Вейвлет-образ гелиосферной бури в космических лучах // Геомагнетизм и аэронаука. 2007. № 1. С. 56–65.
14. **Vecchio A., Laurenza M., Storini M. and Carbone V.** New Insights on Cosmic Ray Modulation through a Joint Use of Nonstationary Data-Processing Methods // Advances in Astronomy. 2012. DOI: 10.1155/2012/834247.
15. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс. М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
16. **Segarra A., Curto J. J.** Automatic detection of sudden commencements using neural networks // Earth Planets Space. 2013. N. 65 (7). P. 791–797.
17. **Мандрикова О. В., Богданов В. В., Соловьев И. С.** Вейвлет-анализ данных магнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэронаука. 2013. Т. 53. № 2. С. 282–288.
18. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Изд. 2-е. М.: Сов. радио, 1975. 392 с.
19. **Daubechies I.** Ten Lectures on Wavelets. Пер. с англ. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001.
20. **Агеев А. Д., Балухто А. Н., Бычков А. В. и др.** Нейроматематика: учеб. пособие для вузов / Общая ред. А. И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2002. 448 с.
21. **Мандрикова О. В., Полозов Ю. А.** Аппроксимация и анализ ионосферных параметров на основе совмещения вейвлет-преобразования с коллективами нейронных сетей // Информационные технологии. 2014. № 7. С. 61–65.

O. V. Mandrikova^{1, 3}, Head of Laboratory, e-mail: oksanam1@mail.ru,
I. S. Solovev^{1, 2}, Research Associate, e-mail: kamigsol@yandex.ru,
T. L. Zalyaev¹, Research Associate, e-mail: tim.aka.geralt@mail.ru
¹ Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation
(Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences), Paratunka
² Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky
³ Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETT", Saint-Petersburg

Methods of Analysis of Geomagnetic Field Variations and Cosmic Ray Data

Based on the model of the geomagnetic field variations developed by the authors we created computing solutions that allow allocating moments of occurrence of geomagnetic disturbances and obtaining quantitative estimates of the degree of disturbance of geomagnetic field.

We propose a method for modeling the cosmic ray time course according to the data from neutron monitors, and, on the basis of the proposed method, computing solutions for allocation of the anomalous changes (Forbush effects) that occur in cosmic rays time variation during periods of high solar activity. According to our method we created neural networks that perform approximation of the smoothed component of cosmic ray time series for stations Novosibirsk and Athens.

Joint analysis of the geomagnetic field and cosmic rays during strong magnetic storms showed that the strongest geomagnetic field perturbations were observed in periods of abnormal changes in cosmic ray level and could be recorded on the basis of the proposed method. Assessment of the energy characteristics of the geomagnetic field on the eve of and during magnetic storm development allowed us to highlight local increases in intensity of the geomagnetic field occurring at different frequency ranges prior to the development of the storm's main phase. Implementation of the proposed method with theoretical tools in combination with other methods will improve the estimation accuracy of the geomagnetic field state during space weather forecasting.

Keywords: geomagnetic field, cosmic rays, wavelet transform, neural networks, magnetic storms

References

1. Nayar S. R. P., Radhika V. N. and Seena P. T. Investigation of substorms during geomagnetic storms using wavelet Techniques. *Proceedings of the ILWS Workshop Goa, India, February 19–24*. 2006.
2. Hafez A. G., Ghamry E., Yayama H. and Yumoto K. Systematic examination of the geomagnetic storm sudden commencement using multi resolution analysis, *Advances in Space Research*, 2013, no. 51, pp. 39–49.
3. Xu Z., Zhu L., Sojka J., Kokoszka P., Jach A. An assessment study of the wavelet-based index of magnetic storm activity (WISA) and its comparison to the Dst index, *J. Atmos. Solar–Terr. Phys.*, 2008, no. 70, pp. 1579–1588.
4. Jach A., Kokoszka P., Sojka J. and Zhu L. Wavelet-based index of magnetic storm activity, *J. Geophys*, 2006. Res. 111. DOI: 10.1029/2006ja011635.
5. Paschalis P., Sarlanis C. and Mavromichalaki H. Artificial Neural Network Approach of Cosmic Ray Primary Data Processing, *Solar Physics*, 2013, no. 182 (1), pp. 303–318.
6. Macpherson K. P., Conway A. J. and Brown J. C. Prediction of solar and geomagnetic activity data using neural networks, *J. Geophys. Res.*, 2001, no. 100, pp. 735–744.
7. Woolley J. W., Agarwal P. K. and Baker J. Modeling and Prediction of Chaotic Systems with Artificial Neural Networks, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2010, vol. 63. DOI: 10.1002/flid, pp. 2117.
8. Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov S., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A. and Heumez B. Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory, *Earth Planets Space*, 2012, no. 64 (9), pp. 743–752.
9. Rotanova N. M., Bondar' T. N., Ivanov V. V. Vejvlet-analiz vekovyh geomagnitnyh variacij, *Geomagnetizm i ajeronomija*, 2004, no. 2, pp. 276–282 (in Russian)
10. Zaourar N., Hamoudi M., Manda M., Balasis G. and Holschneider M. Wavelet-based multiscale analysis of geomagnetic disturbance, *Earth Planets Space*, 2013, no. 65 (12), pp. 1525–1540.
11. Mandrikova O. V., Solovev I. S. Vejvlet-tehnologija obrabotki i analiza variacij magnitnogo polja Zemli, *Informacionnye tehnologii*, 2011, no. 1, pp. 34–38.
12. Mandrikova O. V. and Solovev I. S. The method of the extracting disturbance and estimates of the Earth's magnetic field is based on the wavelet-packet, *Proceedings of 11th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*, Samara, Russia, September 23–28. 2013.
13. Kozlov V. I., Markov V. V. Vejvlet-obraz geliosfernoj buri v kosmicheskikh luchah, *Geomagnetizm i ajeronomija*, 2007, no. 1, pp. 56–65 (in Russian).
14. Vecchio A., Laurenza M., Storini M. and Carbone V. New Insights on Cosmic Ray Modulation through a Joint Use of Nonstationary Data-Processing Methods, *Advances in Astronomy*, 2012. DOI: 10.1155/2012/834247.
15. Hajkin S. Nejrorny seti: polnyj kurs, Moscow: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2006, 1104 p. (in Russian).
16. Segarra A., Curto J. J. Automatic detection of sudden commencements using neural networks, *Earth Planets Space*, 2013, no. 65 (7), pp. 791–797.
17. Mandrikova O. V., Bogdanov V. V., Solov'ev I. S. Vejvlet-analiz dannyh magnitnogo polja Zemli, *Geomagnetizm i ajeronomija*, 2013, vol. 53, no. 2, pp. 282–288 (in Russian).
18. Levin B. R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoj radiotekhniki. Izd. 2-e, Moscow: Sov. radio, 1975, 392 p. (in Russian).
19. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Per. s anglijskogo, Izhevsk: NIC "Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika", 2001 (in Russian).
20. Ageev A. D., Baluhto A. N., Bychkov A. V. i dr. Nejrornematika: Ucheb. posobie dlja vuzov, Moscow: IPRZhR, 2002, 448 p. (in Russian).
21. Mandrikova O. V., Polozov Ju. A. Approksimacija i analiz ionosfernyh parametrov na osnove sovmeshhenija vejvlet-preobrazovanija s kolektivami nejronnyh setej, *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 7, pp. 61–65. (in Russian).

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ GEOINFORMATION SYSTEMS

УДК 004.6; 528; 004.8; 621.383; 621.472

А. М. Пенджиев, д-р сел.-хоз. наук, доц., e-mail: ampenjiev@rambler.ru,
Туркменский государственный архитектурно-строительный институт, Ашхабад,
М. А. Пенжиев, инженер,
"Ашпроект"

Геоинформационные системы в солнечной энергетике Туркменистана

Рассматривается использование геоинформационной системы, позволяющей оперативно и подробно анализировать информацию различных альтернативных энергетических вариантов. Оценивается возможность использования солнечных энергетических ресурсов, создания базы данных в области энергообеспечения в труднодоступных отдаленных населенных пунктах, а также рассмотрен маркетинг экологического бизнеса по продаже квот. Составлена карта солнечных энергетических ресурсов для ГИС и обоснованы энергетические, экономические, экологические потенциалы различных солнечных энергетических установок.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, солнечная энергетика, геоинформационные системы, технологии, энергоэффективность, экология, экобизнес, Туркменистан

Введение

Выступая на состоявшемся Форуме Энергетической Хартии "Надежный и стабильный транзит энергоносителей" 9 декабря 2014 г. Президент Гурбангулы Бердымухамедов указал на объективные тенденции в геэкономике, когда диверсификация и наличие альтернативных маршрутов поставок выступают решающим условием глобальной энергетической безопасности, устойчивости всей системы мирохозяйственных связей, гарантий отсутствия односторонности и структурных деформаций. В этом, на наш взгляд, заключена сама суть устойчивой энергетики.

При этом в Туркменистане особая роль отводится вопросам энергоэффективности и энергосбережения, использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Их обсуждение сегодня должно стать важнейшей и органичной частью международного энергетического диалога — выразил убежденность глава государства. Бережное и дальновидное отношение к экологии, к сохранению естественной природной среды — еще один ключевой компонент современного энергетического цикла. Объективное требование дня — использование инновационных технологий и методов управления при создании энергетической производственной и транзитной инфраструктуры. Высокая экологичность мировой добычи углеводородов сегодня становится синонимом ее эффективности [1, газета "Нейтральный Туркменистан" 10.12.2014 г.].

Интерес к проектам по возобновляемой энергетике неуклонно растет во всем мире, в них ставятся

множество технологических и технических задач, а также выявляются проблемы оценки возможности и эффективности использования ВИЭ. Для решения комплекса разнообразных задач в данной области возможно и целесообразно использование инструментария геоинформационных систем (ГИС) и технологий.

ГИС — это организованный набор аппаратуры, программного обеспечения, персонала и географических данных, предназначенных для эффективного ввода, хранения, обновления, обработки, анализа и визуализации данных, всех видов географически организованной информации. Другими словами, ГИС — это система, способная хранить и использовать данные о пространственно-организационных объектах.

Исходя из вышеизложенного основной составляющей ГИС являются развитие возобновляемой энергетики в решении энергетических, экономических, экологических, социальных задач и возможность снижения антропогенных нагрузок на биосферу смягчения изменения климата на основе возобновляемых энергетических ресурсов и технологий [4, 7—9, 20].

Целью и задачей статьи являются разработка ГИС, технологий на основе ВИЭ и обеспечение информационного, программного геоинформационного моделирования для решения ряда задач по оценке пространственного распределения возобновляемых энергоресурсов, в частности, распределения солнечных энергетических ресурсов на территории Туркменистана.

Предложены принципы построения новой ГИС-технологии и создана основа для решения задач комплексной оценки возобновляемых энергоресурсов потенциала Туркменистана, которая имеет территориальную привязку. Впервые с применением геоинформационных технологий построена энергетическая карта потенциала и рассчитана техническая доступность солнечных энергетических ресурсов для энергоснабжения на территории Туркменистана.

Геоинформационные системы в области возобновляемой энергетики

ГИС — это интегрированные в единой информационной среде электронные пространственно ориентированные изображения (карты, схемы, планы и т. п.) и базы данных (БД). В качестве БД можно использовать теоретические расчеты, таблицы, паспорта, иллюстрации, расписания и т. п. Такая интеграция значительно расширяет возможности системы и позволяет упростить аналитические работы с координатно-привязанной информацией [4, 7—11, 20]. ГИС характеризуются следующими положительными моментами:

- наглядность представления семантической информации из БД за счет отображения взаимного пространственного расположения данных;
- увеличение информационной емкости продукта за счет связи пространственно ориентированных изображений с семантической информацией из БД;
- улучшение структурированности информации и, как следствие, повышение эффективности ее анализа и обработки.

Традиционный набор функций ГИС при работе с картой включает:

- показ карты в различных масштабах;
- выбор набора слоев информации для показа;
- зависимость внешнего вида объектов от их семантических характеристик;
- оперативное получение информации об объекте при выборе его курсором мыши; возможность распечатки любых фрагментов карты.

Области применения ГИС-технологий. Энергетические компании широко используют ГИС для разработки проектов. Интеграционные возможности ГИС поистине безграничны. Эти системы позволяют вести учет численности, структуры и распределения населения и одновременно использовать эту информацию для планирования развития социальной инфраструктуры, транспортной и энергетической сетей, оптимального размещения объектов здравоохранения, противопожарных отрядов и сил правопорядка и т. д. [4, 7—11, 20].

В данной работе основной упор сделан на создание ГИС в области энергообеспечения отдаленных районов, для графического построения карт и получения информации о сельских жителях, различных животноводческих объектах, об экономических, экологических и социальных проблемах и т. д.

Отмеченные на карте области во многих случаях гораздо нагляднее отражают требуемую информацию, чем десятки страниц отчетов с таблицами.

Использование ВИЭ имеет важное значение для обеспечения потребностей населения, промышленности и сельского хозяйства в тепловой и электрической энергии, позволяет решать энергетические, социально-экономические, экологические проблемы регионов Туркменистана, удаленных от централизованных энергосистем, а также маркетинга, менеджмента экологического бизнеса по продаже квот.

Особенности возобновляемых источников энергии.

Возобновляемая энергетика характеризуется многогранностью, разнообразием характеризующих ее критериев и составляющих. В перечне задач, возникающих при осуществлении проектов по возобновляемой энергетике (ВЭ) (помимо технологических и технических), особо выделяется проблема оценки возможности и энергоэффективности использования ВИЭ для энергоэкологообеспечения регионов [3, 7—11, 18].

Очевидно, что при этом, с одной стороны, необходимы обширные массивы информации, охватывающие как природные ресурсы территории, так и экономические, экологические характеристики региона (инфраструктура энергетики, энергетические балансы, линии электропередач, наличие отраслей промышленности; характеристики сельскохозяйственного производства, пастбищных животноводческих хозяйств и пр.). С другой стороны, необходимо привлечь такие инструменты анализа, которые позволяли бы собирать, оперативно модернизировать и преобразовывать эти массивы данных, отображать их путем всестороннего анализа и получать на их основе обоснованные оценки и делать технологические расчеты.

Одновременно следует учитывать, что зачастую пользователи интересуют комплексные оценки по различным видам источников энергии. В конкретных регионах наиболее эффективным может стать либо использование гибридных энергоустановок, либо создание нескольких установок (станций) на различных типах энергии. В связи с комплексностью указанных проблем, а также известной "региональностью" возобновляемой энергетике, становится возможным и актуальным использование инструментария геоинформационных технологий.

Зарубежный опыт использования ГИС в возобновляемой энергетике. В настоящий момент за рубежом имеется достаточно успешный опыт использования ГИС-технологий в области возобновляемой энергетике. Рассмотренные в ходе исследования зарубежных авторов по геоинформационным ресурсам по возобновляемой энергетике ГИС можно подразделить по охвату территории на:

- ✓ локальные (Атлас возобновляемой энергетики Вермонта);

- ✓ региональные (региональная ГИС, разработанная на основе ArcGIS 9.3.1);
- ✓ национальные (созданная в Национальной лаборатории ВИЭ США (NREL USA) Renewable resources map and data [3, 8];
- ✓ глобальные (3 TIER Renewable Energy [3, 9, 10] — коммерческий ГИС-продукт, который предоставляет в открытом (демонстрационном) режиме только услугу Firstlook по первичной оценке ресурсов трех источников возобновляемой энергии: ветра, солнца и водных потоков [3, 8].

Существующий продукт, предлагаемый компанией, характеризуется: наличием постоянно обновляемой базы данных; возможностью пополнения ее собственными данными пользователя; инструментами анализа данных для получения на их основе новой "производной" информации; представлением результатов в виде диаграмм, графиков, карт и других визуальных объектов. Однако отсутствие информации о методиках проведения расчетов, а также оценок точности прогноза являются весьма критичным.

Первые шаги в России использования ГИС в области возобновляемой энергетики сделаны учеными из МГУ Нефедовой Л. Б., Новаковским Б. А., Правосоловой А. И., Киселевой С. В., Рафиковой Ю. Ю. и др. [4, 7—9].

В Туркменистане на данный момент нет аналогов зарубежным ГИС по возобновляемой энергетике. На отечественном рынке создание ГИС сдерживается дороговизной специализированных программных средств, длительными сроками разработки и высокими требованиями к "компьютерной" квалификации персонала. При этом экологические вопросы ГИС на основе ВИЭ и экологические потенциалы практически не изучены [3, 8—11, 20].

Началом моей работы в этом направлении стала инициатива по использованию солнечных энергетических установок в пустынной зоне Каракумы. Так как потенциал солнечных энергетических ресурсов на территории Туркменистана огромен [9—18], собранные различные характеристики баз данных в теоретическом, эмпирическом и практическом плане найдут свое применение в разработке ГИС [4, 10—19].

По типу информации и используемой для оценки целесообразности и выгоды использования солнечной энергетики можно выделить следующие направления:

- ✓ данные для оценки солнечных энергетических ресурсов (комплекс метеорологических и актинометрических, радиационных данных, описание энергетических данных о физических и химических характеристиках установки, предназначение установки, данные по социальной и экологической жизнедеятельности человека, населению и др.);

- ✓ технические характеристики потенциала солнечной установки (для расчетов предполагаемой выработки электрической и тепловой энергии);
- ✓ экономический потенциал (цены на энергию от традиционных и нетрадиционных источников в целях сравнения их выгоды, экономии органического топлива);
- ✓ энергетические балансы региона (предприятия, производящие энергоустановки на основе солнечной энергии, инвестиции в данную область, налоговые льготы на использование солнечной станции или установки; зарплаты работников объектов и т. д.);
- ✓ социальные предпосылки (занятость населения и потенциальные рабочие места при строительстве объектов на солнечной энергетической станции, соотношение новых рабочих мест и прогнозируемого объема вырабатываемой энергии, решение социально-бытовых условий, уменьшение негативных факторов, влияющих на здоровье населения за счет снижения вредных выбросов и т. д.);
- ✓ экологические аспекты (снижение вредных выбросов при использовании солнечной энергетической станции, снижение загрязнения окружающей среды, создание экобизнеса для продажи квоты и т. д.) [8—11, 15].

Исходя из поставленных задач в статье сделан упор на создание основ по использованию ГИС-технологий в солнечной энергетике Туркменистана.

Общие физико-географические условия Туркменистана. Туркменистан — нейтральное, независимое государство в Центральной Азии, расположенное между 35° 08' и 42° 48' северной широты и 52° 27' и 66° 41' восточной долготы, севернее гор Копетдага, между Каспийским морем на западе и рекой Амударья на востоке. Огромную территорию около 80 % занимает пустыня Каракумы и горы Копетдаг [1—2, 10, 11, 18].

Туркменистан обладает высоким энергетическим потенциалом. Строительство 1 км линий электропередач (ЛЭП) обходится государству в 18...25 тыс. долл. США, что экономически нецелесообразно, поэтому одним из перспективных направлений обеспечения энергией отдаленных населенных пунктов страны является использование ВИЭ.

По изученным данным на территории Туркменистана энергетический потенциал солнечной энергетики огромен и составляет: $4 \cdot 10^{15}$ кДж или $1,4 \cdot 10^9$ т условного топлива (т у.т.) в год.

Создание современной инфраструктуры на основе инновационных технологий и повышение роста сельскохозяйственного производства в пустынной зоне является одним из приоритетных направлений социально-экономического развития Туркменистана на долгосрочную перспективу [1].

Основные этапы создания ГИС карты солнечного потенциала Туркменистана

Характеристика солнечных энергоресурсов. Годовой приход прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность при ясном небе составляет 146...154 ккал/см², или 1699,4...1793 кВт/м², годовые суммы рассеянной радиации при безоблачном небе составляют 32...39 ккал/см², или 372,3...453,9 кВт/м². Незначительная нижняя облачность снижает поступление прямой солнечной радиации всего на 27...35 % от возможной и в то же время увеличивает рассеянную радиацию на 25...40 %. В результате при реальных условиях облачности годовой приход суммарной радиации уменьшается по сравнению с возможным на 13...19 % и колеблется в пределах 145...163 ккал/см² или 1687,7...1897,2 кВт/м² [9—18].

Для создания основы ГИС-карты солнечного энергетического потенциала проделан целый ряд научно-исследовательских работ [4, 7—9, 10]:

- математические операции и расчеты солнечного потенциала;
- распределение солнечной радиации по регионам страны;
- временные зависимости по сезонам года;
- распределение удельной мощности интенсивности радиационного потока на территории Туркменистана;
- расчет коэффициента полезного действия различных солнечных электрических установок в зависимости от назначения.

При принятии решений использования ГИС и ГИС-технологий на основе ВИЭ и составлении проектно-сметной документации необходимо технико-экономическое обоснование.

Обоснование базы данных и принятие решения о строительстве энергетических объектов на основе ВИЭ на территории регионов Туркменистана разделили на три этапа:

- 1 — средняя оценка ресурсообеспеченности региона;
- 2 — выделение перспективных площадей региона;
- 3 — выбор конкретного участка зоны (в рамках перспективных площадей) с учетом требований к энергетическому объекту (в данном случае пустыню Каракумы).

Применение геоинформационных технологий необходимо и эффективно на втором этапе [7—10, 12, 21].

Солнечные энергетические потенциалы. *Валовый потенциал солнечной энергии* — это средняя многолетняя суммарная солнечная энергия, поступающая на площадь региона в течение одного года.

Суммарное поступление солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в год за 10 ч в сутки (7...17 ч), оказывается

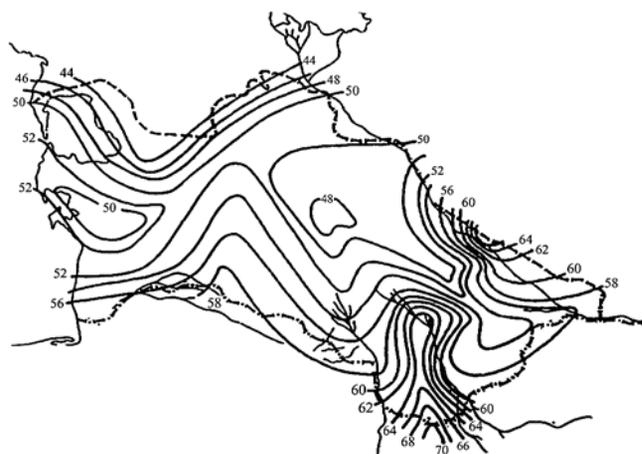


Рис. 1. Солнечный энергетический радиационный баланс Туркменистана (ккал/см² в год)

равным 1895,9 кВт·ч/(м²·год), валовый потенциал Юго-восточных Каракум равен 1895,9 кВт·ч/год, Центральных Каракум — 1844,6 кВт·ч/(м²·год) [4—10]. На рис. 1 представлены обработанная карта солнечной энергетической радиации для базы данных ГИС Туркменистана [7—11, 17—20].

Технический потенциал солнечной энергии — это сумма потенциалов тепловой энергии и электрической энергии, получаемых соответствующим преобразованием солнечного излучения. Расчет технического потенциала тепловой энергии, электроэнергии проводится по соответствующим формулам, он равен, соответственно, 1256,44 и 242,43 кВт·ч/(м²·год). Распределения валового и технического потенциалов солнечной энергии от преобразования в тепловую и электрическую энергию в Каракумах по месяцам на 1 м² приведены на рис. 2 [9—15, 18].

Экономический потенциал солнечной энергии — это величина годовой выработки тепловой и электрической энергии в регионе от солнечного излучения, получение которой экономически оправданно для

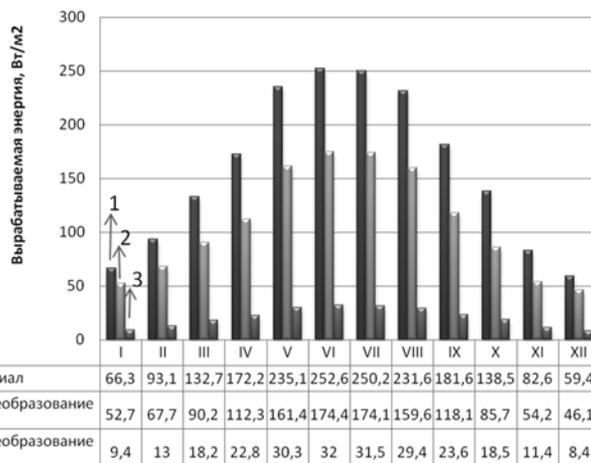


Рис. 2. Распределения валового и технического потенциалов солнечной энергии от преобразования в тепловую и электрическую энергию в Каракумах по месяцам на 1 м²

Экологический потенциал солнечно-энергетических установок в Туркменистане

Наименование установки	Эквивалент, кВт/ч	SO ₂ , т/год	NO _x , т/год	CO, т/год	CH ₄ , т/год	CO ₂ , т/год	Твердые вещества
Биогаз установка (26 МДж)	7,22	6,07E-05	3,23E-05	4,19E-06	8,81E-06	0,0046	6,29E-06
Гелиокомплекс (1,8 т у.т.)	2094,94	0,0174	0,0093	0,0012	0,0025	1,3397	0,0018
Безотходный гелиобиотехнологический комплекс (584,1 МДж)	162,24	0,0013	0,0007	9,43E-05	0,0002	0,1037	0,0001
Гелиоустановка выкашивания хлореллы (30 тыс. т у.т.)	34 915 713,3	290,29	156,31	20,31	42,63	22 329,82	30,45
Гелиосушилки (540 млн т у.т.)	628 482 857,1	5225,18	2813,56	365,39	767,33	401 936,7	548,09
Гелиоопреснители (2512 МДж)	697,76	0,0058	0,0031	0,00040	0,00085	0,446	0,00061

региона при существующем уровне цен на энергию, получаемую от традиционных источников, и соблюдении экологических норм. Экономический потенциал солнечной энергии представляет сумму экономических потенциалов составляющих его зон [3, 9–18].

Экономический потенциал тепловой энергии равен 1378,102 кВт · ч/(м² · год). Экономический эффект от преобразования солнечного излучения в тепловую, электрическую энергию положителен и соответственно равен 588,56 кВт · ч/год при КПД 0,5; 248,5 кВт · ч/(м² · год) при КПД 14 % [3, 9–18].

Экологический потенциал от преобразования солнечной энергии. Экологический потенциал ВИЭ — часть технического потенциала, преобразование которого в полезную энергию целесообразно при данном уровне сокращения вредных выбросов в окружающую среду от ископаемого, органического топлива [6, 11–16].

Экологический потенциал солнечной энергии характеризует сумму экономических потенциалов тепловой и электрической энергии, получаемых соответствующим преобразованием солнечного излучения [6–16, 18].

В итоге ожидаемое сокращение выбросов различных вредных веществ в окружающую среду в Туркменистане при использовании солнечной фотоэлектрической станции составит: при годовой выработке электроэнергии с 1 м² 242,44 кВт · ч/год экономия расхода топлива составит 96,98 кг у. т./год, сокращение выбросов (кг/год) диоксида серы SO₂ — 2,01; оксида азота NO_x — 1,08; оксида углерода CO —

0,1401; метана CH₄ — 0,296; двуокиси углерода CO₂ — 155,08; твердых веществ — 0,211175; от преобразования в тепловую энергию 1256,44 кВт · ч/год экономия расхода топлива составит 502,60 кг у. т./год, сокращение выбросов (кг/год) SO₂ — 10,44; NO_x — 5,624; CO — 0,726; CH₄ — 1,53; CO₂ — 803,68; твердых веществ — 1,094 [11–18].

При составлении ГИС-карты влияние вводимых источников энергии на экологию региона может быть учтено введением в удельную стоимость получаемой энергии относительных расходов на компенсацию вредных последствий ввода единицы энергии того или иного источника в регионе.

Таким образом, с учетом регионального фактора стоимости топлива и регионального экологического фактора срок окупаемости и экономический эффект использования солнечной установки в общем случае определяются включением коэффициента регионального экологического фактора в механизм чистого развития Киотского протокола Маракешского соглашения экологического бизнеса продажи квотами [10–18].

На рис. 3 представлены результаты расчетов экологического потенциала солнечного фотоэлектрического преобразователя по велоятам (областям) Туркменистана сокращения CO₂ с 1 м² по месяцам года. В таблице приведены экологический потенциал солнечно-энергетических установок в Туркменистане для создания ГИС и ГИС-технологии на основе солнечных энергетических установок.

Теоретическое и методическое определения потенциалов солнечной энергии региона подробно представлены в научных трудах [11, 12–18].

Определение оптимального угла наклона солнечных приемников в Туркменистане. Расчеты показывают, что наиболее эффективное значение имеет угол наклона 60° в январе, феврале, ноябре, декабре; угол 30° с апреля по сентябрь; угол 45° — март, октябрь [3, 11–18].

Эмпирические солнечно-энергетические ресурсы Туркменистана

Продлав обработку метеорологических данных и ряд математических преобразований и разлагая результаты преобразования в ряды Фурье, нашли эмпирическую формулу радиационных режимов по регионам страны.

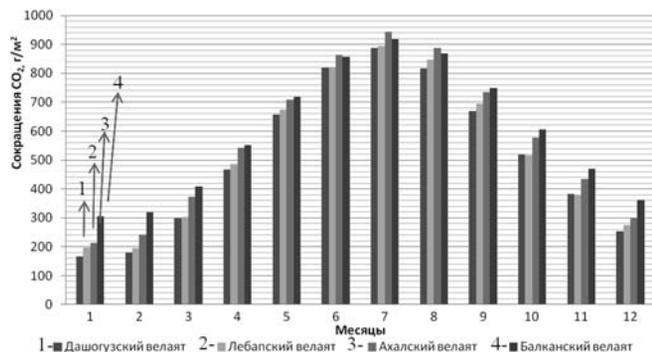


Рис. 3. Экологический потенциал солнечного фотопреобразователя по велоятам (областям) Туркменистана сокращения CO₂ с 1 м² по месяцам года

В итоге получили выражение средней солнечной энергии (I) в течение года (τ) в виде рядов Фурье.

Для северного Дашогузского вейаята (области):

$$I = 466,25 + 317,8\cos(0,26\tau - 0,058) + 24\cos(0,52\tau + 1,0) + 11,2\cos(0,78\tau - 0,244). \quad (1)$$

Для восточного Лебапского вейаята (области):

$$I = 478,1 + 317,5\cos(0,26\tau + 0,059) + 23,7\cos(0,52\tau + 0,691) + 11,2\cos(0,78\tau - 1,46). \quad (2)$$

Для центрального Ахалского вейаята (области):

$$I = 519,1 + 320,3\cos(0,26\tau + 0,05) + 11,8\cos(0,52\tau + 0,938) + 16,0\cos(0,78\tau + 0,402). \quad (3)$$

Для западного Балканского вейаята (области):

$$I = 542,57 + 276,8\cos(0,26\tau - 0,066) + 15,9\cos(0,52\tau + 0,586) + 2,9\cos(0,78\tau - 0,08). \quad (4)$$

Используя технический потенциал солнечной энергии для фотоэлектрического преобразования с КПД 10...12 % (мы взяли в среднем 11 %), получим выражения (1)—(4) в следующем виде.

Для северного Дашогузского вейаята:

$$I = 51,28 + 34,96\cos(0,26\tau - 0,058) + 2,64\cos(0,52\tau + 1,0) + 1,23\cos(0,78\tau - 0,244). \quad (5)$$

Для восточного Лебапского вейаята:

$$I = 52,59 + 34,92\cos(0,26\tau + 0,059) + 2,61\cos(0,52\tau + 0,691) + 1,23\cos(0,78\tau - 1,46). \quad (6)$$

Для центрального Ахалского вейаята:

$$I = 57,1 + 35,23\cos(0,26\tau + 0,05) + 1,29\cos(0,52\tau + 0,938) + 1,7\cos(0,78\tau + 0,402). \quad (7)$$

Для южного Балканского вейаята:

$$I = 59,66 + 30,45\cos(0,265 - 0,066) + 1,7\cos(0,52\tau + 0,586) + 0,32\cos(0,78\tau - 0,08). \quad (8)$$

В итоге получены эмпирические формулы с учетом валового, технического и экологического потенциалов солнечной энергии по регионам Туркменистана, с помощью которых можно математически описать энергетическое и экологическое прогнозирование ГИС. Эти результаты могут дать прогноз по вейаятам Туркменистана о возможности экономии электроэнергии и сокращения выбросов CO_2 с 1 м^2 при преобразовании солнечной энергии в электрическую, а также рассчитать энергетический потенциал гелиотехнических установок, оборудования, сооружений [9—18].

Заклучение

Из рассмотренного обзора можно сделать следующие выводы.

1. На основании теоретических исследований и методических расчетов солнечно-энергетических ресурсов с учетом интенсивности солнечного излучения, альбедо, географических, климати-

ческих и неблагоприятных погодных условий получены энергетические потенциалы на 1 м^2 Юго-восточных Каракум: валовый потенциал — $1895,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; технический потенциал преобразования в тепловую энергию — $1296,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$, в электрическую энергию — $248,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

2. Экологический потенциал солнечно-энергетических установок в Туркменистане представлен в таблице. На основании теоретических и исследовательских работ по использованию солнечно-энергетических установок можно составить проектные предложения для экобизнеса продажи квот углеродному фонду Всемирного банка.

3. На основании математических преобразований получены эмпирические формулы с учетом валового, технического, экологического потенциалов солнечной энергии по регионам Туркменистана, с помощью которых можно прогнозировать энергетический, экономический и экологический потенциалы гелиотехнических установок, оборудования, сооружений для составления технологических баз ГИС данных областей Туркменистана.

4. Учитывая результаты изложенных расчетов потенциалов солнечно-энергетических ресурсов в Туркменистане, можно решать энергетические и социально-экономические проблемы регионов, удаленных от централизованных энергосистем, поселков, населенных пунктов, объектов дайханских и пастбищных хозяйств, формально находящихся в зонах централизованного энергоснабжения, но экономически труднодоступных местностях. Другим существенным фактором использования солнечных энергетических ресурсов является возможность сохранения экологической безопасности и улучшение экосистемы региона.

Список литературы

1. Бердымухамедов Г. М. Государственное регулирование социально-экономического развития Туркменистана. Т. 1. Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2010.
2. Бабаев А. Г., Курбанов О. Р. Физическая география Туркменистана: учеб. пособие. Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2014.
3. Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. Солнечная энергетика. М.: МЭИ, 2008. 276 с.
4. Дьяченко Н. В. Использование ГИС-технологий. URL: <http://homepage.buryatia.ru/rmeic/gis.htm>
5. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблемах окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
6. Лозановская И. Н., Орлов Д. С., Садовникова Л. К. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Наука, 1998.
7. Нефедова Л. В. Структура базы данных по малой гидроэнергетике в рамках разработки ГИС "Возобновляемые источники энергии России" // Труды 6-й междунауч.-техн. конф. "Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве". Ч. 4. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. С. 314—322.
8. Новаковский Б. А., Прасолова А. И., Киселева С. В., Рафикова Ю. Ю. Геоинформационные системы по возобновляемой энергетике // Труды 6-й междунауч.-техн. конф. "Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве". Ч. 4. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. С. 314—322.

9. Пенджиев А. М. Геоинформационная технология использования возвратных вод Туркменского озера "Алтын асыр" // Альтернативная энергетика и экология — ISJAEЕ. 2014. № 13. С. 129—150.

10. Пенджиев А. М. Изменение климата и возможности уменьшения антропогенных нагрузок. Международное изд-во: LAMBERT Academic Publishing, Deutschland / Германия, 2012. 168 с.

11. Пенджиев А. М. Экологические проблемы освоения пустынь. Международное изд-во LAMBERT Academic Publishing, Deutschland / Германия, 2014. 226 с.

12. Пенджиев А. М. Ожидаемая эколого-экономическая эффективность использования фотоэлектрической станции в пустынной зоне Туркменистана // Альтернативная энергетика и экология — ISJAEЕ. 2007. № 5. С. 135—137.

13. Пенджиев А. М. Экоэнергетические ресурсы солнечной энергии в странах содружества независимых государств // Альтернативная энергетика и экология — ISJAEЕ. 2013. № 5. С. 13—30.

14. Пенджиев А. М. Возобновляемая энергетика и экология (обобщение статей) // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология". 2014. № 08 (148). С. 45—78.

15. Пенджиев А. М. Механизм чистого развития: приоритеты энергоэффективности в Туркменистане // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология". 2009. № 10 (78). С. 142—148.

16. Пенджиев А. М. Перспективы альтернативной энергетики и ее экологический потенциал в Туркменистане // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология". 2009. № 9 (77). С. 131—139.

17. Пенджиев А. М. План действия и стратегия внедрения в возобновляемую энергетику // Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология". 2013. № 16 (138). С. 39—60.

18. Стребков Д. С., Пенджиев А. М., Мамедсахатов Б. Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. 498 с.

19. Федоров М. П., Романов М. Ф. Математические основы экологии. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. 156 с.

20. URL: <http://www.gis.u>

A. M. Penjiyev, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Turkmen state architecturally-building institute, Turkmenistan, Ashkhabad, e-mail: ampenjiyev@rambler.ru,
M. A. Penjiyev, Engineer, "Ashproekt"

Geoinformation Systems in Solar Power of Turkmenistan

In article bases of use of geoinformation system and technology which will allow operatively and to analyze in detail available the geographical adhered information of various alternative power variants are put in pawn. Will estimate possibilities of use of solar power resource; to create a database in the field of power supply in difficultly accessible remote settlements of the country, and also marketing of ecological business on sale of quotas. By means of theoretical calculations the empirical equations are deduced, the card of solar power resources for GIS is made and power, economic, ecological potentials various solar power stations for realisation of government programs of Turkmenistan on the basis of renewed sources of power are proved.

Keywords: renewed power, solar power, geoinformation systems, technologies, power efficiency, ecology, ecological business, Turkmenistan

References

1. Berdymuhamedov G. M. *Gosudarstvennoe regulirovanie sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Turkmenistana*. Ashabad: Turkmen-skaya gosudarstvennaya sluzhba, 2010, vol. 1.

2. Babaev A. G., Kurbanov O. R. *Fizicheskaya geografiya: ucheb. posobie*. Ashabad: Turkmen-skaya gosudarstvennaya sluzhba, 2010.

3. Vissarionov V. I., Derugina G. V., Kuznisova V. A., Malinin N. K. *Solnechnaya energetika*. Moscow: MEI, 2008. 276 p.

4. Dyachenko N. V. *Ispolzovanie GIS-tehnologi*, URL: <http://homepage.buryatia.ru/rmeic/gis.htm>

5. Marcuk G. I. *Matematicheskoe modolirovaniya w problemah okrujayushhey sredy*, Moscow: Nauka 1982, 320 p.

6. Lozanowskaya I. N., Orlov D. S., Sadownikowa L. K. *Ekologiya i ohrana biosfery pri himicheskoy zagryaznenii*, Moscow: Nauka, 1998.

7. Nefedowa L. W. Структура базы данных по малой гидроэнергетике в рамках разработки GIS. *Wozobnowlyaemye istocniki energii Rossi*. Tr. 6-y mezd. nauch.-then. konf. Energoobespecenie i energosberejenie v selskom hozyastwe. Ch. 4 Moscow: GNU WIESH, 2008, pp. 314—322.

8. Nowakowskij B. A., Prasolowa A. I., Kiselewa S. B., Rafikowa Yu. Yu. *Geoinformacionnye sistemy po wozobnowlyaemoy energetiki*. Tr. 6-y mezd. nauch.-then. konf. Energoobespecenie i energosberejenie v selskom hozyastwe. Ch. 4. Moscow: GNU WIESH, 2008, pp. 323—329.

9. Penjiyev A. M. Геоинформационная технология использования возвратных вод Туркменского озера Алтын асыр. *Альтернативная энергетика и экология* — ISJAEЕ, 2014, no. 13, pp. 120—150.

10. Penjiyev A. M. *Izmeneniye klimata i wozmoznasty umenyshe-niya antropogennyh nagruzok*. Mejdunarodoe Izd-vo. LAMBERT Academic Publishing, Deutschland, 2012, 168 p.

11. Penjiyev A. M. *Ekologiceskie problem oswoeniya pustyn*, Mejdunarodoe Izd-vo, LAMBERT Academic Publishing, Deutschland / Germaniya, 2014, 226 p.

12. Penjiyev A. M. Экоэнергетические ресурсы солнечной энергии в странах содружества независимых государств. *Mejdunarodnyi nauchny журнал "Альтернативная энергетика и экология"* — ISJAEЕ, 2013, no. 5, pp. 13—30.

13. Penjiyev A. M. Ожидаемые эколого-экономические эффективность использования фотоэлектрической станции в пустынной зоне Туркменистана. *Mejdunarodnyi nauchny журнал "Альтернативная энергетика и экология"* — ISJAEЕ, 2013, no. 5, pp. 135—137.

14. Penjiyev A. M. Возобновляемая энергетика и экология (обобщение статей). *Mejdunarodnyi nauchny журнал "Альтернативная энергетика и экология"*, 2014, no. 08 (148), pp. 28—52.

15. Penjiyev A. M. Механизм чистого развития: приоритеты энергоэффективности в Туркменистане. *Mejdunarodnyi nauchny журнал "Альтернативная энергетика и экология"*, 2009, no. 10 (78), pp. 142—148.

16. Penjiyev A. M. Перспективы альтернативной и ее экологический потенциал в Туркменистане. *Mejdunarodnyi nauchny журнал "Альтернативная энергетика и экология"*, 2009, no. 9 (77), pp. 131—139.

17. Penjiyev A. M. План действия и стратегия внедрения в возобновляемую энергетику. *Mejdunarodnyi nauchny журнал "Альтернативная энергетика и экология"*, 2013, no. 16 (138), pp. 39—60.

18. Strebkov D. S., Penjiyev A. M., Mametsahatow B. D. *Razwitiya solnechnoi energy w Turkmenistane*, Moscow: GNU ВИЭСХ, 2012. 498 p.

19. Fedorov M. P., Romanov M. F. *Mathematicheskije osnovy w ecologi*. SPb.: Publishing house SpbGtU, 1999, 156 p.

20. URL: <http://www.gis.su>

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА COMPUTER GRAPHICS

УДК 004.3

А. Б. Барский, д-р техн. наук, проф., e-mail: arkbarsk@mail.ru,
Московский государственный университет путей сообщения

"Живое" моделирование и объемная экранизация

Исследуются проблемы разработки реагирующих объектов "живого" моделирования для дополнительного, наглядного мониторинга сложных управляющих систем, служащего минимизации влияния "человеческого фактора". Возможно использование как робототехнических, так и информационных технологий. В основе средств реагирования используются логические нейронные сети. Компьютерная графика для "живого" моделирования должна учитывать возможность динамического управления объектами с помощью "мышц" и "костей". Объемный экран может быть построен на основе пакета прозрачных мониторов, реализующих срезы трехмерного изображения. Возможно применение декартовой, сферической и цилиндрической систем координат. Анализируется экспериментальное построение объемного изображения с помощью пакета пленок в декартовой системе координат. Обсуждается изображение в объемном экране, составленном из вложенных прозрачных цилиндров. Приведены принципиальные схемы мониторинга, отображающие процессы задания ситуации на рецепторах, возбуждения нейронов с помощью функции активации, формирования сценария действий объекта. Рассматривается возможность применения реагирующих объектов для публичной демонстрации прогноза погоды. С каждым прозрачным монитором связан управляющий процессор. Процессоры образуют вычислительную систему, работающую по технологии "Single Program — Multiple Data".

Ключевые слова: "живое" моделирование, реагирующий объект, логическая нейронная сеть, прозрачный монитор, объемный экран

Введение

Уходя от религиозно-философских напластований в область математической строгости ограничений, введем следующее определение:

Живым назовем объект, адекватно реагирующий на поступающую информацию.

Такое определение сужает, конкретизирует и формализует задачу построения реагирующих объектов, где реагирование проявляется эмоционально и действенно. Вместе с тем это определение является достаточно общим и не зависит от технологии изготовления объекта: "мясной", механической, электронной, программной и пр.

Адекватность реагирования обеспечивается обучением (самообучением) и соответствует целевым задачам "жизни", условиям существования и применения. Говоря строго математически, реагирование обеспечивает *оптимизацию* некоторой *целевой функции*: выживания, счастья, удовольствия, формирования новых знаний, предсказания, диагностики (мониторинга), предупреждения об опасности и т. д. Самый распространенный жизненный критерий основан на понятиях "хорошо — плохо".

Следует выделить две задачи моделирования "живого" объекта.

1. Построение алгоритмов распознавания ситуации и адекватного реагирования в соответствии с целью создания объекта.

2. Визуальное обеспечение объекта: он должен быть "видимым", т. е. реально существующим.

Основным средством решения первой задачи является логическая нейронная сеть [1—6], в наибольшей степени воспроизводящая принцип работы мозга. В динамике наблюдения за ситуацией логическая нейронная сеть способна вырабатывать решения, изменяющие движения, поведение или эмоциональное состояние объекта. Это служит наглядным средством предупреждения диспетчера или ЛППР — лица, принимающего решение, о состоянии управляющей системы или приближении нештатной ситуации. Очевидно, что обучение реагирующего объекта должно учитывать максимум диагностической информации.

Решение второй задачи могло бы быть ограничено должным развитием робототехники. Однако информационные технологии обеспечивают универсальность применения, неограниченное расширение диапазона действий объекта, возможность недорогого тиражирования и оперативность модификации. Это требует создания привлекательных объемных экранов, допускающих внешний обзор с различных ракурсов и обеспечивающих стереоэффект.

1. Основы компьютерной графики для реагирующих объектов

1.1. Существующие подходы. Основной задачей современной компьютерной графики, предназначенной для анимации, является отображение объемных объектов на плоском экране. Применяемые эффекты создают впечатление с ограниченного ракурса: решаются проблемы видимости и скрытости элементов изображения, демонстрации перспективы и освещения. Как правило, анимация использует заранее известные сцены, весьма ограничивая альтернативное развитие сюжета и практически не допускает динамического, оперативного вторжения в развитие сценария.

Непредсказуемость сцен, возникающая при имитации реакции моделируемого объекта на внешние воздействия, может потребовать огромного, практически нереализуемого, числа предполагаемых возможных сцен без какой-либо их интерполяции. Для ограниченного использования Л. Милютин в работе [3] проиллюстрировал такую возможность. Однако построение реального объекта в памяти компьютера требует задания ряда рычагов — "мышц" и "костей" [2], которые способны деформировать или видоизменить объект в соответствии с поступающими извне командами, использующими коэффициент сжатия, позволяют имитировать любое, в том числе непредсказуемое, движение объекта, а также его перемещение и вращение.

Известны два подхода к созданию динамически управляемого механизма анимационной компьютерной графики: скелетный и мышечный. Первый равносителен воздействию на отдельные кости скелета, заставляющие его двигаться. В работе [4] подробно рассмотрена возможность использования скелетного механизма. На основе указанных принципов автор разработал уникальную систему компьютерной графики для "живого" моделирования. Однако работа им была прервана, результаты оказались неопубликованными.

Мышечный механизм [2] основан на том, что все живое двигается, меняет положение, деформируется и выражает эмоции с помощью мышц, умеющих сокращаться и расслабляться. Применяя невидимые мышцы, расположенные вне объекта, можно легко имитировать угловые перемещения в суставах, свойственные скелету.

1.2. Модель трехмерной памяти. Назовем ячейку, занятую минимальным элементом объекта, точкой этого объекта. Точка должна содержать информацию о цвете (пиксель) и коэффициенте освещенности.

Пусть адресное пространство компьютера, отведенное для модели трехмерной памяти, при сквозной линейной адресации ячеек с нуля, определяется N разрядами. Адрес разбивается на три части (рис. 1).

Здесь x, y, z — координаты точки в трехмерной памяти.

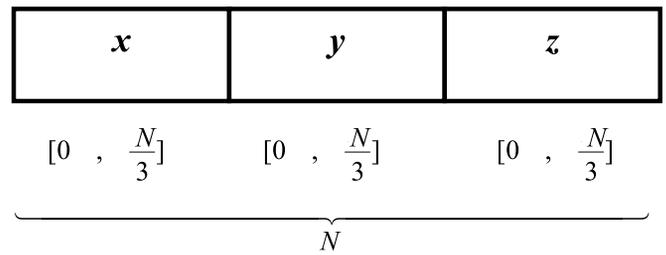


Рис. 1. Преобразование линейного адреса в трехмерный

Трехмерная память (в данном случае — кубическая) в виртуальной линейной памяти компьютера задается массивом $M[0:N; 0:N; 0:N]$ переменных с индексами $m[x, y, z]$. Линейный адрес $\langle m[x, y, z] \rangle$ точки объекта рассчитывается так: $\langle m[x, y, z] \rangle = C + x + yN + zN^2$, где C — базовый адрес массива.

Тогда задача имитации движения — деформации или перемещения объектов — превращается в задачу нахождения новых значений индексов для каждой переменной, являющейся точкой объекта.

1.3. Процедуры "мышечных" преобразований.

Пусть объект в трехмерном пространстве задан своей оболочкой. Каждый элемент оболочки является точкой. Оболочка формируется при создании объекта. В общем случае объект может быть заполнен значащей информацией и внутри, если его вид в разрезе интересует пользователя (например, в медицине).

Пользователем — разработчиком задаются "мышцы" (далее кавычки опустим) как рычаги управления деформацией объекта в *центральной системе координат*. Мышца задается координатами начала и конца, а также *точкой неподвижности*, относительно которой возможно ее сокращение. Точка неподвижности может совпадать с началом или концом мышцы. По умолчанию точка неподвижности является серединой мышцы. Мышца не обязательно связывает точки оболочки. В общем случае она может располагаться внутри и даже вне объекта, принадлежать ему и влияя на его деформацию. Мышцы объекта являются невидимыми, входящими в список мышц данного объекта и допускающими реакцию на приказы извне.

Взаимодействие мышцы с объектом осуществляется с учетом его свойств. Ведь сокращаясь, мышца должна увлекать точки объекта или только его оболочку, имитируя деформацию всего объекта. Для ограничения такой деформации (например, чтобы нижняя губа не потянула за собой верхнюю губу) используются *разрезы*.

Сокращение твердого тела определяется коэффициентом сжатия (растяжения) объекта.

Вязкое тело, внутри которого сокращается мышца, характеризуется "затуханием" значения смещения точки объекта с увеличением ее расстояния до мышцы.

Сокращение вязкой и упругой среды, такой как резина, губка, упитанные щеки и др., обычно сопровождается явлением, которое можно назвать попыткой сохранения объема в результате выпучивания. При сокращении мышцы это означает, что перенос клеток объекта вдоль мышцы обретает перпендикулярную составляющую, тем меньшую, чем больше расстояние до мышцы.

Для имитации вращательных движений используются шарниры — аналог суставов. Координаты шарнира задаются точной внутри объекта. Вводится мышца, связывающая лучи (элементы скелета), исходящие из центра шарнира. Сокращение мышцы должно вызывать видимость ходьбы, движения рук и т. д. Это требует таких деформаций объектов, при которых его клетки, облегающие эти лучи, или только клетки оболочки, несущие в себе данные лучи, сближаются вместе с лучами, не приводя к дополнительной деформации.

Взаимодействие многих объектов требует наличия центральной системы координат, в которой происходят все перемещения объектов относительно друг друга, и систем координат, связанных с каждым объектом — объектовых систем координат. Объект создается в его объектовой системе координат. Его движения "относительно себя" — сокращение мышц, повороты, вращение — удобнее наблюдать в связанной с ним объектовой системе координат. Таким образом, центральная система координат должна быть связана матрицами пересчета со многими объектовыми системами.

1.4. Внешнее воздействие. Необходимость внешнего воздействия на объект обусловлена не только взаимодействием различных объектов, но и созданием инструментов формирования, "ваяния" объекта. Идея такого ваяния заключается в следующем.

Первоначально формируется некоторая заготовка, имеющая наиболее близкую форму для желаемого объекта (например, шар, — для формирования головы). Приближая к заготовке объект-"инструмент", например молоток, необходимо потребовать, чтобы при угрозе прикосновения к объекту, ближайшие его клетки отступали, и оболочка, продавливаясь, принимала форму проникающего инструмента. Эта операция напоминает ковку или штамповку. Таким многократным воздействием с разных сторон можно добиться любой формы объекта.

Можно допустить не только вдавливание инструмента в объект, но и вытягивание близлежащей области, подобно нарыву. В этом случае после прикосновения с объектом следует отводить инструмент от него. Близкая область оболочки должна вытягиваться вслед за инструментом.

Если не деформировать оболочку, а позволить инструменту проникать в объект, то подобное действие сравнимо с действием ножа. Так от объекта можно отсекал части для последующего уничтожения или создания новых объектов.

1.5. Построение объектов. Для построения объектов целесообразно воспользоваться тремя координатными проекциями, подобно *3D-MAX*. Сначала в одной из проекций рисуется пока неточный, предполагаемый разрез объекта. На других проекциях автоматически сформируются отрезки — боковые проекции этого разреза. На разрезе определяется точка для дальнейшей деформации объекта в двух других проекциях. Проекция этой точки высвечивается на двух других проекциях.

Подведя мышшь к одной из проекций точки, следует повести ее (мышшь) вверх или вниз, формируя выпуклость вслед за этим движением так, чтобы первоначально заданная плоская поверхность образовала выпуклость. Так сформируется объемное изображение. Если при этом придерживать клавишу *control* (или другим способом), плоская поверхность сохранится для замкнутости объема или для последующей аналогичной деформации в ту или другую сторону.

Повороты получившейся объемной фигуры позволяют выполнять указанным способом различные деформации.

1.6. Командно-программное управление объектами. Необходимо помнить, что объекты в трехмерной памяти создаются для их визуального восприятия. Система визуализации может базироваться на проецировании видимой поверхности всех объектов, включая фон, на плоскость $z = z_{\max}$ в центральной системе координат. Эта плоскость и представляет экран. Значит, каждая прямая, исходящая из точки (x_i, y_i, z_{\max}) и перпендикулярная экрану, продолжается (здесь рассматриваем только прозрачную среду) до первого пересечения с одним из объектов или с фоном. Полученная точка обеспечивает изображение в данной текущей точке экрана.

Для получения различных (томографических) срезов экран может формироваться и в других плоскостях вида $z = a \geq 0$.

Введение мышц, шарниров, объектовых систем координат позволяет программировать действия объектов и их взаимное расположение. Программа создается на базе командного языка, содержащего инструкции вида:

<сократить мышцу m с $l = 0,8$ >;

<повернуть объект P по матрице преобразования S >;

<приблизить объект P >;

<перенести объект P >;

<показать срез $z = 5$ > и т. д.

Таким образом можно планировать и исполнять сцены, основанные на имитации движения объектов, их мимики, преобразования и т. д.

При программировании поведения объектов учитывается длительность выполнения действий, их инерционность, предшествующие команды управления.

Все построения для трехмерной управляемой анимации в упрощенном варианте пригодны и для "плоской" анимации. Связанные с этим проблемы также рассмотрены в работе [3]. На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) показано возможное выделение мышц для некоторых простых движений как "плоского", так и объемного объекта. Вне объекта обозначены невидимые мышцы. На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) показан достаточный набор мышц для эмоциональных выражений на "плоском" лице.

2. Динамическое управление объектом с помощью логической нейронной сети

2.1. Мониторинг сложной системы управления.

Пусть объект в компьютерном или материальном воплощении наделен некоторым фоновым поведением, реализуемым программно. Такое поведение,

например, аналогично поведению зверя в клетке, нервно дефилирующего вдоль решетки. Целесообразно в программе использовать и элементы случайности на основе датчика случайных чисел (ДСЧ). Это может ввести разнообразие в фоновое поведение объекта: внезапный поворот головы, смена направления движения и т. д. Такое поведение уже само по себе является занимательным.

Однако представим себе, что фоновая программа предусматривает периодическое прерывание для переключения "внимания" объекта на внешнюю обстановку — на "картинку", циклически вводимую в его память с помощью видеоввода, или на векторы, формируемые на основе множества датчиков сложной системы отображения и управления гидроэлектростанцией. На рис. 4 представлена возможная схема мониторинга производственного процесса. Для однозначности выводов используются полуоткрытые интервалы.

Рекомендуемая функция активации нейрона выражается следующими формулами:

$$V := \frac{\sum_j \omega_j V_j}{\sum_j \omega_j};$$

$$V_i := \begin{cases} V, & \text{если } V \geq h, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Здесь V_i — искомое значение возбуждения i -го нейрона; V_j — значение возбуждения j -го нейрона (в данном случае — рецептора), связанного с i -м; ω_j — вес этой связи. (Значение j "пробегает" по всем нейронам-рецепторам, связанным с данным, так, что значение V , в соответствии с известной формулой нахождения математического ожидания, определяет среднее значение сигнала, поступившего на i -й нейрон.)

Применение весов позволяет в разной степени оперативно учитывать и изменять в процессе эксплуатации влияние различных факторов или их значений на реакцию объекта.

Порог h выбирается экспериментально для подавления слабых возбуждений и упрощения дальнейшей обработки результатов при включении логической нейронной сети в длинные логические цепочки.

Рецепторы могут быть закреплены и за текущим расчетом надежности, и даже за характеристиками личного состава.

Вместо соответствия интервалам, как принято выше, рецепторы могут соответствовать конкретным значениям факторов. Это актуально, если система принятия решений реагирующего объ-

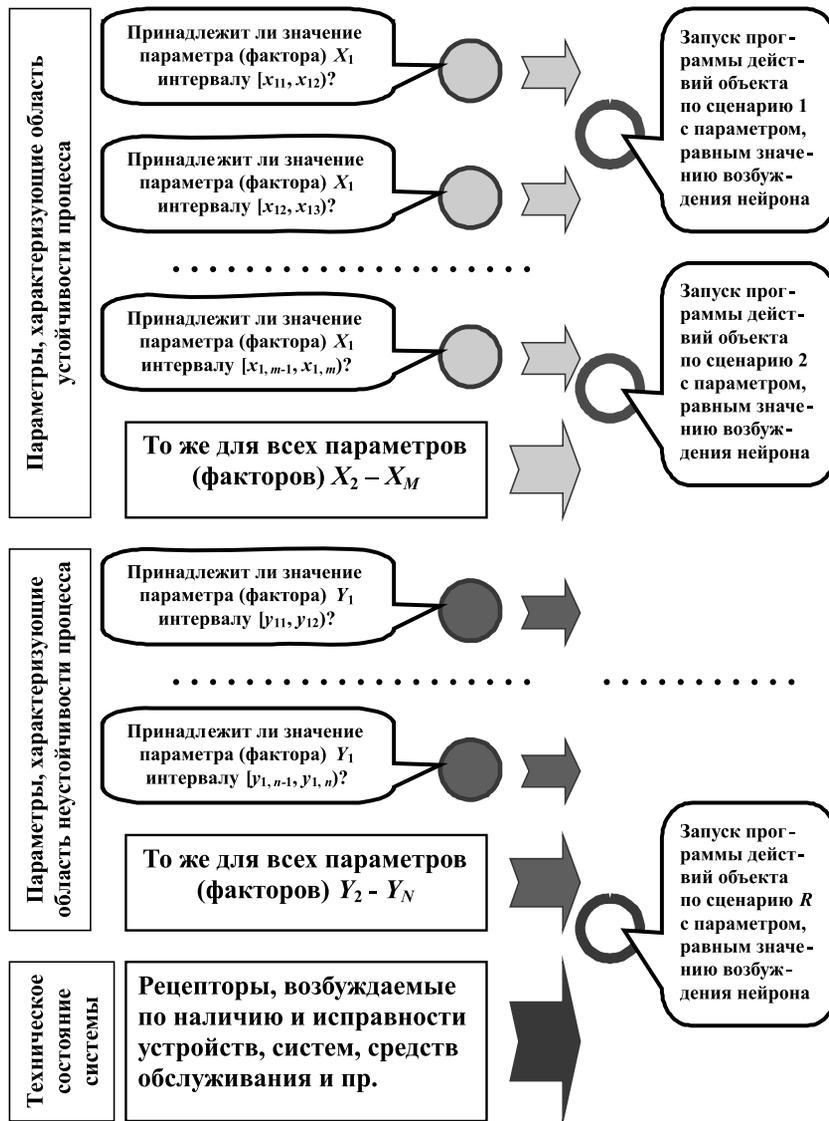


Рис. 4. Схема "живого" мониторинга производственного процесса

екта построена на основе экспериментальных данных на развиваемом множестве точек факторного пространства и использует данные разных типов (не только числа).

Каждый сценарий действий реагирующего объекта должен четко согласовываться с причиной, чтобы поведение объекта не вызывало противоречивых выводов. Например, один сценарий может предполагать помахивание правой передней лапой. Другой сценарий может использовать движение хвоста и т. д. Энергичность этих движений должна зависеть от значения возбуждения соответствующих нейронов, преобразованного в коэффициент сокращения мышц. Тогда одновременное проявление разных сценариев не вызовет у ЛПР недопонимания их причин.

Оператор, диспетчер или, в общем случае, ЛПР должны ознакомиться с инструкцией, чтобы не сомневаться в однозначности реакции объекта на то или иное событие.

В общем случае логическая нейронная сеть работает по нечетким данным: измеренные или предполагаемые значения факторов не обладают достаточной точностью, или ситуация соответствует "промежуточной" точке, за значениями компонент которой не закреплены рецепторы. Тогда возбуждение рецепторов каждого фактора в каждом цикле мониторинга формируется распределением "единицы" между двумя "близкими" рецепторами, обратно пропорционально "расстоянию" испытываемого значения до значений (или интервалов), соответствующих этим рецепторам.

Важно отметить особенность данного применения логической нейронной сети. При поиске действий реагирующего объекта необязательно находить максимально возбужденный нейрон. В мультипрограммном режиме, т. е. практически одновременно, выполняются все решения, на которые указывают нейроны, преодолевшие порог возбуждения. В этом заключается смысл использования значения возбуждения нейронов в качестве параметров. В этом же — непредсказуемость поведения и необходимость динамического управления объектом компьютерной графики.

2.2. Объект туризма и развлечений. В работе [6] обсуждается идея создания парка фантазмагорий — радости и ужасов, населенного объектами "живого" моделирования и представляющего значительную привлекательность для туризма и бизнеса. Особо интересно участие экскурсантов в "представлении". Рассмотрим особенности применения логической нейронной сети для построения "живого" объекта развлечений.

Циклически включается программа анализа "картинки", питающая рецепторный слой нейросети. При обзоре "картинки", например отображающей группу туристов, может проводиться подсчет различных оттенков цветов в каждом элементарном

квадрате, обнаружение резких цветовых границ, наличие линий, кругов определенного цвета и т. д. (Е. Вахромцев на защите дипломного проекта, используя видеовход компьютера, демонстрировал мордочку, улыбающуюся при показе красного яблока и принимающую грустное выражение при виде зеленого перца.)

Ограничиваясь только цветом, можно представить примерный алгоритм реакции объекта.

"В квадрате i, j преобладает зеленый цвет" \wedge "отсутствуют резкие переходы в оттенках" \rightarrow "Запустить программу умиротворения";

"В квадрате i, j преобладает зеленый цвет" \wedge "наблюдаются резкие переходы в оттенках" \rightarrow "Запустить программу тоски по лесным далям";

"В квадрате i, j преобладает голубой цвет" \wedge "наблюдаются темные крапления" \rightarrow "Запустить программу приветствия";

"В квадрате i, j преобладает красный цвет" \rightarrow "Запустить программу повторного обзора квадрата" \wedge "Запустить программу гнева";

"В квадрате i, j обнаружен круг с преобладанием темного цвета" \rightarrow "Запустить программу приветствия";

"В квадрате i, j преобладает коричневый цвет" \rightarrow "Запустить программу презрения";

"В квадрате i, j преобладает желто-оранжевый цвет" \rightarrow "Запустить программу радостного возбуждения" и т. д.

3. Объемная экранизация с помощью пакета прозрачных мониторов

3.1. Прямоугольное экранное пространство. Один из путей создания объемного экрана опирается на многочисленные сообщения о построении "прозрачного" монитора на основе нанотехнологий. Вне изображения монитор, представляющий собой твердую или мягкую пленку, остается прозрачным. Это наводит на мысль о возможности воспроизведения объема с помощью пакета таких пленок. Если на каждую пленку подавать видимый на ее уровне срез изображения, то представляется, что при достаточной плотности и толщине пакета, при большом количестве и малой толщине пленок, у зрителя может возникнуть эффект объемного изображения. При этом проектирование объемного изображения проводится в декартовой системе координат *Oxyz*, а зритель должен располагаться перед экраном.

На рис. 5 отображена попытка экспериментального воспроизведения объемного экрана с помощью бытовой полихлорвиниловой пленки. Рисунок назван "Всплывающая черепаха", так как недостаточная прозрачность пленки, уложенной в 18 слоев, не позволяет разглядеть концы лап на дне водоема. В то же время такое замутнение свидетельствует о наличии объема в данном эксперименте. К сожалению, при ручной работе видны некоторая нестыковка слоев, а также границы между послойным



Рис. 5. Всплывающая черепаха

разрезом бумажного изображения. Становятся очевидными задачи дальнейших исследований в области "прозрачных" мониторов: достижение максимальной прозрачности при минимальной тонкости пленок для возможности их сборки в достаточно "толстые" пакеты.

Пока же данную технологию можно использовать для сувениров.

Следует отметить, что экранное пространство образует среду, в которой действуют законы оптики. Например, не оказывается ли демонстрируемый объект погруженным в сосуд с жидкостью, подобно рыбки в аквариуме? Это также может ограничить ракурс при применении экрана на основе пакета плоских пленок. Однако это применение может вполне удовлетворять техническим требованиям к современному телевизору.

3.2. Сферические и цилиндрические экраны.

Даже при бытовом применении объемного экрана возникает желание кругового обзора с одинаковым качеством изображения. Возможность экранизации в сферической системе координат $Or\varphi\theta$ рассмотрена в работах [5, 7]. Каждая точка характеризуется расстоянием r и двумя углами: азимутом φ и углом места θ . Пересчет из декартовой системы выполняется по формулам

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \varphi = \arctg \frac{x}{z}; \theta = \arcsin \frac{y}{r}.$$

Объемный экран становится полусферой. Однако и сами экранные пленки должны быть сферическими. Вместо нарезки на Δz в декартовой системе координат, необходима нарезка на Δr . Центр полусферы также вырождается в сферическую пленку "на одну точку".

Применение сферических экранных пленок позволяет создавать экранные пространства не только для внешнего наблюдения, но и для "внутреннего" расположения зрителей.

Технология изготовления сферического экрана представляется весьма сложной. Во многих случаях не только недостаточен, но даже целесообразен лишь круговой обзор моделируемого объекта. В этом случае можно использовать цилиндрическую систему координат $Or\varphi h$. Пересчет в нее из декартовой системы проводится по формулам

$$r = \sqrt{x^2 + z^2}; \varphi = \arctg \frac{x}{z}; h = y.$$

На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) показано примерное изображение кувшина (слева) в цилиндрическом объемном экране, составленном всего лишь из шести вложенных прозрачных мониторов. Попытка натурального воспроизведения с помощью пленки натолкнулась на столь высокое замутнение, что шейка кувшина погрузилась в туман. Другая технология изготовления, например, с помощью плотно вложенных хрустальных цилиндров с наклеенными срезами изображения на тончайшей бумаге, дорога и недоступна.

Для возможности кругового обзора цилиндры-мониторы должны быть двусторонними — для показа "обратной" стороны некоторых элементов. Для исключения искажений при наложении двух разных изображений каждый слой должен содержать изображение только с одной стороны. Это учтено на рисунке некоторым разворотом кувшина так, чтобы показать внутренний вид достаточно "толстой" ручки. На рисунке слева пронумерованы разрезы, справа пронумерованы соответствующие им слои — цилиндры экрана.

Следует предположить возможность предельного перехода изображения кувшина справа к изображению слева при "бесконечном" возрастании числа слоев объемного экрана. Достаточно большое число слоев должно обеспечить стереоэффект.

4. Вычислительные средства управления объемным экраном

Возникает проблема обеспечения высокой производительности вычислительных средств, управляющих работой объемного экрана. Ведь каждый слой управляется отдельным процессором. Процессоры работают синхронно (рис. 7), каждый обрабатывает свой срез изображения. То есть процес-

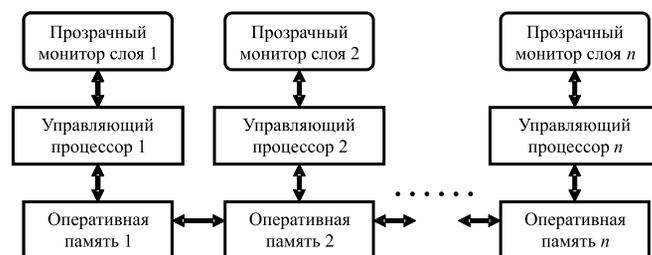


Рис. 7. SPMD-технология в основе ВС, управляющей объемным экраном

соры выполняют копии одной программы, независимо обрабатывая свои данные. Такая обработка в многопроцессорной вычислительной системе (ВС) соответствует *SPMD*-технологии (*Single Program — Multiple Data*) [7].

Смежные процессоры имеют каналы быстрого обмена для обеспечения преемственности данных при движении объекта.

5. Возможность применения реагирующего объекта для прогноза погоды

Работа реагирующего объекта, как и каждой управляющей системы, тактируется. Поведение объекта (например, танцора) делится на циклы, в течение которых он совершает действия и возвращается в некоторое состояние, адекватное ситуации. Поскольку ситуация динамически меняется, то и указанное состояние меняется. При программировании такое действие выражается термином "цикл в цикле".

Пусть визуальная, красивая и радостная система прогноза погоды, выставленная на центральной площади населенного пункта, реализована в виде робота (рис. 8, слева) или с помощью объемного цилиндрического экрана (на том же рисунке справа).

Периодически, скажем, через каждые полчаса, из Гидрометцентра поступают уточненные данные об ожидаемой погоде: температура, давление, влажность, направление и сила ветра, вероятность дождя, штормовое предупреждение и пр. С помощью логической нейронной сети объекту указываются его циклические действия, соответствующие сложившемуся вектору — ситуации. Например, при резкой смене ситуации он может даже на мгновение исчезнуть и появиться вновь в галошах и с зонтиком, он может вместе со срывающимся зонтиком поворачиваться и отклоняться, дрожать от холода и т. д. Цикл его действий может заканчиваться некоторым успокоением для данной ситуации и начинаться вновь. Так — до нового уточнения данных Гидрометцентра, по которым выполняется резкий или плавный переход к новым действиям.

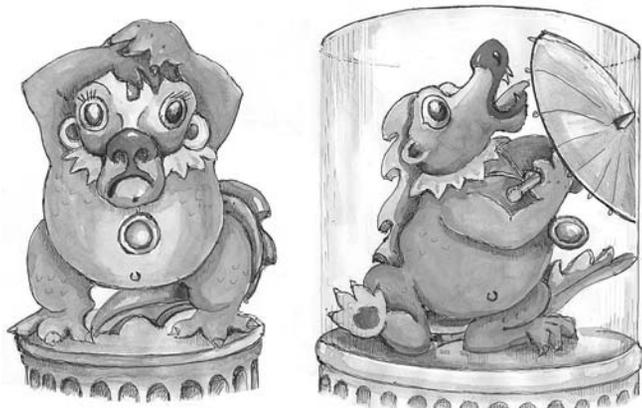


Рис. 8. Реагирующие объекты предупреждают об урагане с ливнем

Видны значительные возможности объемного экранирования по сравнению с возможностями робототехники. Ведь робот может просто свалиться с пьедестала при попытке совершить столь сложные движения.

Возникает вопрос об уточнении данных Гидрометцентра с требуемой частотой. Впечатляет та система дифференциальных и интегральных уравнений, которую необходимо оперативно решать.

Недавно в газете "Аргументы и факты" (№ 5 (1734), 2014, с. 45) директор Гидрометцентра Р. Вильфанд сообщил о недостаточной мощности используемых современных вычислительных средств.

Следует воспользоваться методом ассоциативных вычислений [8]. Для большого числа векторов — значений факторов факторного пространства — по точным алгоритмам рассчитывают векторы — результаты. Так для большого числа экспериментов создается база знаний (опытных), для активизации которой формируется логическая нейронная сеть. Рецепторный слой строится на основе использованных значений факторов. Рецепторы связываются с нейронами единственного выходного слоя, реализуя отношения вида *<известная ситуация> → <известное решение>*. Связи могут иметь веса в соответствии со значимостью фактора или его значения, определяемой опытом эксплуатации.

Выборка по логической нейронной сети проводится ассоциативно (голосованием) с помощью рассмотренной выше несложной пороговой функции активации. Результат определяется максимально возбужденным нейроном, однако он может получаться на основе усреднения значений возбуждения нескольких нейронов. Задание текущей ситуации, т. е. достоверность высказывания о принадлежности данных, на рецепторах для каждого фактора задается отдельно, распределением единицы между двумя "близкими" рецепторами, как было указано выше.

Напомним, что логическая нейронная сеть представляется матрицей следования. Она легко расширяется, уточняется, модифицируется. Это делается вне рабочего режима в автоматическом режиме самообучения, если существует обратная связь — оперативная оценка точности прогноза по текущему состоянию базы знаний. Таким образом, в рабочем режиме прогнозирование проводится с помощью "быстрых" ассоциативных вычислений по базе знаний, что может быть вполне достаточно для наглядного информирования населения.

Заключение

Логические нейронные сети, использующие достоверность высказываний о принадлежности данных, представляют собой весьма несложный развиваемый аппарат, лежащий в основе "мозга" объекта "живого" моделирования.

Реагирующие объекты, дополняющие традиционные средства визуализации и мониторинга, спо-

собны наглядно и действенно предупреждать об опасном дрейфе параметров управляющего процесса, проводить грубую, первичную диагностику, существенно снижать влияние "человеческого фактора".

Объемная экранизация на основе пакета прозрачных мониторов является одним из важных средств воспроизведения трехмерных сцен и объектов.

Для динамического управления реагирующими объектами необходима разработка трехмерной компьютерной графики.

Список литературы

1. Барский А. Б. Логические нейронные сети и "живое" моделирование // Компьютеры в учебном процессе. 2005. № 11. С. 3—22.

2. Барский А. Б. Логические нейронные сети: методика построения и некоторые применения // Информационные технологии. Приложение. 2006. № 6. 32 с.

3. Барский А. Б., Милютин Л. Б., Тимофеев А. Е. Реагирующие объекты для систем интеллектуального отображения // Информационные технологии. 2007. № 2. С. 2—11.

4. Вахромцев Е. М. Применение методов "живого" моделирования для производственного мониторинга // Информационные технологии. 2010. № 7. С. 10—15.

5. Барский А. Б. Трехмерная экранизация компьютерных объектов "живого" моделирования // Информационные технологии. 2010. № 9. С. 2—6.

6. Барский А. Б. Нейронные сети логического вывода. Курс лекций. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 400 с.

7. Барский А. Б. Параллельные информационные технологии: учебное пособие. М.: ИНТУИТ; БИНОМ. Лаборатория знаний. 2007. 502 с.

8. Барский А. Б. Обучаемые и самообучающиеся системы распознавания, управления и принятия решений на логических нейронных сетях // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 10. С. 783—792.

A. B. Barsky, Professor, e-mail: arcbarsk@mail.ru
Moscow State University of Railway Engineering

"Live" Simulation and Volumetric Screening

The problems of the development of reacting objects "live" simulation for additional, visual monitoring of complex control systems for minimize the impact of the "human" factor are researched. As robotics and so information technologies can be used. The basis of reacting resources used logical neural networks. Computer graphics for "live" simulation should take into account the possibility of dynamic management objects using the "muscle" and "bones". Volumetric screen may be based on transparent monitors package that realized layers of three-dimensional images. The use of Cartesian, spherical and cylindrical coordinate systems is perhaps. The experimental construction of three-dimensional image using a package of films in the Cartesian coordinate system is analyzed. The expected image on the screen of volume composed of nested transparent cylinders is discussed. The principality schemes of monitoring, displaying processes the job situation in the receptors, neuronal excitation by mean of he activation function, form action script object are implemented. The possibility of using reactive sites for the public display of the weather forecast is considered. Every transparent monitor is connected with control processor. Processors form a computer system that runs on technology "Single Program — Multiple Data".

Keywords: "live" simulation, reacting object, logical neural network, transparent monitor, volumetric screen

References

1. Barskij A. B. Logicheskie nejronnye seti i "zhivoe" modelirovanie, *Komp'yutery v uchebnom processe*, 2005, no. 11, pp. 3—22.

2. Barskij A. B. Logicheskie nejronnye seti: metodika postroenija i nekotorye primeneniya, *Informacionnye tehnologii*, Prilozhenie, 2006, no. 6, 32 p.

3. Barskij A. B., Miljutin L. B., Timofeev A. E. Reagirujuscie ob'ekty dlja sistem intellektual'nogo otobrazhenija, *Informacionnye tehnologii*, 2007, no. 2, pp. 2—11.

4. Vahromcev E. M. Primenenie metodov "zhivogo" modelirovanija dlja proizvodstvennogo monitoringa, *Informacionnye tehnologii*, 2010, no. 7, pp. 10—15.

5. Barskij A. B. Tryohmernaja ekranizacija komp'yuternyh ob'ektov "zhivogo" modelirovanija, *Informacionnye tehnologii*, 2010, no. 9, pp. 2—6.

6. Barskij A. B. *Nejronnye seti logicheskogo vyvoda. Kurs lekcij*. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 400 p.

7. Barskij A. B. *Parallelnye informacionnye tehnologii. Uchebnoe posobie*. Moscow, INTUIT; BINOM. Laboratorija znaniy. 2007. 502 p.

8. Barskij A. B. Obuchaemye i samoobuchajushhiesja sistemy raspoznavanija, upravlenija i prinjatija reshenij na logicheskikh nejronnyh setjah, *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 10, pp. 783—792.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМАХ INFORMATION TECHNOLOGIES IN BIOMEDICAL SYSTEMS

УДК 615.478:681.2

Н. Т. Абдуллаев¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: a.namik46@mail.ru,
О. А. Дышин², канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., **М. И. Керимова**², ассистент

¹ Азербайджанский технический университет

² Азербайджанская государственная нефтяная академия, г. Баку

Дифференциальная диагностика заболевания желудочно-кишечного тракта на основе мультифрактального анализа электрогастроэнтерографических сигналов

Рассмотрен алгоритм мультифрактального анализа электрогастроэнтерографических сигналов, позволяющих оценить биоэлектрическую активность органов желудочно-кишечного тракта. Поскольку эти сигналы обладают фрактальной природой, то для их характеристики пользуются целым спектром показателей. Исследованы электрогастроэнтерографические сигналы для нормального состояния и при язвенных поражениях органов желудочно-кишечного тракта. Для дифференциальной диагностики этой болезни используются обобщенные показатели Херста, скейлинговые экспоненты, обобщенные фрактальные размерности и спектральные функции.

Ключевые слова: желудочно-кишечный тракт, электрогастроэнтерографические сигналы, мультифрактальный анализ, язвенная болезнь, дифференциальная диагностика, спектр показателей

Введение

Для исследования моторно-эвакуаторной функции (МЭФ) гладкомышечной клетки желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) все шире стали применять методы измерения ее электрической активности [1, 2]. В результате многочисленных экспериментальных работ по исследованию электрической активности гладкой мускулатуры пищеварительного тракта в совокупности со стандартными методиками оценки МЭФ (рентгенографией, баллонографией, ионоанометрией и др.) получены доказательства тесной связи между электрической и моторной активностями гладких мышц ЖКТ [2—5].

Для исследования биоэлектрической активности органов ЖКТ применяют электрогастроэнтерографию — метод исследования, позволяющий оценить биоэлектрическую активность желудка, двенадцатиперстной кишки и других отделов ЖКТ. Он основан на регистрации изменений электрического потенциала от органов ЖКТ, т. е. снятии электрогастроэнтерограмм (ЭГЭГ) [6]. Данные, полученные при ЭГЭГ, не противоречат и часто опережают результаты рентгенологического и эндоскопического исследований, что свидетельствует о более высокой

чувствительности метода для диагностики моторных нарушений [7].

ЭГЭГ относится к нестационарным сигналам в виде колебаний сложной формы. Классическими методиками обработки ЭГЭГ являются статистический, спектральный, вейвлет-анализы, широко применяемые в медицинской практике. Анализ существующих методов обработки ЭГЭГ [7—9] позволяет сделать вывод о том, что практически все методы дают возможность оценивать состояние ЖКТ интегрально или усредненно (пусть даже для каждого отдела ЖКТ) и не могут давать некоторые прогнозы о динамике состояния ЖКТ в ближайшем будущем.

В связи с вышесказанным интерес представляет разработка новых быстродействующих алгоритмов анализа этих биосигналов. Одним из примеров таких методов является популярный в радиофизике фрактальный анализ. В работе [8] показано, что ЭГЭГ-сигнал обладает фрактальной природой и для его расшифровки предлагается использовать показатель Херста H .

Однако константа Херста H характеризует лишь монофрактальные сигналы (например, фликкершум $1/f$, винеровский случайный процесс и т. д.), которые являются однородными в том смысле, что

их скейлинговые характеристики остаются неизменными в любом диапазоне масштабов. Спектр таких сигналов имеет вид $S(f) \sim f^{-\beta}$ и не меняется в широком частотном диапазоне, т. е. β представляет собой постоянную величину. Простые самоподобные объекты, характеризующиеся постоянным показателем Херста, являются идеализацией реальных явлений [10]. Сложные сигналы, к которым, по нашему мнению, относятся и ЭГЭГ-сигналы, имеют такие структуры, которые характеризуются целым спектром показателей. Размерность Хаусдорфа (фрактальная размерность) представляет собой лишь один из них, и показатель Херста для них не есть постоянная величина. Мультифрактальные процессы допускают разложение на участки с различными локальными свойствами скейлинга. Спектр таких процессов не может быть описан степенным законом с единственным показателем β , для их описания вводится обобщенная фрактальная размерность (размерность Реньи) [11].

В настоящей работе исследуются ЭГЭГ-сигналы пациентов с нормальным функционированием ЖКТ и с заболеваниями: язвенная болезнь желудка (ЯБЖ) и язвенная болезнь двенадцатиперстной кишки (ЯБДПК). Электрогастроэнтерографические методы этих заболеваний исследованы в работах [6, 12, 13], а эндоскопические методы — в работах [14, 15]. Для дифференциальной диагностики нами используются обобщенные показатели Херста $h(q)$, скейлинговые экспоненты $\tau(q)$, спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q и спектральные функции $f(\alpha)$. Все эти информативные показатели получаются на основе мультифрактального анализа временных рядов, представленных измерениями ЭГЭГ-сигналов с определенной частотой.

Мультифрактальный анализ нестационарных временных рядов

Рассмотрим нестационарный временной ряд, представленный последовательным набором случайных значений

$$x_1, \dots, x_N \equiv \{x_k\}_1^N. \quad (1)$$

По определению нестационарность выражения в том, что кроме беспорядочных изменений средняя величина случайной переменной проявляет определенную тенденцию $f(t)$ изменения со временем, называемую трендом. Для статистической обработки временного ряда (1) в [16] предложен метод мультифрактального флуктуационного анализа (МФФА), называемый в англоязычной литературе "multifractal detrended fluctuation analysis" (MF-DFA). Этот метод сводится к следующим шагам.

1⁰. Вводим суммарную флуктуацию $i \leq N$ значений ряда:

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x}), \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (3)$$

— арифметическое среднее ряда (1).

2⁰. Делим полный временной интервал $[1, N]$ на $N_s = \text{int}(N/s)$ сегментов (int — целая часть числа), каждый из которых содержит s значений $x_{(v-1)s+1}, \dots, x_{vs}$, где $v = 1, \dots, N_s$ — номер сегмента. В результате такого деления на конце интервала $[1, N]$ остается сегмент, содержащий число точек, которое меньше N_s . Поэтому проводим подобное деление в обратном направлении, начиная с противоположного края полного интервала. Получающиеся при этом сегменты нумеруем индексом $v = N_s + 1, \dots, 2N_s$.

3⁰. Находим полином $y_v(i)$, который наилучшим образом ложится на точки $x_{(v-1)s+1}, \dots, x_{vs}$ v -го интервала (это можно сделать с помощью метода наименьших квадратов (МНК), перебирая степени n полинома $y_v(i)$, начиная с $n = 1$). Используя такой полином, находим дисперсию на интервале v :

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2, \quad v = 1, \dots, N_s. \quad (4)$$

Повторяем вычисление дисперсии для обратного отсчета интервалов

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{Y[N(v-N_s)s+i] - y_v(i)\}^2, \quad v = N_s + 1, \dots, 2N_s. \quad (5)$$

4⁰. Проводим усреднение деформированной дисперсии по интервалам, отсчитанным в обоих направлениях:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(v, s)]^{q/2} \right\}^{1/q}, \quad (6)$$

где q — параметр деформации, $-\infty < q < +\infty$.

Во избежание расходимости при $q \rightarrow 0$ переходим к определению

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln [F^2(v, s)] \right\}. \quad (7)$$

5⁰. Используя логарифмические оси, находим обобщенный показатель Херста $h(q)$, отвечающий скейлинговому соотношению

$$F_q^{(s)} \sim s^{h(q)}, \quad (8)$$

характерному для самоподобных систем [17]. Показатель $h(q)$ определяется с помощью МНК по регрессии

$$y = b + ax \quad (b = 0),$$

где $y = \ln F_q(q)$, $x = \ln s$, $a = h(q)$.

Для очень больших масштабов ($s > N/4$) $F_q(s)$ становится статистически незначимым, поскольку число сегментов N_s в процедуре усреднения на шаге 4^0 будет очень малым. Кроме того, при очень малых масштабах ($s < 6$) наблюдаются систематические отклонения от скейлинговой зависимости вида (8). Итак, при обработке ряда методом МФФА следует исключить значения $s > N/4$, а также малые сегменты ($s < 6$), для которых теряет статистическую достоверность усреднение (4), (5) по каждому из сегментов.

В общем случае экспонента $h(q)$ в соотношении (8) зависит от q . Для стационарных временных рядов величина $h(2)$ эквивалентна хорошо известному показателю Херста [17]. Таким образом, функция $h(q)$ определяет обобщенный показатель Херста.

Метод МФФА определяется только для положительных обобщенных показателей Херста $h(q)$ и становится неточным при существенно некоррелированных сигналах, когда $h(q)$ близко к нулю. В этих случаях рекомендуется [16] использовать модифицированный МФФА, в котором вместо одного суммирования в уравнении (2), описывающим профиль исходных данных x_k , применяется двойное суммирование:

$$\tilde{Y}(i) \equiv \sum_{k=1}^i [Y(k) - \bar{Y}], \quad (9)$$

$$\text{где } \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y(i).$$

Следуя далее обычной процедуре МФФА, мы получим обобщенные функциональные функции $\tilde{F}_q(s)$, удовлетворяющие скейлинговому соотношению вида (8), но с большей экспонентой $\tilde{h}(q) = h(q) + 1$:

$$\tilde{F}_q(s) \sim s^{\tilde{h}(q)} = s^{h(q)+1}. \quad (10)$$

Таким путем обеспечивается скейлинговое соотношение даже для случая, когда значения $h(q)$ очень малы (но больше, чем -1) для некоторых значений q . Заметим, что $\tilde{F}_q(s)/s$ соответствует $F_q(s)$ в соотношении (8). Если не вычитать на каждом шаге процедуры среднее значение \bar{Y} в сумме (9), то такое суммирование приводит к квадратным трендам в профиле $\tilde{Y}(i)$. В этом случае для исклю-

чения таких побочных трендов следует использовать по крайней мере МФФА второго порядка (т. е. степени полиномов $y_v(i)$ в (4) и (5) должны быть не меньше двух).

Для стационарных, положительных и нормализованных временных рядов

$$\{x_k\}_1^N \text{ с } x_k \geq 0 \text{ и } \sum_{k=1}^N x_k = 1 \quad (11)$$

мультифрактальный скейлинговый показатель $h(q)$, определяемый соотношением (8), связан непосредственно со скейлинговой экспонентой Реньи $\tau(q)$ (так называемый массовый показатель), определяемой с помощью обобщенных статистических сумм $Z_q(s)$ в рамках стандартной мультифрактальной идеологии [11]:

$$\tau(q) = qh(q) - 1, \quad (12)$$

где $\tau(q)$ определяется из скейлингового соотношения

$$Z_q(s) \equiv \sum_{v=1}^{N/s} |p_v(s)|^q \sim s^{\tau(q)}, \quad (13)$$

$$p_v(s) \equiv \sum_{k=(v-1)s+1}^{vs} x_k = Y(vs) - Y((v-1)s). \quad (14)$$

Здесь полагается, что N кратно s , т. е. $N_s = N/s$.

При компьютерной реализации алгоритма МФФА следует провести тестирование составленной программы на самоподобном множестве, мультифрактальные характеристики $h(q)$ и $\tau(q)$ которого могут быть найдены аналитически. В качестве такого множества удобно использовать бинарный мультифрактал Кантора [17].

Отвечающий ему биномиальный ряд определяется равенством

$$x_k = p^{m(k-1)}(1-p)^{n-m(k-1)}, \quad (15)$$

где параметр p определяет вероятность $0,5 < p < 1$, а $m(k)$ представляет число единиц в бинарном коде числа k (например, $m(19) = 3$, так как десятичному числу 19 отвечает бинарный код 10011). Очевидно, такой ряд будет состоять из $N = 2^n$ членов x_k ($k = 1, \dots, N$), число которых ограничено максимальным показателем n .

Согласно [16], обобщенный показатель Херста и массовый показатель ряда (15) выражаются равенствами

$$h(q) = \frac{1}{q} - \frac{\ln[p^q + (1-p)^q]}{q \ln 2}; \quad (16)$$

$$\tau(q) = -\frac{\ln[p^q + (1-p)^q]}{\ln 2}. \quad (17)$$

При заданном параметре p эти выражения однозначно описывают бинарный мультифрактал Кан-

тора. Генерируя его согласно определению (15), легко найти мультифрактальные характеристики $h(q)$ и $\tau(q)$ методом МФФА и сравнить их с точными значениями (16), (17).

Если рассматривать вышеуказанный стационарный нормированный временной ряд (11) как фрактальное множество точек A на оси x , покрываемое отрезками длиной s , то соответствующая ему обобщенная статистическая сумма $Z(q, s)$, характеризующаяся показателем q , запишется в виде [11]

$$Z(q, s) = \sum_{v=1}^{N(s)} p_v^q(s), \quad (18)$$

где $p_v(s)$ — вероятность того, что наугад взятая точка из множества A находится в ячейке (фрагменте) v длины s , при этом

$$\sum_{v=1}^{N(s)} p_v(s) = 1. \quad (19)$$

Нетрудно видеть, что для ряда (11) $N(s) = N/s$ и $Z(q, s) = Z_q(s)$.

Спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q , характеризующий распределение точек x_k во множестве A , определяется с помощью соотношения

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}, \quad (20)$$

где функция $\tau(q)$ имеет вид

$$\tau(q) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\ln Z(q, s)}{\ln s}. \quad (21)$$

Из (20) и (21) следует

$$D_q = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{q-1} \frac{\ln Z(q, s)}{\ln s} \right). \quad (22)$$

Поскольку при $q = 1$, в силу условия нормировки вероятностей (16), $Z(1, \varepsilon) = 1$, где ε — размер разрешающей ячейки, покрывающей множество A , то $\tau(1) = 0$, что приводит к неопределенности вида $0/0$ в выражении (20). Эта неопределенность раскрывается после очевидного равенства

$$Z(q, s) = \sum_{v=1}^{N(s)} p_v^q(s) = \sum_{v=1}^{N(s)} p_v(s) \exp[(q-1) \ln p_v(s)].$$

Устремляя $q \rightarrow 1$, раскладывая экспоненту и учитывая условие нормировки (19), получим

$$\begin{aligned} Z(q \rightarrow 1, s) &\approx \sum_{v=1}^{N(s)} [p_v(s) + (q-1)p_v(s) \ln p_v(s)] = \\ &= 1 + (q-1) \sum_{v=1}^{N(s)} p_v(s) \ln p_v(s). \end{aligned}$$

Применяя теперь к выражению (22) правило Лопиталья по q , получим

$$D_L = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(s)} p_v(s) \ln p_v(s)}{\ln s}.$$

Для любого фрактального множества L , которое получается делением исходного отрезка на N_n , $n \rightarrow \infty$, фрагментов длиной $l_v \rightarrow 0$, $v = 1, 2, \dots, N_n$, в случае самоподобия L вероятность попадания в v -й фрагмент дается степенной функцией

$$p_v = l_v^\alpha \quad (23)$$

с показателем Гельдера α [18]. Фрактальное множество L определяется мерой

$$Z(q) = \sum_{v=1}^{N_n} p_v^q, \quad (24)$$

обобщающей определение статистической суммы за счет деформации показателем $q \neq 1$. При положительных q эта деформация приводит к тому, что максимальный вклад в меру (24) дают большие значения вероятности p_v , а при отрицательных — малые.

Для произвольного распределения вероятностей p_v , не сводящегося к геометрическому распределению (23), мера (24) определяет энтропию Реньи

$$S_q^R \equiv \frac{1}{1-q} \ln \sum_{v=1}^{N_n} p_v^q = \ln [Z(q)]^{1/1-q}. \quad (25)$$

Поэтому спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q , определяемый формулой (20) или (22), называют размерностью Реньи фрактального множества.

При заданном значении n показателю α в (23) отвечает

$$N_n(\alpha) = \ln^{-f(\alpha)} \quad (26)$$

фрагментов, число которых определяется спектром мультифрактала $f(\alpha)$, определяемым формулами [18]

$$f(\alpha) = 1 + q(\alpha)[\alpha - h(q(\alpha))]; \quad (27)$$

$$\alpha(q) \equiv \frac{d\tau(q)}{dq} = h(q) + q \frac{dh}{dq}. \quad (28)$$

Набор различных значений функции $f(\alpha)$ (при разных α) представляет собой спектр фрактальных размерностей (размерностей Хаусдорфа) однородных подмножеств L_α , на которые можно разбить исходное множество L . Так что мультифрактал можно понимать как некое объединение различных однородных фрактальных подмножеств (монофракталов) L_α исходного множества L , каждое из которых имеет собственное значение фрактальной размерности $f(\alpha)$ [11].

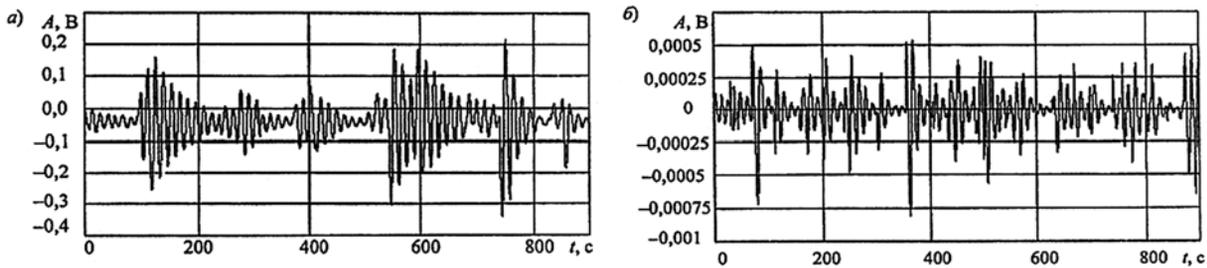


Рис. 1. Электрогастрограмма желудка в норме (а) и с язвенной болезнью (б)

Наиболее ярко строение самоподобного объекта представляется формой мультифрактального спектра $f(\alpha)$, ширина которого дает набор фрактальных размерностей. Так, для монофракталов кривая $f(\alpha)$ имеет δ -образную форму с фиксированным значением α .

Таким образом, на основе мультифрактального подхода к численному анализу временных рядов, представленных ЭГЭГ-сигналами здоровых и с заболеваниями ЖКТ пациентов, получаются следующие четыре информативных для дифференциальной диагностики показателя: обобщенный показатель Херста $h(q)$, скейлинговая экспонента Реньи $\tau(q)$, спектр обобщенных фрактальных размерностей D_q и спектральная функция $f(\alpha(q))$.

Пусть $i = 1, 2, 3, 4$ — индексы показателей $h(q)$, $\tau(q)$, D_q и $f(\alpha(q))$ соответственно и $j = 0, 1, 2, 3$ — индексы заболеваний ЖКТ, где 0 — отсутствие каких-либо заболеваний ЖКТ и 1, 2, 3 — наличие соответственно язвенной болезни желудка (ЯБЖ), язвенной болезни тощей кишки (ЯБТК) и язвенной болезни двенадцатиперстной кишки (ЯБДПК). Имея усреднение (по ранее обследованным пациентам) эталонные графики зависимостей $h(q)$, $\tau(q)$, D_q и $f(\alpha(q))$ на интервале $[-20, 20]$ изменения параметра q и соответствующие графики зависимостей $h^*(q)$, $\tau^*(q)$, D_q^* и $f^*(\alpha(q))$ исследуемого пациента можно вычислить для каждой пары (i, j) , среднеквадратическое отклонение $СКО_{i,j}$ -показателей исследуемого пациента от соответствующих этой паре эталонных показателей. Тогда индекс j^0 , на котором достигается минимум величин $СКО_j = \sum_{i=1}^4 СКО_{ij}$, т. е.

$$j^0 = \arg \min_{j=0, 1, 2, 3} СКО_j$$

можно принять в качестве номера диагностируемого заболевания исследуемого пациента.

Результаты вычислительного эксперимента и оценка информативных параметров

В качестве исходных данных были рассмотрены реально измеренные тошачковые сигналы (рис. 1)

для нормального состояния желудка (а) и при язвенной болезни желудка (б). Обработке подвергались оцифрованные значения этих сигналов с частотой дискретизации 100 Гц. Обработка полученного временного ряда по методу мультифрактального флуктуационного анализа согласно предложенному выше алгоритму позволила получить зависимости обобщенного показателя Херста $h(q)$ (рис. 2)* и скейлингового показателя Реньи $\tau(q)$ (рис. 3) для указанной болезни ЖКТ. Как видно из графиков, эти зависимости достаточно близки друг другу (а во многих точках и совпадают), поэтому с этой точки зрения использовать данные показатели для дифференциальной диагностики различных орга-

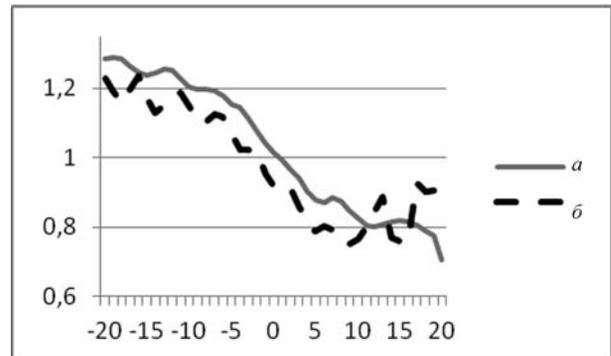


Рис. 2. Зависимость обобщенного показателя Херста $h(q)$

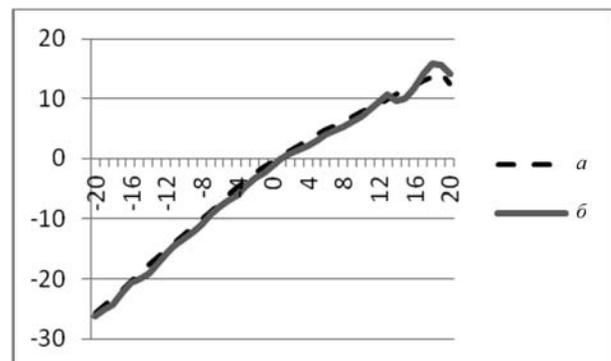


Рис. 3. Зависимость скейлингового показателя $\tau(q)$

*На рис. 2—5 показатели а — для желудка, б — для язвенной болезни.

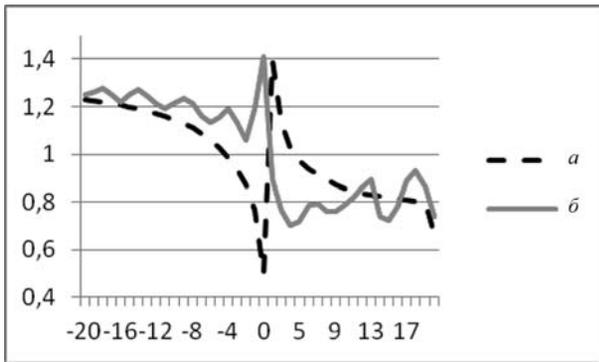


Рис. 4. Зависимость обобщенной фрактальной размерности D_q

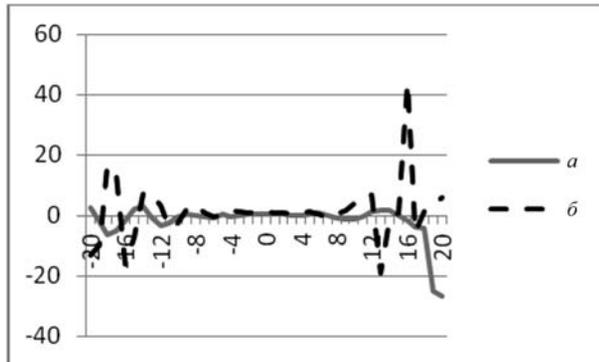


Рис. 5. Зависимость мультифрактальной спектральной функции $f(\alpha)$ информация

нов ЖКТ достаточно сложно. Более информативными являются зависимости обобщенной фрактальной размерности D_q (рис. 4) и мультифрактальной спектральной функции $f(\alpha)$ (рис. 5). Существенные различия этих зависимостей имеют место в определенных диапазонах q . Аналогичные результаты были получены при исследовании язвенной болезни двенадцатиперстной кишки.

Расчеты были повторены по 10 пациентам с указанными диагностическими заключениями, подтвержденные ранее эндоскопическими и рентгенологическими обследованиями. Полученные в целях определения характера поведения предлагаемых диагностически значимых параметров зависимости по остальным пациентам подтвердили результаты проведенных исследований.

Достоверность функционирования программы мультифрактального флуктуационного анализа была проведена тестированием метода МФФА по биномиальному ряду.

Таким образом, можно утверждать, что возможна дифференциальная диагностика органов ЖКТ по полученным показателям.

1. Ребров В. Г., Станковский Б. А., Кулинина Г. И. Особенности регистрации электрической активности желудка и кишечника с поверхности тела пациента // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. 1995. № 2. С. 48–52.
2. Периферическая электрогастроэнтерография в детской гастроэнтерологии (Методические аспекты) / [Пономарева А. П. и др.]. М.: Российский государственный университет Росздрава, 2007. 48 с.
3. Ворновицкий Е. Г., Фельдштейн И. В. Использование наджелудочной электрогастрографии для оценки состояния желудочно-кишечного тракта // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1998. Т. 126, № 11. С. 597–600.
4. Гальперин Ю. М., Ребров В. Г., Попова Т. С., Горин А. С., Опарин И. С. К вопросу о соответствии электрогастрографии двигательной активности желудка // Современные вопросы электрогастрографии двигательной активности желудка: Матер. I Всесоюзной конференции по электрогастрографии. М.: Наука, 1975. С. 60–62.
5. Ребров В. Г. Практические возможности электрогастрографии при различных способах ее отведения // Современные вопросы электрогастрографии: Матер. I Всесоюзной конференции по электрогастрографии. М.: Наука, 1975. С. 173–176.
6. Электрогастроэнтерография: исследование электрической активности желудка и кишечника [Электронный ресурс]: Функциональная гастроэнтерология. М.: ЗАО НПП "Исток-Система". URL: <http://www.gastroscan.ru/physician/egg/>.
7. Модели и алгоритмы обработки электрогастроэнтерографического сигнала [Электронный ресурс]. URL: <http://masters.donnta.edu.ua/2009/kita/boutiti/diss/index.html>
8. Нагорная М. Ю. Применение фрактальных методов анализа к электрогастроэнтерографическим сигналам и их техническая реализация. Дисс. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Самара, 2010. 134 с.
9. Антипов О. И., Нагорная М. Ю. Показатель Херста биоэлектрических сигналов // Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 75–77.
10. Павлов А. Н. Методы анализа сложных сигналов: учеб. пособие. Саратов: Научная книга, 2008. 120 с.
11. Божокин С. В., Паршин Д. А. Фракталы и мультифракталы. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. 128 с.
12. Пономарева А. П., Бельмер С. В., Коваленко А. А., Карпина Л. М. Электромиографическая оценка моторики желудочно-кишечного тракта в педиатрии // Матер. X Конгресса детских гастроэнтерологов России "Актуальные проблемы абдоминальной патологии у детей" (19–21 марта 2003 г. Москва) / Под общей ред. акад. РАМН В. А. Таболина, 2003, 174 с.
13. Смирнова Г. О., Силуянов С. В. Периферическая электрогастроэнтерография в клинической практике. Пособие для врачей / Под ред. проф. В. А. Ступина. М.: Издат. дом "Медпрактика-М", 2009. 20 с.
14. Локтюхин В. Н., Мальченко С. И., Черепнин А. А. Основы математического обеспечения поддержки диагностических решений в биотехнических системах с использованием нечеткой логики: учеб. пособие. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2009. 64 с.
15. Черепнин А. А. Модели, алгоритмы и средства для поддержки принятия диагностических решений при эндоскопическом обследовании на основе технологии нечеткой логики. Дисс. ... на соиск. уч. степени канд. техн. наук. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. 2010. 206 с.
16. Kantelhard J. W., Zschiegner S. A., Koscielny-Bunde E., Havlin Sh., Bunde A., Stanley H. E. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series // Physica A 316. 2002. P. 87–114.
17. Федер Е. Фракталы / Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
18. Снерегетика сложных систем. Феноменология и статистическая теория. М.: КРАСАНД, 2009. 384 с.

Differential Diagnosis Gastrointestinal Diseases on the Basis of the Multifractal Analysis the Elektrogastroenterographic Signals

The algorithm of the multifractal analysis the elektrogastro enterograficheskikh of the signals allowing to estimate bioelectric activity of bodies of a digestive tract is considered. As these signals possess the fractal nature, for their characteristic use the whole range of indicators. Elektrogastroenterografichesky signals for a normal state are investigated and at stomach ulcers of bodies of a digestive tract. For differential diagnosis of these diseases the generalized Hurst exponents, skelyingovy exhibitors, the generalized fractal dimensions and spectral functions are used.

Keywords: digestive tract, elektrogastroenterografichesky signals, multifractal analysis, stomach ulcers, differential diagnostics, range of indicators

References

1. **Rebrov V. G., Stankovskiy B. A., Kulinina G. I.** Osobennosti registratsii elektricheskoy aktivnosti zheludka i kishhechnika s poverhnosti tela patsienta, *Rossiyskiy zhurnal gastroenterologii, gepatologii, koloproktologii*, 1995, no. 2, pp. 48–52.
2. **Perifericheskaya elektrogastroenterografiya v detskoj gastroenterologii** (Metodicheskie aspekty) [Ponomareva A. P. i dr.], M.: Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet Roszdruva, 2007, 48 p.
3. **Vornovitskiy E. G., Feldshteyn I. V.** Ispolzovanie nakozhnoy elektrogastrografii dlya otsenki sostoyaniya zheludochno-kishechnogo trakta, *Byulleten eksperimentalnoy biologii i meditsiny*, 1998, vol. 126, no. 11, pp. 597–600.
4. **Galperin Yu. M., Rebrov V. G., Popova T. S., Gorin A. S., Oparin I. S.** K voprosu o sootvetstvii elektrogastrografii dvigatelnoy aktivnosti zheludka, *Sovremennyye voprosy elektrogastrografii dvigatelnoy aktivnosti zheludka: materialy i Vsesoyuznoy konferentsii po elektrogastrografii*, M.: Nauka, 1975, pp. 60–62.
5. **Rebrov V. G.** Prakticheskie vozmozhnosti elektrogastrografii pri razlichnykh sposobah ee otvedeniya, *Sovremennyye voprosy elektrogastrografii: materialy i Vsesoyuznoy konferentsii po elektrogastrografii*, M.: Nauka, 1975, pp. 173–176.
6. **Elektrogastroenterografiya: issledovanie elektricheskoy aktivnosti zheludka kishhechnika** [Elektronnyy resurs]: Funktsionalnaya gastroenterologiya, M.: ZAO NPP "Istok-Sistema" — Rezhim dostupa. URL: <http://www.gastroscan.ru/physician/egg/>
7. **Modeli i algoritmy obrabotki elektrogastroenterograficheskogo signala** [Elektronnyy resurs], URL: <http://masters.donnta.edu.ua/2009/kita/boutiti/diss/index.html>
8. **Nagornaya M. Yu.** *Primenenie fraktalnih metodov analiza k elektrogastroenterograficheskim signalam i ih tehnikeskaya realizatsiya*. Diss. ... na soisk. uch. st. kand. tehn. nauk, Samara, 2010, 134 p.
9. **Antipov O. I., Nagornaya M. Yu.** Pokazatel Hersta bioelektricheskikh signalov, *Infokommunikatsionnyye tehnologii*, 2011, vol. 9, no. 1, pp. 75–77.
10. **Pavlov A. N.** *Metody analiza slozhnykh signalov*: Ucheb. posobie. Saratov: Nauchnaya kniga, 2008. 120 p.
11. **Bozhokin S. V., Parshin D. A.** *Fraktaly i multifraktaly*. Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika", 2001, 128 p.
12. **Ponomareva A. P., Belmer S. V., Kovalenko A. A., Karpina L. M.** *Elektromiograficheskaya otsenka motoriki zheludochno-kishechnogo trakta v pediatrii*. Mater. X Kongressa detskih gastroenterologov Rossii "Aktualnyye problemy abdominalnoy patologii u detey" (19–21 marta 2003 g. Moskva). Pod obschey redaktsiei akad. RAMN V. A. Tabolina, 2003, 174 p.
13. **Smirnova G. O., Siluyanov S. V.** *Perifericheskaya elektrogastroenterografiya v klinicheskoy praktike*: Posobie diva vrachev. Pod red. prof. V. A. Stupina. M.: Izd. dom "Medpraktika-M", 2009, 20 p.
14. **Loktyuhin V. N., Malchenko S. I., Cherepnin A. A.** *Osnovnyy matematicheskogo obespecheniya podderzhki diagnosticheskikh resheniy v biotekhnicheskikh sistemah s ispolzovaniem nechetkoy logiki*: Ucheb. posobie, Ryazan. gos. radiotehn. un-t. Ryazan, 2009, 64 p.
15. **Cherepnin A. A.** *Modeli, algoritmy i sredstva dlya podderzhki prinyatiya diagnosticheskikh resheniy pri endoskopicheskom obsledovanii na osnove tehnologii nechetkoy logiki*. Diss. ... na soisk. uch. stepeni kand. tehn. nauk. Ryazan. gos. radiotehn. un-t, 2010, 206 p.
16. **Kantelhard J. W., Zschiegner S. A., Koscielny-Bunde E., Havlin Sh., Bunde A., Stanley H. E.** Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series, *Physica A* 316, 2002, pp. 87–114.
17. **Feder E.** *Fraktaly*. Per. sangl. M.: Mir, 1991. 254 p.
18. **Sinergetika slozhnykh sistem**. Fenomenologiya i statisticheskaya teoriya, M.: KRASAND, 2009. 384 p.

13—17 октября 2014 г. в Казани прошла третья международная конференция SORUCOM-2014 "Развитие вычислительной техники и ее программного обеспечения в России и странах бывшего СССР: история и перспективы". В стенах знаменитого Казанского авиационного института (Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева) собрались ветераны отрасли, в свое время выведшей СССР в мировые лидеры. Без советских компьютеров, до поры развивавшихся своим оригинальным и независимым путем, не было бы ни знаменитого ракетно-ядерного щита, ни достижений в космосе, ни успехов советской науки.

По сведениям организаторов, в конференции приняло участие более 100 человек, было заслушано 70 докладов, 83 доклада опубликовано в Трудах конференции на русском и английском языках¹, экспертной комиссией отобрано 53 доклада для электронных печатных изданий IEEE на английском языке. География конференции включала Россию (Великий Новгород, Зеленоград, Жуковский, Москва, Казань, Новосибирск, Нижний Новгород, Пермь, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Самара, Таганрог), Великобританию (Лондон), Финляндию (Турку), США (Бостон, Санта-Клара, Сакраменто), Эстонию (Таллин), Японию (Хиросима).

На пленарном заседании помимо докладов участники конференции прослушали видеointerview академика Г. И. Марчука, записанное А. Белкиной в Великом Новгороде осенью 2011 г. Запомнился доклад Хироши Ичикава из университета Хиросимы, интересный как взгляд на историю советской вычислительной техники со стороны. Состояние дел в то время японский ученый назвал "гражданской войной между ведомствами", что вызвало горячие возражения некоторых присутствовавших. Однако многие воспоминания и биографии деятелей тех лет, без сомнения, позволяют непредвзято-му исследователю сделать такой вывод².

¹ Труды конференции доступны по ссылке <http://www.sorucum.ru/files/news/sorucum2014.pdf>

² См. напр.: Шокин А. И. Министр невероятной промышленности СССР. М.: Техносфера, 2007; Кисунько Г. В. Секретная зона: Исповедь генерального конструктора. М.: Современник, 1996.

На конференции неизбежно много раз поднимался "вечный вопрос" истории советской вычислительной техники: было ли верным решение 1969 г. о всеобщем переходе на копирование компьютеров фирмы IBM? Виталий Иосифович Штейнберг из НИИ "Аргон" (Москва) в специальном заявлении на пленарном заседании внес предложение считать вопрос закрытым. Он привел ряд известных доводов "за" это решение, но его призыв едва ли был услышан. Как раз незадолго до его выступления участники конференции прослушали запись интервью Г. И. Марчука, из которой следовало, что последний президент АН СССР, бывший в то время директором ВЦ и заместителем председателя Президиума СО АН СССР, в числе многих других крупных ученых и производственников выступал против этого решения. Уже в конце конференции крайнюю противоположную позицию выразил Валерий Федорович Гусев, разработчик ЕС-1033, одной из немногих оригинальных отечественных машин Единой Серии. В эмоциональном выступлении перед участниками экскурсии на Казанский завод ЭВМ он назвал решение 1969 г. "преступлением".

Вероятно, истина где-то посередине. Такое мнение высказал на одной из секций Александр Николаевич Томилин, сопредседатель конференции. Следует отметить, что даже самые рьяные противники решения о копировании никогда не возражали против собственно заимствования американских технологий для того конгломерата разрозненных, несовместимых и плохо поддающихся тиражированию решений, который представляла собой советская компьютерная отрасль к середине 1960-х. Возражения и тогда и сейчас вызывал лишь тотальный характер этого решения, когда большая часть накопленных к тому времени немалых отечественных достижений в одночасье была выброшена на помойку. Несомненно, ориентация на копирование стремительно устаревавших американских машин была одним из главных факторов, обусловивших практически мгновенное исчезновение оригинальной отечественной компьютерной отрасли после распада СССР в 1991 г.

Одно из оригинальных направлений, которое удалось сохранить в этих условиях, было представлено школой М. А. Карцева в московском НИИВК.

О некоторых особенностях машин М-10 и М-13 рассказывалось в докладе А. А. Крупского и В. Н. Зенина "Устройства и системы внутренней памяти в разработках М. А. Карцева". Бывший директор НИИВК Ю. В. Рогачев внес некоторые уточнения в доклад. В докладе отмечалось, что в первой половине семидесятых некоторое время (около года), вплоть до появления в 1974 г. в США известного компьютера Cray-1, М-10 была самой быстродействующей машиной в мире.

М. А. Карцев добился выдающихся успехов и в обеспечении надежности продукции — одного из самых слабых мест отечественной техники. А. А. Крупский и В. Н. Зенин в своем докладе указывали, что отдельные экземпляры М-10М эксплуатировались на объектах Минобороны вплоть до конца 1990-х. Ю. В. Рогачев в докладе "Начало информатики и создание первых ЭВМ в СССР" отметил, что созданная под руководством М. А. Карцева в шестидесятые годы машина М4-2М до сих пор работает на одной из радиолокационных станций в Севастополе.

К сожалению, достижения школы М. А. Карцева были практически неизвестны широкой публике, поскольку его вычислительные машины предназначались для использования в системах предупреждения о ракетном нападении (СПРН) и были засекречены. Первая открытая публикация о машине М-10 появилась в Докладах Академии наук в 1979 г., а о М-13 — только в 1990 г. Секретность была, несомненно, одним из факторов, помешавших советской вычислительной технике занять самостоятельную позицию в мире. О масштабах засекречивания имеется множество характерных свидетельств. Так, из дискуссии после доклада Ю. В. Рогачева выяснилось, что разработчики М-1 под руководством И. С. Брука совершенно ничего не знали о том, что в это же время в Киеве С. А. Лебедевым были развернуты обширные работы по МЭСМ, причем в рамках того же ведомства — Академии наук. А сопредседатель конференции Александр Николаевич Томилин рассказал, как он в своей диссертации назвал созданную им операционную систему "первой в стране", и оппонент, сам разработавший аналогичную систему еще раньше, не мог ему возразить, поскольку его разработка была секретной.

Условия секретности усугубили упомянутую выше "проблему копирования": они не позволили распространить и использовать советские достижения пятидесятых-шестидесятых годов в дальнейшем. В одном из выступлений упоминалось, что даже текст постановления ЦК КПСС и Совмина СССР от 23 января 1986 г. "О мерах по раз-

работке и производству персональных ЭВМ в 1986—1990 годы", по понятным причинам представляющий большой исторический интерес, до сих пор остается засекреченным.

В рамках этой обзорной статьи, разумеется, невозможно обозреть все затронутые на конференции темы. Заметим еще, что большое впечатление произвела организованная упомянутая экскурсия на Казанский завод ЭВМ, точнее, в стены фирмы ICL, ставшей его преемником. В советское время завод выпускал около 40 % всей отечественной вычислительной техники и был почти монополистом по выпуску АЦПУ, заменявших тогда принтеры. Интересен, однако, не только исторический аспект. Бренд ICL, некогда принадлежавший знаменитой английской компании, одной из ведущих мировых компаний по выпуску компьютеров, за рубежом ныне не существует. В то же время в России фирма, полное название которой звучит, как ОАО "ICI — КПО ВС", сейчас является одним из самых успешных отечественных предприятий: входит в тройку ведущих российских производителей компьютерного оборудования и, по оценке журнала "Эксперт", является крупнейшей IT-компанией за пределами Москвы и Санкт-Петербурга.

В 2013 г. компания ICL выкупила контрольный пакет своих акций, принадлежавший в то время компании Fujitsu, и стала полностью отечественным предприятием. Строятся новые цеха, компания развивается, представляя таким образом собой яркий пример того, что можно сделать на основе предприятия, бесповоротно, казалось бы, обанкротившегося в начале девяностых. И современники не забывают о своих предшественниках: в стенах фирмы действует музей Казанского завода ЭВМ.

Отметим еще один момент. Как неоднократно отмечалось участниками, на уже третьей по счету конференции, посвященной истории отечественной вычислительной техники, историческая наука была представлена очень слабо. Доминировали доклады-воспоминания участников событий, тогда как давно пора переходить к обобщениям и аналитическим исследованиям, которые некому выполнить, кроме профессиональных историков. А они проявляют удивительное отсутствие интереса: в этой области работают лишь несколько ученых, в основном сотрудников технических учреждений, при этом в единственном профильном академическом Институте истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова это направление, сейчас, кажется, вообще не представлено.

Ю. В. Ревич, "Новая газета"

В. В. Шилов, НИУ "Высшая школа экономики"

**VI международная научно-техническая конференция
"Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем"
Open Semantic Technologies for Intelligent Systems
18—20 февраля 2016 г. Минск. Республика Беларусь**

ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО

Приглашаем принять участие в VI Международной научно-технической конференции "Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем" (OSTIS-2016).

Конференция пройдет в период с 18 по 20 февраля 2016 года в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь.

Рабочие языки конференции: русский, белорусский, английский.

ОСНОВНЫЕ ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Российская ассоциация искусственного интеллекта (РАИИ)
- Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)
- Государственное учреждение "Администрация Парка высоких технологий" (Республика Беларусь)

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Принципы, лежащие в основе семантического представления знаний, и их унификация. Типология знаний и особенности семантического представления различного вида знаний и метазнаний. Связи между знаниями и отношения, заданные на множестве знаний. Семантическая структура глобальной базы знаний, интегрирующей различные накапливаемые знания
- Языки программирования, ориентированные на параллельную обработку семантического представления баз знаний
- Модели решения задач, в основе которых лежит обработка знаний, осуществляемая непосредственно на уровне семантического представления обрабатываемых знаний. Семантические модели информационного поиска, интеграции знаний, анализа корректности и качества баз знаний, сборки информационного мусора, оптимизации баз знаний, дедуктивного и индуктивного вывода в базах знаний, правдоподобных рассуждений, распознавания образов, интеллектуального управления. Интеграция различных моделей решения задач
- Семантические модели восприятия информации о внешней среде и отображения этой информации в базу знаний
- Семантические модели мультимодальных пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем, в основе которых лежит семантическое представление используемых ими знаний, и унификация этих моделей
- Семантические модели естественно-языковых пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем. Структура семантического представления лингвистических баз знаний, описывающих естественные языки и обеспечивающих решение задач понимания естественно-языковых текстов и речевых сообщений, а также задач синтеза естественно-языковых текстов и речевых сообщений, семантически эквивалентных заданным фрагментам баз знаний
- Интегрированные комплексные логико-семантические модели интеллектуальных систем, основанные на семантическом представлении знаний, и их унификация
- Различные технические платформы и варианты реализации интерпретаторов унифицированных логико-семантических моделей интеллектуальных систем, основанных на семантическом представлении знаний
- Средства и методы, основанные на семантическом представлении знаний и ориентированные на проектирование различных типовых компонентов интеллектуальных систем (баз знаний, программ, решателей задач, интерфейсов)
- Средства и методы, основанные на семантическом представлении знаний и ориентированные на комплексное проектирование различных классов интеллектуальных систем (интеллектуальных справочных систем, интеллектуальных обучающих систем, интеллектуальных систем управления, интеллектуальных робототехнических систем, интеллектуальных систем поддержки проектирования и др.)
- Прикладные интеллектуальные системы, основанные на семантическом представлении используемых ими знаний

Вся необходимая информация о предстоящей и предыдущих конференциях OSTIS
находится на сайте конференции <http://conf.ostis.net>

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 07.09.2015. Подписано в печать 26.10.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ1115. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.