

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 23  
2017  
№ 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Левин В. И. Метод раздетерминизации для труднорешаемых задач математического моделирования . . . . . 163
- Димов Э. М., Маслов О. Н., Сухова С. В. Имитационное моделирование деятельности отдела менеджмента качества на базе платформы AnyLogic . . . . . 172
- Маничев В. Б., Митенкова Е. Ф., Жук Д. М., Кожевников Д. Ю., Соловьев А. В., Соловьева Е. В. Использование AL-устойчивых методов решения систем ОДУ для задач изотопной кинетики реакторных систем . . . . . 177

### ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Доморацкий Е. П. Метод статистической малоракурсной реконструкции геометрических характеристик трехмерных объектов по их дискретным проекционным изображениям . . . . . 184

### ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

- Долженко А. И., Глушенко С. А. Динамическая валидация данных в WPF-приложениях . . . . . 188

### БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

- Дворников С. В., Дворников С. С., Иванов Р. В., Гулидов А. А., Чихонадских А. П. Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией . . . 193

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Авдошин С. М., Песоцкая Е. Ю. Интернет вещей: Металлургия . . . . . 199
- Владова А. Ю. Алгоритмическое обеспечение информационной системы геотехнического мониторинга транспорта углеводородов в условиях многолетней мерзлоты . . . . . 205
- Маликов С. Н. Концепция сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями на основе аксиоматического метода . . . . . 212

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Парфенова М. Я. Интегративный подход к оценке технологической эффективности стратегического профиля информационных технологий организации . . . . . 219

Журнал в журнале

### НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Каширина И. Л., Львович Я. Е., Сорокин С. О. Нейросетевое моделирование формирования кластерной структуры на основе сетей ART . . . . . 228
- Михайлюк Т. Е., Жернаков С. В. Об одном подходе к выбору оптимальной архитектуры ПЛИС в нейросетевом логическом базисе . . . . . 233

Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ 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.,  
акад. 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.,  
акад. 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.,  
акад. 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.  
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. В., д. т. н., проф.  
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.  
МАРТЫНОВ В. В., 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.  
САКСОНОВ Е. А., 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.  
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 и базу данных RSCI на платформе Web of Science.  
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

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Vol. 23  
2017  
No. 3

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

## CONTENTS

### MODELING AND OPTIMIZATION

- Levin V. I.** Method of Dedetermination for Intractable Problems of Mathematical modelling . . . . . 163
- Dimov E. M., Maslov O. N., Sukhova S. V.** Simulation activities of the department of quality management based on the platform AnyLogic . . . . . 172
- Manichev V. B., Mitenkova E. F., Zhuk D. M., Kozhevnikov D. Yu., Solovjev A. V., Solovjeva E. V.** AL- Stable Methods in ODE solving for Isotope Kinetics Problems of Reactor Systems . . . . . 177

### DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Domorackiy E. P.** Method of Statistical Few View Reconstruction of Geometrical Characteristics of Three-Dimensional Objects by their Discrete Projection Images 184

### SOFTWARE ENGINEERING

- Doljenko A. I., Glushenko S. A.** Dynamic Data Validation in WPF Applications . . 188

### CRYPTOSAFETY INFORMATION

- Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Ivanov R. V., Gulidov A. A., Chixonadskh A. P.** Protection of Structural Noise Radio Channel Frequency Shift Keying . . . . . 193

### APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES

- Avdoshin S. M., Pesotskaya E. Yu.** Internet of Things: Metallurgy . . . . . 199
- Vladova A. Ju.** Algorithmic Support of Information System for Geotechnical Monitoring Of Hydrocarbon Transportation in Permafrost Conditions . . . . . 205
- Malikov S. N.** Construction of the Concept of Service-Oriented Approach to Management of Information Technologies, Based on the Axiomatic Method . . . . . 212

### INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ORGANIZATIONAL AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

- Parfenova M. Ya.** Integrative Approach to Assessing the Effectiveness of the Strategic Profile of the Organization of Information Technology . . . . . 219

### Journal-in-journal

### NEUROTECHNOLOGIES

- Kashirina I. L., Lvovich Ya. E., Sorokin S. O.** Neural Network Modeling of the Formation of Cluster Structures on the Basis of the Networks ART . . . . . 228
- Mikhailyuk T. E., Zhernakov S. V.** On an Approach to the Selection of the Optimal FPGA Architecture in Neural Network Logical Basis . . . . . 233

### 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., 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., 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., 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.  
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. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.  
Martynov V. V., 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.  
Saksonov E. A., 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.  
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"

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 62-50; 519.7; 519.8

**В. И. Левин**, д-р техн. наук, проф., e-mail: vilevin@mail.ru,  
Пензенская государственная технологическая академия

## Метод раздетерминизации для труднорешаемых задач математического моделирования

*Предложен новый метод — раздетерминизация, предназначенный для решения проблемы вычисления детерминированных функций, имеющих так называемые особые точки, где у функции не существует определенного значения. Целью работы является описание подхода, позволяющего осуществлять деление на нуль и тем самым исключать особые точки функций. Предложенный метод заключается в переходе от проблематичной с точки зрения вычисления детерминированной функции к соответствующей недетерминированной, а именно интервальной функции, путем замены детерминированных параметров функции соответствующими интервальными параметрами. Благодаря этой замене значения функции в особых точках становятся интервальными и вполне определенными значениями. Последнее и позволяет решить проблему вычисления функции. Решение указанной проблемы достигается легализацией деления на нуль путем интервализации вычислений. При этом используется принцип вырезания окрестности нуля из интервала, являющегося делителем интервальной дроби, представляющей исследуемую функцию. Для упрощенной путем вырезания интервальной функции выведены рабочие формулы, основанные на основных положениях интервальной математики и позволяющие легко вычислять значения этой функции. Предложенный в работе подход к решению проблемы вычисления функций с особыми точками имеет важное значение для всех тех классов прикладных систем, в которых эта проблема реально существует. Речь здесь идет о тех системах, функции-характеристики которых имеют некоторое число особых точек. Подобные системы встречаются чаще всего в телеметрии, теории и практике надежности, гуманитарной сфере и ряде других областей. Особенности этих областей в том, что в них не всегда применимы классические методы детерминистской математики. Это побуждает искать новые подходы к решению возникающих здесь задач.*

**Ключевые слова:** интервал, интервальная функция, интервальные вычисления, раздетерминизация, деление на нуль

### Введение

Появление в XX веке разнообразных сложных систем (системы управления экономикой, ракетно-космические системы, атомная энергетика и др.) выдвинуло новые сложные задачи по их изучению. Современная наука и практика обработки информации уже вполне успешно справляются с задачами исследования различных сложных систем с полностью определенными (детерминированными) параметрами. Эти задачи обычно формулируются как задачи расчета, анализа и синтеза тех или иных функций с детерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками изучаемых систем. Но на практике часто встречаются другие системы — с неточно известными, т.е. неполностью определенными (недетерминированными) параметрами. Причины появления таких систем заключаются в естественной неопределенности, свойственной многим реальным процессам, происходящим в системах; в неточном задании параметров большинства систем из-за неизбежных погрешностей при их вычислении или измерении;

в изменении во времени параметров систем; в необходимости или целесообразности совместного исследования целых семейств однотипных систем, имеющих одинаковые функции-характеристики и различающихся лишь значениями параметров этих функций. Учет неопределенности систем особенно важен при их проектировании, поскольку полная определенность в работе системы появляется на последних этапах ее создания.

Исследование введенных неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками систем. Все эти задачи значительно сложнее их вышеупомянутых детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с детерминированными параметрами. Это усложнение связано с тем, что алгебра недетерминированных чисел сложнее алгебры детерминированных чисел. В связи с этим для решения указанных задач приходится применять тот или иной специализированный математический аппа-

рат: теорию вероятностей [1]; теорию нечетких множеств [2]; интервальную математику [3]; многозначные функции [4].

Применение этого математического аппарата позволяет строить и изучать более адекватные математические модели сложных систем с недетерминированными параметрами, учитывающие неопределенность поведения таких систем [5—13].

Однако на практике встречаются еще более трудные для изучения классы сложных систем, в которых даже математические модели с детерминированными параметрами приводят к задачам, не имеющим определенного решения. Таковы, например, сложные системы, изучение которых сводится к решению системы линейных уравнений, определитель которой в некоторых случаях может быть равен нулю. Именно для подобных систем раздетерминизация, т.е. переход к соответствующей недетерминированной системе, позволяет получить необходимое решение. Так, для сложных систем, изучение которых сводится к решению системы линейных уравнений (с возможно нулевым определителем), определитель после раздетерминизации становится численно равным интервалу, включающему, кроме нуля, также ненулевые значения, что открывает возможность получения решения.

В настоящей работе рассматриваются задачи изучения именно таких классов сложных систем. В качестве раздетерминизации используется процедура перехода от системы с детерминированными параметрами к системе с недетерминированными — интервальными параметрами. В качестве математического аппарата используется интервальная математика, точнее — интервальная алгебра. Раздетерминизация является процедурой, обратной детерминизации, широко используемой в работах автора по изучению поведения неопределенных систем [14—19].

## 1. Постановка задачи

Предположим, что имеется некоторая практическая задача, сводящаяся с математической точки зрения к изучению (расчету и анализу поведения) детерминированной функции одной независимой переменной — характеристики изучаемой системы:

$$y = f(x), \quad (1)$$

однозначно отображающей заданное множество  $X = \{x\}$  независимых переменных  $x$  в заданное множество  $Y = \{y\}$  зависимых переменных  $y$ , в соответствии с законом  $f$ , который и называется функцией. Хорошо известно, что задача расчета (вычисления значений) функции (1) принципиально всегда решается с помощью адекватного этой задаче математического аппарата алгебры вещественных чисел, с использованием подходящих методов вычислений, а задача анализа поведения функции (1) —

с помощью адекватного ей аппарата классического дифференциального исчисления.

Рассмотрим далее распространенную ситуацию, когда изучаемая функция (1) имеет вид дроби

$$f(x) = f_1(x)/f_2(x) \quad (2)$$

с числителем — функцией  $f_1(x)$  и знаменателем — функцией  $f_2(x)$ . В этой ситуации расчет и анализ поведения функции (1) затрудняется, поскольку в каждой точке с нулевым знаменателем эта функция не существует (если в этой точке числитель не равен нулю) либо принимает бесконечное множество значений, т.е. не имеет определенного значения (если в этой точке числитель равен нулю). Очевидно, что для функций с указанными точками (их естественно называть особыми) должны быть разработаны специальные методы расчета и анализа поведения функций, позволяющие исключить эффект влияния таких особых точек. Задача настоящей работы состоит в построении двух систематических процедур, связанных с изучением поведения детерминированных функций вида (2). А именно: 1) процедура расчета (т.е. вычисления значений) детерминированной функции типа (2), содержащей особые точки; 2) процедура анализа поведения такой же детерминированной функции.

## 2. Обзор литературы

Ниже будем исследовать поведение детерминированных функций типа (2), содержащих особые точки, имея в виду преодоление трудности, связанной с наличием таких точек, путем раздетерминизации, т.е. перехода от функции (2) к соответствующей недетерминированной функции (функции с недетерминированными, точнее — с интервальными, параметрами). В связи с этим представляет интерес обзор литературы, посвященной изучению различных неопределенных объектов.

Проблема изучения объектов, характеризуемых той или иной неопределенностью, возникла впервые в начале Второй мировой войны в связи с необходимостью управления огнем зенитной артиллерии в условиях случайного движения воздушных целей. Соответствующими задачами занимались выдающиеся математики-вероятностники Н. Винер [5], А. Н. Колмогоров [6] и их многочисленные последователи. Однако широкое развитие исследований по изучению гражданских объектов, работающих в условиях неопределенности, началось только в конце 1950-х — начале 1960-х гг. в рамках математической статистики и ее направлений — обработка данных и планирование экспериментов [7, 8].

1970-е—1980-е гг. привели к более широкому пониманию неопределенности, включившей в себя теперь не только случайность, но и незнание, неединственность возможных исходов, неопределенность целей, многокритериальность при реше-

нии задач оптимизации. В связи с этим появились новые подходы к описанию неопределенности: теория нечетких множеств, принцип недоопределенной модели, принятие решений в многокритериальных задачах [2, 9, 10].

С 1980-х гг. начали интенсивно применять подход к описанию неопределенности, базирующийся на интервальной математике, позволяющей получать оценки характеристик неопределенных систем с гарантированной точностью [11–18]. При этом указанный подход применяли сначала в метрологии для определения интервального значения известной функции при интервальных значениях аргументов. Затем его развитие стало происходить по двум направлениям. За рубежом этот подход развивался как средство автоматического учета ошибок округления при численном решении задач на компьютерах, в то время как в СССР и России ученые развивали его в целях нахождения области возможных значений результата вычислений с учетом структуры данных и функций, заданных в символьном виде.

Наконец, с 1990-х гг. начали изучать очень важную в практических приложениях задачу исследования поведения произвольной недетерминированной функции с интервальными параметрами, являющуюся аналогом хорошо известной задачи математического анализа — исследование поведения детерминированной функции средствами классического дифференциального исчисления [20].

### 3. Используемые методы

Изложим сначала основную идею предлагаемого метода. Рассмотрим детерминированную функцию вида дроби (2) с возможными особыми точками, т.е. точками, в которых знаменатель функции (2) равен нулю. В таких точках, как уже говорилось в разд. 1, функция (2) либо не существует, либо не имеет определенного значения. Мы предлагаем метод, позволяющий придать функции (2) одно определенное значение во всех ее точках, включая и особые, тем самым исключается влияние особых точек на характер поведения функции. Предлагаемый метод состоит в переходе от детерминированной функции (2) к соответствующей интервальной функции

$$\tilde{f}(x) = \tilde{f}_1(x)/\tilde{f}_2(x) \quad (3)$$

путем замены всех точно заданных параметров исходной функции соответствующими интервальными параметрами. Эту процедуру естественно назвать раздетерминизацией. В результате раздетерминизации все точные значения числителя  $y_1 = f_1(x)$  и знаменателя  $y_2 = f_2(x)$  исходной функции  $f(x)$  переходят в соответствующие интервальные значе-

ния  $\tilde{y}_1 = \tilde{f}_1(x)$ ,  $\tilde{y}_2 = \tilde{f}_2(x)$ , где  $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2$  — интервалы  $\tilde{y}_1 = [y_{11}, y_{12}]$ ,  $\tilde{y}_2 = [y_{21}, y_{22}]$ , а все точные значения самой исходной функции  $y = f(x)$  — в соответствующие интервальные значения этой функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , где  $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ . При этом все особые точки исходной функции после раздетерминизации можно исключить из рассмотрения. Действительно, в каждой такой точке знаменатель  $f_2(x)$  исходной функции равен нулю, но раздетерминируемый знаменатель  $\tilde{f}_2(x)$  в этой точке равен уже не нулю, а интервалу, содержащему нуль. Деление на такой интервал в интервальной математике не рассматривается и предполагается невозможным [3]. Однако это ошибочная точка зрения, поскольку, если вырезать из интервала малый подынтервал, содержащий нуль, то оставшаяся, большая часть интервала уже не будет содержать нуля и деление на такой интервал по методологии интервальной математики окажется вполне возможным. Таким образом, использование метода раздетерминизации исходной детерминированной функции (2) в сочетании с вырезанием нуля из интервала возможных значений раздетерминируемого знаменателя этой функции позволяет ликвидировать все особые точки исходной функции (2) и применить к изучению поведения интервальной функции [3, 11, 14, 19, 20]. Разумеется, предлагаемый нами метод изучения поведения детерминированной функции, содержащей особые точки, является приближенным, поскольку при вырезании интервала, содержащего нуль, отбрасывается часть возможных значений подфункции — знаменателя изучаемой функции. Однако погрешность такого приближения может быть сделана как угодно малой методом уменьшения ширины вырезаемого интервала.

Опишем теперь метод раздетерминизации подробнее. Как известно из интервальной математики [3], любая операция над интервалами определяется как теоретико-множественное обобщение соответствующей операции над точными вещественными числами. То есть если  $a, b$  — точные вещественные числа,  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ ,  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  — интервалы,  $\cdot$  — операция над точными вещественными числами,  $\circ$  — соответствующая операция над интервалами, то по определению получаем

$$\tilde{a} \circ \tilde{b} \equiv [a_1, a_2] \circ [b_1, b_2] \equiv \{a \cdot b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \quad (4)$$

Также получаем формулу для операции деления двух интервалов

$$\tilde{a}/\tilde{b} \equiv [a_1, a_2]/[b_1, b_2] \equiv \{a/b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}, 0 \notin \tilde{b}\}. \quad (5)$$

Дополнительное требование относительно нуля в этой формуле связано с невозможностью деления

вещественного числа на нуль. Учитывая, что операция деления вещественных чисел обратна операции умножения, формулу (5) можно переписать в терминах операции умножения

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &\equiv [a_1, a_2]/[b_1, b_2] \equiv \\ &\equiv \{a_1, a_2\} \cdot [1/b_1, 1/b_2], 0 \notin \tilde{b}. \end{aligned} \quad (6)$$

А операция умножения интервалов, как известно из работы [3], выполняется по формуле такого вида:

$$\tilde{c} \cdot \tilde{d} \equiv [c_1, c_2] \cdot [d_1, d_2] = [\min_{i,j} (c_i \cdot d_j), \max_{i,j} (c_i \cdot d_j)]. \quad (7)$$

Соединяя формулы (6), (7), получаем окончательную формулу для операции деления двух интервалов:

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &\equiv [a_1, a_2]/[b_1, b_2] = \\ &= [\min_{i,j} (a_i/b_j), \max_{i,j} (a_i/b_j)], 0 \notin \tilde{b}. \end{aligned} \quad (8)$$

Эта формула, однако, пригодна для выполнения операции деления интервалов только в тех случаях, когда интервал-делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  не содержит нуля. А что делать, если он содержит нуль? Интервальная математика не отвечает на этот вопрос [3].

Мы предлагаем следующий ответ на него. Будем считать, что интервал-делитель содержит нуль внутри себя (а не на одном из концов). Вырежем из интервала  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  (делителя в формуле (8) деления двух интервалов) некоторый достаточно малый подынтервал  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$ , содержащий нуль, тем самым заменив интервал  $\tilde{b}$  биинтервалом

$$\tilde{b}'' = \tilde{b}/\tilde{b}^* = \tilde{b}' \cup \tilde{b}'', \quad (9)$$

где  $\tilde{b}' = [b_1, b'_1]$ ,  $\tilde{b}'' = [b'_2, b_2]$  (рис. 1).

Выполненную выше операцию естественно назвать операцией вырезания подынтервала из указанного интервала. Объективный смысл этой операции — приближение исходного интервала  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  биинтервалом (объединением двух непересекающихся интервалов) вида  $\tilde{b}' \cup \tilde{b}''$ , выражающимся по формуле (9), таким образом, чтобы полученный биинтервал не содержал неприемлемого для нас мно-

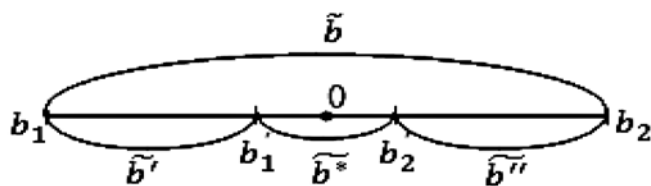


Рис. 1

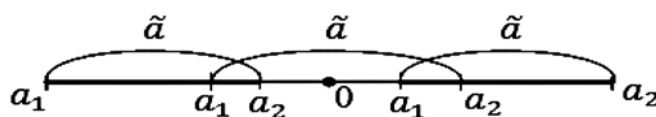


Рис. 2

жества точек. В данном случае это множество точек — интервал  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$ , содержащий нуль. Таким образом, если мы хотим разделить интервал  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, надо заменить в общей формуле деления (5) интервал  $\tilde{b}$  биинтервалом  $\tilde{b}''$  вида (9), не содержащим нуль. Явный вид этой формулы найдем, используя общий принцип теоретико-множественного обобщения операций над точными вещественными числами (4). Имеем

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &\approx \tilde{a}/(\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = \tilde{a}/(\tilde{b}' \cup \tilde{b}'') = \\ &= \{a/b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}' \cup \tilde{b}''\} = \\ &= \{(a/b) \cup (a/b'') \mid a \in \tilde{a}, b' \in \tilde{b}', b'' \in \tilde{b}''\} = \\ &= \{a/b' \mid a \in \tilde{a}, b' \in \tilde{b}'\} \cup \{a/b'' \mid a \in \tilde{a}, b'' \in \tilde{b}''\} = \\ &= (\tilde{a}/\tilde{b}') \cup (\tilde{a}/\tilde{b}''). \end{aligned}$$

Итак, деление интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$ , содержащий нуль, можно выполнить по приближенной формуле

$$\tilde{a}/\tilde{b} = (\tilde{a}/\tilde{b}') \cup (\tilde{a}/\tilde{b}''), \quad (10)$$

где  $\tilde{b}'$  и  $\tilde{b}''$  — подынтервалы интервала  $\tilde{b}$ , не содержащие нуля, объединение которых приближенно равно  $\tilde{b}$  (см. рис. 1). Поскольку  $\tilde{b}'$  и  $\tilde{b}''$  не содержат нуля, обе скобки в правой части (10) можно вычислять по формуле (8). В развернутом виде формула (10) переписывается как

$$\begin{aligned} [a_1, a_2]/[b_1, b_2] &\equiv \\ &\equiv [a_1, a_2]/[b_1, b'_1] \cup [a_1, a_2]/[b'_2, b_2]. \end{aligned} \quad (11)$$

#### 4. Рабочие формулы деления интервала на интервал, содержащий нуль

Общую формулу (10) деления на интервал, содержащий нуль, или эквивалентную ей формулу (11) можно значительно упростить и конкретизировать, рассмотрев возможные типы области делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  (рис. 2), при упрощении используем соотношения для делителя  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  (см. рис. 1):

$$\underbrace{b_1 < b'_1}_{<0} < \underbrace{b'_2 < b_2}_{>0}. \quad (12)$$

Случай 1.

$$\tilde{a} = [a_1, a_2] \geq 0. \quad (13)$$

Вычисляя скобки в правой части формулы (10) по формуле (8), найдем формулу деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, в виде биинтервала:

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= \underbrace{[a_2/b'_1, a_1/b_1]}_{<0} \cup \underbrace{[a_1/b_2, a_2/b'_2]}_{>0}, \\ &\text{при } \tilde{a} = [a_1, a_2] \geq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Случай 2.

$$\tilde{a} = [a_1, a_2] \leq 0. \quad (15)$$

Здесь, вычисляя аналогично предыдущему скобки в правой части формулы (10) по формуле (8), получим формулу деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, в виде биинтервала

$$\tilde{a}/\tilde{b} = \underbrace{[a_1/b'_2, a_2/b_2]}_{<0} \cup \underbrace{[a_2/b_1, a_1/b'_1]}_{>0},$$

при  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \leq 0$ . (16)

Случай 3.

$$\tilde{a} = [a_1, a_2], \text{ такой, что } a_1 < 0 < a_2. \quad (17)$$

В этом случае, вычисляя аналогично предыдущему скобки в правой части (10) по формуле (8), получим формулу деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, сначала в виде объединения четырех интервалов:

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= (\tilde{a}/\tilde{b}') \cup (\tilde{a}/\tilde{b}'') = \\ &= [a_1, a_2]/[b_1, b'_1] \cup [a_1, a_2]/[b'_2, b_2] = \\ &= [a_1, 0]/[b_1, b'_1] \cup [0, a_2]/[b_1, b'_1] \cup \\ &\cup [a_1, 0]/[b'_2, b_2] \cup [0, a_2]/[b'_2, b_2] = \\ &= [0, a_1/b'_1] \cup [a_2/b'_1, 0] \cup \\ &\cup [a_1/b'_2, 0] \cup [0, a_2/b_2], \end{aligned}$$

далее, после объединения одинаково подчеркнутых интервалов, в виде такого объединения двух интервалов:

$$\tilde{a}/\tilde{b} = \underbrace{[a_1/b'_2, a_1/b'_1]}_{<0} \cup \underbrace{[a_2/b'_1, a_2/b_2]}_{>0},$$

и, наконец, используя операции непрерывной логики

$$\wedge = \min, \vee = \max, \quad (18)$$

в виде одного интервала

$$\tilde{a}/\tilde{b} = [a_1/b'_2 \wedge a_2/b'_1, a_1/b'_1 \vee a_2/b_2]. \quad (19)$$

### 5. Случай деления интервалов, симметричных относительно нуля

Особый практический интерес представляет один подслучай случая 3, когда оба интервала — делимое  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  и делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  — расположены симметрично относительно нуля, в соответствии с чем естественно и вырезаемый из интервала  $\tilde{b}$  подынтервал  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$  сделать симметричным относительно нуля. Тогда условия симметричности интервалов относительно нуля

$$a_2 = -a_1, b_2 = -b_1, b'_2 = -b'_1. \quad (20)$$

Подставляя соотношения (20) в формулу (19), найдем

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= [a_1, a_2]/([b_1, b'_1] \cup [b'_2, b_2]) = \\ &= \underbrace{[(-a_2/b'_2) \wedge (a_2/-b'_2)]}_{<0}, \underbrace{[(-a_2/-b'_2) \vee (a_2/b'_2)]}_{>0}. \end{aligned}$$

Окончательно получим

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= [a_1, a_2]/([b_1, b'_1] \cup [b'_2, b_2]) = \\ &= [-a_2/b'_2, a_2/b'_2]. \end{aligned} \quad (21)$$

Как видно из формулы (21), деление интервальных чисел, симметричных относительно нуля, дает интервальное число, симметричное относительно нуля.

Интерпретацию формулы (21) можно легко дать, учитывая, что  $a_2$  — это полуширина интервала делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ ,  $b'_2$  — полуширина интервала-выреза  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$  в интервале-делителе  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , обеспечивающего отсутствие в этом интервале нуля и тем самым — возможность деления интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$ . Таким образом, смысл формулы (21) состоит в следующем: частное от деления интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$ , содержащий нуль (в случае, если интервалы симметричны относительно нуля, как и вырез в интервале  $\tilde{b}$ , обеспечивающий отсутствие в нем нуля), равно интервалу (также симметричному относительно нуля), левая граница которого равна частному от деления ширины интервала-делимого  $\tilde{a}$  на ширину интервала-выреза  $\tilde{b}^*$ , взятому со знаком минус, а правая граница — этому же частному, взятому со знаком плюс.

Формуле (21) можно придать более ясную форму, в которой числитель и знаменатель вычисляемой интервальной дроби представлены в явном виде. Для этого обозначим ширину интервала-делимого  $\tilde{a}$  через  $a$ , ширину интервала-делителя  $\tilde{b}$  через  $b$ , ширину интервала-выреза  $\tilde{b}^*$  через  $b^*$ . Далее обозначим через  $\beta$  долю ширины выреза  $b^*$  от ширины  $b$  всего интервала, в котором этот вырез выполняется ( $0 < \beta < 1$ ) (коэффициент вырезания). Тогда величины в правой части (21) выражаются в виде

$$a_2 = a/2, b'_2 = b^*/2 = \beta b/2,$$

и формула (21) принимает искомую форму

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= [-0,5a, 0,5a]/[-0,5b, 0,5b] = \\ &= [-a/\beta b, a/\beta b]. \end{aligned} \quad (22)$$

Коэффициент  $\beta$  в выражении (22) необходимо подбирать достаточно близким к нулю, поскольку, чем он ближе к нулю, тем выше точность приближенной формулы (22).

**Пример 1.** Вычислить дробь  $[-2,2]/[-5,5]$ , полученную делением интервальных чисел, симметричных относительно нуля. Примем коэффициент вырезания  $\beta = 0,1$ . Далее учтем, что в нашем случае

ширина интервала-делимого равна  $a = 2 - (-2) = 4$ , ширина интервала-делителя  $b = 5 - (-5) = 10$ , тогда по формуле (22) получим

$$[-2, 2] / [-5, 5] = [-4 / (0,1 \cdot 10), 4 / (0,1 \cdot 10)] = [-4/4].$$

Как и следовало ожидать, результатом деления оказалось также интервальное число, симметричное относительно нуля.

### 6. Случай деления интервала на интервал с нулем на конце

Ранее, в разд. 3—5, был рассмотрен случай, когда интервал-делитель содержит нуль внутри себя. В случае, когда нуль находится на одном из концов интервала-делителя, формулы деления интервалов изменяются. Это связано с тем, что в указанном случае интервал-делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  приобретает одну из двух конкретных форм, отличных от ранее рассмотренной формы, указанной на рис. 1, и эти две формы таковы:

$$\tilde{b} = [0, b] \text{ или } \tilde{b} = [b, 0]. \quad (23)$$

Они показаны на рис. 3. Последующий вывод рабочих формул деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b}$  проведем отдельно для каждого возможного сочетания типа интервала  $\tilde{a}$  и типа интервала  $\tilde{b}$ .

Исходная приближенная формула для операции деления интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$  такова:

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*). \quad (24)$$

Формула (24) имеет для рассматриваемого здесь случая тот же смысл, что и формула (10) для случая нахождения нуля внутри интервала-делителя. Вывод рабочих формул деления начнем со случая формы 1 интервала-делителя  $\tilde{b}$  (см. рис. 3). В этом случае скобка в формуле (24) равна

$$(\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [0, b] \setminus [0, b'] = [b, b'], \quad (25)$$

где  $0 < b' < b$ .

Как видно из (25), интервал-делитель в правой части формулы (24) не содержит нуля, поэтому деление в этой формуле можно выполнять по формуле (8). Получение соответствующих рабочих формул проведем отдельно для возможных трех типов интервала-делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ :

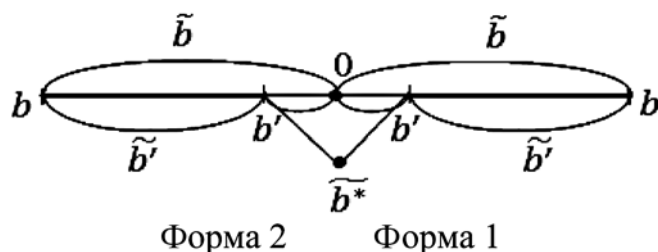


Рис. 3

1)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \geq 0$ , тогда по формуле (8) получаем из формулы (24) следующую рабочую формулу:

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b', b] = [a_1/b, a_2/b'] = [a_1/b, a_2/\beta b], \quad (26)$$

где  $\beta = b'/b$  — коэффициент ширины выреза  $b'$  в интервале-делителе  $\tilde{b}$ ;

2)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \leq 0$ , тогда по формуле (8) получаем из формулы (24) рабочую формулу

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b', b] = [a_1/b', a_2/b] = [a_1/\beta b, a_2/b], \quad (27)$$

где  $\beta$  — тот же коэффициент;

3)  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  такой, что  $a_1 < 0 < a_2$ , тогда из (24) по формуле (8) получаем следующую рабочую формулу:

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b', b] = [a_1/b', a_2/b'] = [a_1/\beta b, a_2/\beta b], \quad (28)$$

где  $\beta$  — тот же коэффициент.

Теперь сделаем ту же процедуру для случая формы 2 интервала-делителя  $\tilde{b}$  (см. рис. 3). В этом случае скобка в формуле (24) равна

$$(\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [b, 0] \setminus [b', 0] = [b, b'], \quad (29)$$

где  $b < b' < 0$ .

Как видно из (29), интервал-делитель в правой части формулы (24) и в этом случае не содержит нуля, поэтому деление и здесь можно выполнять по формуле (8). Как и в случае формы 1 интервала-делителя  $\tilde{b}$ , рассматриваем три возможных типа интервала-делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ :

1)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \geq 0$ ; по формуле (8) из формулы (24) получаем следующую рабочую формулу:

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b, b'] = [a_2/b', a_1/b] = [a_2/\beta b, a_1/b], \quad (30)$$

где  $\beta = b'/b$  — коэффициент ширины выреза  $b'$  в интервале-делителе  $\tilde{b}$ ;

2)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \leq 0$ , по формуле (8) из формулы (24) получаем рабочую формулу

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b, b'] = [a_2/b, a_1/b'] = [a_2/b, a_1/\beta b], \quad (31)$$

где  $\beta$  — тот же коэффициент;

3)  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  такой, что  $a_1 < 0 < a_2$ , по формуле (8) получаем из (24) рабочую формулу

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b, b'] = [a_2/b', a_1/b'] = [a_2/\beta b, a_1/\beta b], \quad (32)$$

где  $\beta$  — тот же коэффициент.

Сравнение формул (26) с (30), (27) с (31) и (28) с (32) показывает, что эти двойственные формулы (в них интервал-делимое  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  одного и



того же типа, а интервал-делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  (противоположного типа) различаются лишь тем, что выражение для нижней границы результата деления в одной формуле является выражением для верхней границы результата деления в другой формуле, и наоборот.

## 7. Алгоритм решения поставленных задач

Обратимся к двум задачам, поставленным в разд. 1. Будем решать эти задачи в условиях, когда обычные методы математического анализа, основанные на понятии предельного перехода в особую точку, не работают ввиду отсутствия предела, так что получить решение невозможно даже для простейших особых точек — вида  $0/0$ . Поэтому для получения решения используем здесь принципиально иной подход, основанный на интервальной детерминизации, т.е. переходе от исходной детерминированной функции к соответствующей недетерминированной — интервальной — путем замены детерминированных параметров исходной функции соответствующими интервальными параметрами. В полученной интервальной функции особым точкам вида  $0/0$  и  $a/0$  ( $a \neq 0$ ) исходной детерминированной функции соответствуют особые интервальные точки  $\tilde{0}/\tilde{0}$  и  $\tilde{a}/\tilde{0}$  ( $\tilde{0}$  — интервал, содержащий 0,  $\tilde{a}$  — интервал, не содержащий 0). После этого для решения задачи расчета функции следует вычислить значения функции во всех ее интервальных неособых точках, используя общеизвестные методы вычисления интервальных функций [3], и во всех интервальных особых точках, используя изложенные выше специальные методы вычислений. После этого совокупность проведенных вычислений с помощью предложенных ранее методов анализа [20] позволит выполнить анализ поведения имеющейся функции. Из всех указанных процедур новыми являются только процедуры нахождения интервальных функций в интервальных особых точках с помощью специальных методов вычислений, изложенных в разд. 4–6. Поэтому ниже мы ограничимся демонстрацией выполнения только этих процедур при решении прикладных задач.

**Пример 2.** Найти решение следующей детерминированной системы линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 3x_1 + 4x_2 &= 5 \\ 3x_1 + 4x_2 &= 6 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Сразу видно, что в заданной детерминированной постановке система уравнений (33) не имеет решений, поскольку при равенстве левых частей обоих уравнений их правые части различны, так что эти уравнения противоречивы. О том же говорит и алгебра: определитель системы (33)

$$D = \begin{vmatrix} 3 & 4 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = 3 \cdot 4 - 3 \cdot 4 = 0,$$

т.е. равен нулю, а производные от него определители  $D_1, D_2$ , полученные заменой 1-го и 2-го столбцов столбцом свободных членов,

$$D_1 = \begin{vmatrix} 5 & 4 \\ 6 & 4 \end{vmatrix} = 5 \cdot 4 - 6 \cdot 4 = -4,$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} 3 & 5 \\ 3 & 6 \end{vmatrix} = 3 \cdot 6 - 3 \cdot 5 = 3,$$

не равны 0, так что система (33) не имеет решений. Однако система (33) вполне может быть реалистичной, например, представлять собой результат повторных измерений одного и того же объекта, т.е. процесс последовательного накопления информации в некотором реальном объекте. Поэтому система уравнений (33) может иметь реальное решение, если постановку задачи изменить, приблизив ее к реальности. Этим изменением может быть более близкая к реальности совокупность недетерминированных (интервальных) коэффициентов уравнений, например, такая: вместо  $3 \rightarrow [2,4]$ , вместо  $4 \rightarrow [3,5]$ , вместо  $5 \rightarrow [4,6]$ , вместо  $6 \rightarrow [5,7]$ . Тогда система (33) будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} [2,4]\tilde{x}_1 + [3,5]\tilde{x}_2 &= [4,6] \\ [2,4]\tilde{x}_1 + [3,5]\tilde{x}_2 &= [5,7] \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Под решением интервальной линейной системы уравнений (34) будем понимать интервальную версию выражений Крамера для системы (33), т.е.

$$\tilde{x}_1 = \frac{\begin{vmatrix} [4,6] & [3,5] \\ [5,7] & [3,5] \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} [2,4] & [3,5] \\ [2,4] & [3,5] \end{vmatrix}},$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{\begin{vmatrix} [2,4] & [4,6] \\ [2,4] & [5,7] \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} [2,4] & [3,5] \\ [2,4] & [3,5] \end{vmatrix}}. \quad (35)$$

С использованием общих методов вычисления интервальной функции [3] вычисляем определители в правых частях (35):

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} [2,4] & [3,5] \\ [2,4] & [3,5] \end{vmatrix} &= [2,4] \cdot [3,5] - [2,4] \cdot [3,5] = \\ &= [2 \cdot 3,4 \cdot 5] - [2 \cdot 3,4 \cdot 5] = \\ &= [6,20] - [6,20] = [-14,14]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} [4,6] & [3,5] \\ [5,7] & [3,5] \end{vmatrix} &= [4,6] \cdot [3,5] - [5,7] \cdot [3,5] = \\ &= [4 \cdot 3,6 \cdot 5] - [5 \cdot 3,7 \cdot 5] = \\ &= [12,30] - [15,35] = [-23,15]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} [2,4] & [4,6] \\ [2,4] & [5,7] \end{vmatrix} &= [2,4] \cdot [5,7] - [2,4] \cdot [4,6] = \\ &= [2 \cdot 5,4 \cdot 7] - [2 \cdot 4,4 \cdot 6] = \\ &= [10,28] - [8,24] = [-14,20]. \end{aligned}$$

Подставляя вычисленные определители в выражения (35) для  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$ , используя формулу (19) для деления интервалов, содержащих нуль, и учитывая,

что в выражении для  $\tilde{x}_1$  у делимого  $a_1 = -23$ ,  $a_2 = 15$ , а в выражении для  $\tilde{x}_2$  у делимого  $a_1 = -14$ ,  $a_2 = 20$  и в обоих выражениях ширина делителя равна  $b_2 - b_1 = 14 - (-14) = 28$ , приняв ширину выреза нуля в 10 % ширины делителя и симметрично относительно нуля, т.е.  $b'_2 - b'_1 = \beta(b_2 - b_1) 0,1 \cdot 28 = 2,8$ , так что  $b'_1 = -1,4$ , а  $b'_2 = 1,4$ , находим значения  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$ :

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= [-23,15]/[-14,14] = \\ &= [(-23/1,4) \wedge (15/-1,4), (-23/-1,4) \vee (15/1,4)] = \\ &= [-16,4; 16,4]; \\ \tilde{x}_2 &= [-14,20]/[-14,14] = \\ &= [(-14/1,4) \wedge (20/-1,4), (-14/-1,4) \vee (20/1,4)] = \\ &= [-14,3; 14,3]. \end{aligned} \quad (36)$$

Видим, что система линейных уравнений, которая в детерминированном варианте (33) не имела решения, после интервальной раздетерминизации приобретает форму (34), уже имеющую решение (36).

## 8. Обсуждение

Ранее мы убедились в том, что предложенная процедура раздетерминизации, т.е. переход от модели детерминированной системы к модели недетерминированной интервальной системы, придает изучаемой системе новое важное свойство: в точках, в которых знаменатель функции-характеристики прежней системы обращался в нуль (особые точки), вследствие чего характеристика в этих точках не существовала, знаменатель функции-характеристики новой системы равен интервалу, включающему, кроме нуля, бесконечное множество ненулевых значений, что делает возможным существование характеристики системы и в особых точках. Благодаря этому свойству предложенная очень простая процедура раздетерминизации, заключающаяся в замене детерминированных параметров характеристики изучаемой системы соответствующими интервальными параметрами, позволяет изучать исчерпывающим образом системы, характеристики которых в базовой детерминированной модели не везде существуют. Примерами таких систем могут служить разнообразные неклассические информационные системы, применяемые в телеметрии, надежности, гуманитарных областях и т.д. Их особенность состоит в том, что они не могут быть описаны средствами классической детерминированной математики. Поэтому для их адекватного описания нужно придумать либо новый, адекватный проблеме, математический аппарат, либо новую математическую модель системы, поддающуюся адекватному описанию средствами какого-нибудь известного математического аппарата. Примером первого подхода может служить предложенный для описания гуманитарных систем аппарат нечетких множеств [2]. Примером второго

подхода служит предложенный в этой работе раздетерминизационный подход.

## Заключение

В настоящей работе предложен метод раздетерминизации для решения проблемы вычисления детерминированных функций, имеющих так называемые особые точки, в которых определенного значения у функции не существует. Предложенный метод состоит в переходе от проблемной детерминированной функции к соответствующей недетерминированной (в нашем случае — интервальной) функции путем замены детерминированных параметров функции соответствующими интервальными параметрами. Благодаря этому значения функции в особых точках становятся вполне определенными интервальными значениями, что и позволяет решить эту проблему. Решение проблемы достигается легализацией деления на нуль путем интервализации вычислений. Такой подход к решению проблемы вычисления функций с особыми точками имеет важное значение для некоторых классов прикладных систем, в которых эта проблема существует. Эти системы встречаются в телеметрии, надежности, гуманитарной сфере и некоторых других областях, в которых не всегда применимы классические методы детерминистской математики, что заставляет искать новые подходы к решению возникающих здесь задач.

## Список литературы

1. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 2004. 350 с.
2. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
3. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. М.: Мир, 1987. 360 с.
4. Горбань И. И. Феномен статистической устойчивости. Киев: Наукова Думка, 2014. 370 с.
5. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. New-York: Technology Press and Wiley, 1949. 180 p.
6. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Известия АН СССР. Математика. 1941. № 5. С. 3—14.
7. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сибирский математический журнал. 1962. Т. 3, № 5. С. 3—14.
8. Налимов В. В., Чернова Н. А. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 320 с.
9. Нариньяни А. С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1986. № 5. С. 3—28.
10. Hyyonen E. Constraint Reasoning Based on Interval Arithmetic: the Tolerance Propagation Approach // Artificial Intelligence. 1992. Vol. 58. P. 19.
11. Вошинин А. П., Сотиров Г. Р. Оптимизация в условиях неопределенности. М.: МЭИ; София: Техника, 1989. 226 с.
12. Вошинин А. П., Бочков А. Ф., Сотиров Г. Р. Интервальный анализ данных // Заводская лаборатория. 1990. № 7. С. 76—81.

13. Куржанский А. Б. Задача идентификации — теория гарантированных оценок // Автоматика и телемеханика. 1991. № 4. С. 75—89.

14. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1992. № 7. С. 97—106.

15. Левин В. И. Булево линейное программирование с интервальными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 1994. № 7. С. 111—122.

16. Левин В. И. Интервальное дискретное программирование // Кибернетика и системный анализ. 1994. № 6. С. 92—103.

17. Левин В. И. Нелинейная оптимизация в условиях интервальной неопределенности // Кибернетика и системный анализ. 1999. № 2. С. 138—146.

18. Левин В. И. Методы оптимизации систем в условиях интервальной неопределенности параметров // Информационные технологии. 2012. № 4. С. 52—59.

19. Левин В. И. Методология оптимизации в условиях неопределенности методом детерминизации // Информационные технологии. 2014. № 5. С. 14—21.

20. Левин В. И. Анализ поведения неточно заданных функций с помощью интервально-дифференциального исчисления // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 3. С. 163—170.

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

## Method of Dedetermination for Intractable Problems of Mathematical Modelling

*In this paper we propose the method of dedetermination as a new method designed to solving a problem of calculation of deterministic functions with the so-called singular points where the function does not take a certain value. The aim is to develop an approach that allows for division by zero and thus exclude singular points of such functions. The proposed method is to move from problematic (from point of view of calculating) determined function to the corresponding not determined (interval) function by replacing determined function parameters by corresponding interval parameters. Due to this change the values of the function at the singular points will be well-defined interval and values. The latter allows you to solve the problem of finding the function meaning. The solution to this problem is achieved by legalization of division by zero by intervalization of calculations. It uses the principle of cutting out a neighborhood of zero in the interval being the denominator of the fraction representing studied function. For the simplified by cutting out interval function the effective formulas are derived based on the main provisions of interval mathematics and make it easy to calculate the value of this function. The proposed in the article approach to the problem of calculating functions with singular points is important for all those classes of systems in which the problem really exists. It is about the systems which functions have any number of specific points. Such systems are found mostly in telemetry, reliability theory and practice, humanitarian and many others areas. Features of these areas is that they do not always apply the classical methods of deterministic mathematics. This leads to search for new approaches to solving problems that arise here.*

**Keywords:** interval, interval function, interval calculation, dedetermination, division by zero

### References

1. Gnedenko B. V. *Kurs teorii veroyatnostey*, Moscow, Nauka, 2004, 350 p.

2. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Information Sciences*, 1975, no. 8; 9, pp. 199—249, 301—357; 43—80.

3. Alefeld G., Herzberger J. *Introduction to interval computation*, N. Y.: Academic Press, 1983. 352 p.

4. Gorban' I. I. *Fenomen statisticheskoy ustoychivosti*. Kiev: Naukova Dumka, 2014. 370 p.

5. Wiener N. *Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series*, New-York, Technology Press and Wiley, 1949. 180 p.

6. Kolmogorov A. N. Interpolirovanie i extrapolirovanie stacionarnykh sluchaynykh posledovatelnostey, *Izvestiya AN SSSR. Matematika*, 1941, no. 5, pp. 3—14.

7. Kantorovich L. V. O nekotorykh novykh podhodah k vychislitel'nyim metodam i obrabotke nablyudeniya, *Sibirskiy matematicheskii zhurnal*, 1962, vol. 3, no. 5, pp. 3—14.

8. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Teoriya experimenta*, Moscow, Nauka, 1971, 320 p.

9. Narin'yani A. S. Nedoopredelennost' v sisteme predstavleniya i obrabotki znaniy, *Izvestiya AN SSSR. Tehnicheskaya Kibernetika*, 1986, no. 5, pp. 3—28.

10. Hyvonen E. Constraint reasoning based on interval arithmetic: the tolerance propagation approach, *Artificial intelligence*, 1992, vol. 58, p. 19.

11. Voschinin A. P., Sotirov G. R. *Optimizaciya v usloviyakh neopredelennosti*, Moscow, MEI; Sofiya, Tehnika, 1989. 226 p.

12. Voschinin A. P., Bochkov A. F., Sotirov G. R. Intervalnyy analiz dannyh, *Zavodskaya laboratoriya*, 1990, no. 7, pp. 76—81.

13. Kurzhanskii A. B. Identification problem — theory of guaranteed estimates, *Automation and remote control*, 1991, vol. 52, no. 4, pp. 447—465.

14. Levin V. I. Discrete Optimization under Interval Uncertainty, *Automation and Remote Control*, 1992, vol. 53, no. 7, pp. 1039—1047.

15. Levin V. I. Boolean Linear Programming with Interval Coefficients, *Automation and Remote Control*, 1994, vol. 55, no. 7, pp. 1019—1028.

16. Levin V. I. Interval Discrete Programming, *Cybernetics and systems analysis*, 1994, vol. 30, no. 6, pp. 866—874.

17. Levin V. I. Nonlinear Optimization under Interval Uncertainty, *Cybernetics and systems analysis*, 1999, vol. 35, no. 2, pp. 297—306.

18. Levin V. I. Metody optimizacii sistem v usloviyakh intervalnoy neopredelennosti parametrov, *Informacionnye tehnologii*, 2012, no. 4, pp. 52—59.

19. Levin V. I. Metodologiya optimizacii v usloviyakh neopredelennosti metodom determinizacii, *Informacionnye tehnologii*, 2014, no. 5, pp. 14—21.

20. Levin V. I. Analiz povedeniya netochno zadannykh funkciy s pomo-shchyu intervalno-differencialnogo ischisleniya, *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 163—170.

Э. М. Димов, д-р техн. наук, проф.,

О. Н. Маслов, д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: maslov@psati.ru, С. В. Сухова, аспирант, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара

## Имитационное моделирование деятельности отдела менеджмента качества на базе платформы AnyLogic

*На примере процесса деятельности отдела менеджмента качества ИТ-компании рассматривается задача моделирования бизнес-процессов, протекающих в сложных нерелефторных системах (социально-экономических, организационно-технических, экологических и др.) с применением перспективного программного продукта — среды имитационного моделирования AnyLogic.*

**Ключевые слова:** *отдел менеджмента качества, бизнес-процесс, статистическое имитационное моделирование, среда AnyLogic*

### Введение

Бизнес-процесс отдела менеджмента качества (ОМК) занимает важное место в деятельности современной ИТ-компании. Широкие возможности для исследования, проектирования и управления такого рода процессами дает компьютерный метод статистического имитационного моделирования (СИМ) по версии Димова—Маслова [1, 2] на основе математической модели объекта в виде системы массового обслуживания (СМО) [3, 4]. Одним из наиболее эффективных программных продуктов, предназначенных для решения данной задачи, является отечественный инструментальный — среда AnyLogic [5, 6], которая обладает удобным интерфейсом, содержит средства визуализации процесса, поддерживает метод агентного моделирования, системную динамику и дискретно-событийное моделирование. Цель статьи — изложение методики разработки модели деятельности ОмК (далее для краткости — СИМ-модели) в интересах повышения эффективности управления данным бизнес-процессом.

### Предметная область и модель бизнес-процесса

В ОмК через информационную систему управления поступают заявки от сотрудников на разработку, пересмотр или редакцию нормативных документов, которыми располагает ИТ-компания. При получении заявки специалист ОмК вносит требуемые изменения в документ, после чего он размещается на специальном сайте в Intranet, где предусмотрена возможность его обсуждения и согласования. В случае успешного согласования документ отправляется на утверждение и затем публикуется. На бизнес-процесс оказывает влияние ряд случайных факторов, таких как вероятность размещения на дополнительный цикл согласования; ресурсы, необходимые для разработки, пересмотра, редакции документа и т.д. В настоящее время поток заявок достиг такого уровня, что специалисты ОмК не успевают обслуживать их в отведенные сроки.

Руководством компании рассматривались два альтернативных способа решить возникшую проблему.

1. Прием на работу новых специалистов, полагая, что если заявки будут распределены на большее число сотрудников ОмК, то очередей не будет. Однако при анализе ситуации выяснилось, что при обработке заявки в ОмК треть времени тратится не на процессную, а на рутинную часть работы, связанную с размещением документов на разных этапах согласования, отправкой писем, заполнением статистики и т.п. Поэтому отдать предпочтение этому способу нельзя.

2. Разделение функций сотрудников ОмК и прием на работу помощников специалистов с тем, чтобы они выполняли в основном рутинную, но также необходимую и незаменимую часть общей работы.

Наличие СИМ-модели бизнес-процесса деятельности ОмК при этом дает возможность "проигрывать" на ней различные варианты соотношения специалистов и помощников, а также выполняемых ими видов работ. Содержательная модель, формализация бизнес-процесса и постановка задачи СИМ [7] базируются на концепции дискретно-событийного метода, динамика процесса соответствует последовательности следующих операций:

- разработка или актуализация нормативного документа;
- размещение документа на этапах проверки рецензирования и согласования;
- подготовка запроса об утверждении;
- утверждение документа;
- публикация.

Схему деятельности ОмК удобно описать в терминах СМО, для которой характерны три отличительные черты:

- наличие объектов, привлеченных к обслуживанию заявок, т. е. сотрудников ОмК;
- наличие агрегатов, предназначенных для удовлетворения этих заявок, конкретизирующих виды работ при обслуживании заявок;

- организованный характер приема и обслуживания заявок, поступающих в информационную систему управления (ИСУ) через специальный механизм "Заявки и задания".

В итоге модель бизнес-процесса представляет собой безотказную многоканальную СМО, каналами в которой являются сотрудники отдела, обслуживающие заявки в порядке общей очереди с неограниченным ожиданием по времени, что типично для систем дискретно-событийного типа. Такая система может быть представлена объектами среды AnyLogic в виде объектов библиотеки Enterprise Library [8], где каждый объект имеет встроенную

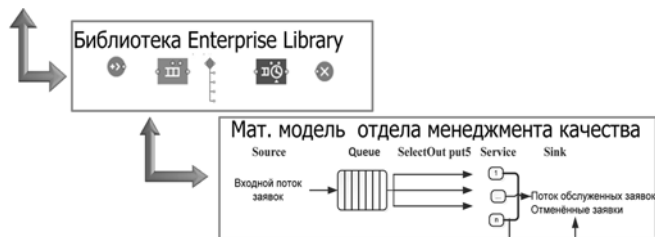


Рис. 1. Модель деятельности ОМК в среде AnyLogic

Таблица 1  
Законы распределения случайных величин СВ 1 — СВ 18

Случайная величина	Закон распределения	Параметры
СВ 1 — число поступающих заявок	Закон Пуассона	$a = 5,67$
СВ 2 — вероятность задания на разработку	Закон Бернулли	$p = 0,2$
СВ 3 — вероятность задания на пересмотр	Закон Бернулли	$p = 0,5$
СВ 4 — вероятность задания на редакцию	Закон Бернулли	$p = 0,3$
СВ 5 — длительность подготовки документа к рецензии	Нормальный закон	$x_0 = 157;$ $\sigma = 55$
СВ 6 — длительность размещения на рецензию	Экспоненциальный закон	$\lambda = 0,235$
СВ 7 — вероятность следующего цикла рецензии	Закон Бернулли	$p = 0,7$
СВ 8 — длительность подготовки документа к согласованию	Нормальный закон	$x_0 = 198;$ $\sigma = 64$
СВ 9 — длительность размещения на согласование	Экспоненциальный закон	$\lambda = 0,364$
СВ 10 — вероятность следующего цикла согласования	Закон Бернулли	$p = 0,8$
СВ 11 — вероятность отмены заявки	Закон Бернулли	$p = 0,05$
СВ 12 — длительность подготовки запроса на утверждение	Нормальный закон	$x_0 = 34,3;$ $\sigma = 5,65$
СВ 13 — длительность проверки запроса на утверждение	Нормальный закон	$x_0 = 198;$ $\sigma = 64$
СВ 14 — вероятность повторной отправки запроса на утверждение	Закон Бернулли	$p = 0,6$
СВ 15 — длительность подготовки документа на утверждение	Нормальный закон	$x_0 = 4,6;$ $\sigma = 2,8$
СВ 16 — длительность размещения на утверждение	Экспоненциальный закон	$\lambda = 0,074$
СВ 17 — вероятность утверждения документа	Закон Бернулли	$p = 0,93$
СВ 18 — длительность публикации документа	Экспоненциальный закон	$\lambda = 0,512$

программу, привязанную к объекту. Модель деятельности ОМК представлена на схеме рис. 1 (по терминологии AnyLogic здесь она именуется математической моделью ОМК).

Согласно методике СИМ на основе собранной статистики должны быть проведены идентификация законов распределения (ЗР) и оценка параметров распределения случайных величин (СВ), моделирующих стохастические факторы, воздействующие на бизнес-процесс [1, 2]. Проверка статистических гипотез с применением таблиц MS Excel показала, что если входной поток заявок в единицу времени моделировать по закону Пуассона, то время обслуживания одной заявки можно считать СВ, распределенной по экспоненциальному закону — в случае, если время обслуживания равно длительности размещения документа на этапе проверки, и по нормальному закону — в случае, если время обслуживания равно времени обработки документа. Сводные данные по законам распределения всех рассматриваемых СВ представлены в виде табл. 1, где  $x_0$  и  $\sigma$  — параметры нормального ЗР;  $a$  — параметр ЗР Пуассона;  $p$  — параметр ЗР Бернулли;  $\lambda$  — параметр экспоненциального ЗР.

Конечная задача СИМ состоит в подборе числа специалистов и помощников ОМК таким образом, чтобы, во-первых, из заявок не образовывалась очередь, а во-вторых, чтобы затраты компании на оплату труда были минимальными. Данное условие в среде AnyLogic реализует объект Service, позволяющий выбрать ресурс обслуживания заявки в зависимости от вида работ и должности сотрудника: специалист это или помощник, только специалист или только помощник. Исходными данными являются размеры оплаты труда: оклад специалиста; оклад помощника; часовые ставки за разработку, пересмотр, редакцию и размещение документа на разных этапах. Кроме того, нужно распределить виды работ между сотрудниками ОМК по следующим вариантам:

- разработкой документа занимаются только специалисты;
- пересмотром документов занимаются как специалисты, так и помощники;
- редакцией документов занимаются как специалисты, так и помощники;
- размещением на этапах занимаются как специалисты, так и помощники.

Целевая функция (затраты  $\Phi_3$  на оплату труда сотрудников ОМК без учета налоговых отчислений) рассчитывается по формуле

$$\Phi_3 = \Phi_{зс} + \Phi_{зп},$$

где  $\Phi_{зс}$ ,  $\Phi_{зп}$  — затраты на оплату труда соответственно специалистов и помощников, определяемые как

$$\Phi_{зс, зп} = N_{с, п} Q_{с, п} + T_{нд} S_{нд} + T_{пс} S_{пс} + T_{рд} S_{рд} + T_{рм} S_{рм},$$

где  $N_{с, п}$  — число соответственно специалистов и помощников в ОМК;  $Q_{с, п}$  — их должностные оклады;  $T_{нд}$  и  $S_{нд}$  — соответственно время и часовая ставка (тариф) на разработку новых документов;  $T_{пс}$  и  $S_{пс}$  — аналогичные данные для пересмотра документов;  $T_{рд}$  и  $S_{рд}$  — для редакции документов;  $T_{рм}$  и  $S_{рм}$  — для размещения документов. В относительных единицах  $Q_c = 32$  ед.;  $Q_p = 21$  ед.;  $S_{нд} = 0,28$  ед.;  $S_{пс} = 0,18$  ед.;  $S_{рд} = 0,15$  ед.;  $S_{рм} = 0,10$  ед.

Приведенные формулы применимы для любого варианта распределения работ между специалистами и помощниками. Число обслуженных заявок для каждого варианта определяется суммой разработанных, пересмотренных и отредактированных документов. Таким образом, затраты  $\Phi_3$  рассчитываются исходя из сумм окладов и тарифов сдельной оплаты, в прямой зависимости от числа специалистов и помощников в ОМК.

### Инструментальные средства реализации СИМ-модели

Требования к средствам реализации СИМ-модели предусматривают:

- гибкость в смысле возможности моделировать случайные события с разным уровнем сложности;
- наличие средств отладки, которые позволяют отслеживать отдельные объекты по всей модели, чтобы убедиться в правильности их обработки и проверять состояние модели при возникновении каждого нового события;
- дружелюбный интерфейс и работу с графикой;
- наличие механизма генерирования независимых СВ.

Из предлагаемых на рынке программных продуктов традиционными средствами реализации СИМ являются языки BASIC, FORTAN, C/C ++, Pascal, Java. Их главное достоинство — универсальность как возможность создавать модели любого уровня сложности, что требует, однако, высокой квалификации пользователей и значительных временных затрат. Специализированные языки более компактны и имеют широкий круг приложений, но также требуют специальной подготовки для описания моделируемых объектов в терминах языка. Данный

подход поддерживают GPSS/PC, GPSS/H, GPSS World, Object GPSS, Arena, SimProcess, AutoMod. В отличие от них среды имитационного моделирования предполагают составление моделей из графических блоков: сегодня на рынке представлены ARISBusinessSimulator, ReThink, Simulink [6—8]. К инструментальным средствам данного типа относится и среда AnyLogic — программное обеспечение, разработанное отечественной компанией "XJTechnologies", предназначенное для графического создания СИМ-моделей с использованием языка Java.

Среда AnyLogic, помимо указанных методик агентного моделирования, системной динамики и дискретно-событийного моделирования, включает графический язык и редактор моделирования, позволяющие расширять созданные модели с помощью Java. Интегрирование компилятора Java открывает возможности для создания моделей и Java-апплетов, которые можно открыть в любом Internet-браузере. Версия AnyLogic Professional поддерживает создание Java-приложений, при этом пользователь может запустить модель без предварительной установки AnyLogic. Перечисленное аргументирует выбор AnyLogic для создания СИМ-моделей разного назначения, в том числе рассматриваемых в работах [5, 6] и в настоящей статье.

### Разработка моделирующего алгоритма для реализации СИМ-модели

Моделирующий алгоритм процесса деятельности ОМК представлен на рис. 2 в виде структурной схемы, содержащей объекты процессного моделирования библиотеки Enterprise Library среды AnyLogic. В эту библиотеку вошли объекты для определения потока процесса: Source (источник), Sink (выход из системы), Delay (задержка), Queue (очередь), Service (обслуживание), SelectOutput (выбор пути) и т.д., а также задействованные в процессе ресурсы. Заложенная в объекты среды AnyLogic генерация СВ избавляет пользователя от необходимости отдельно программировать их для найденных законов распределения. Рассмотрим логику моделирующего алгоритма на рис. 2.

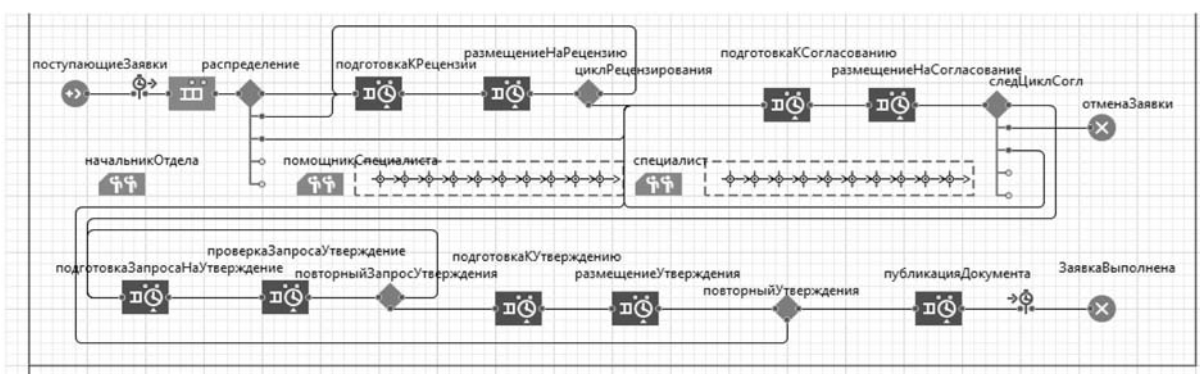


Рис. 2. Схема моделирующего алгоритма с использованием объектов библиотеки Enterprise Library

Объект Source (поступающие Заявки) моделирует поступление заявок от сотрудников компании — это СВ 1 в обозначениях табл. 1. Для его генерации воспользуемся функцией вероятностного распределения poisson (double lambda, java.util.Random r), описание которой представлено в табл. 2. Объект timeMeasureStart (следующий после объекта поступающие Заявки) задает начальную точку моделирования: запоминает момент времени, когда заявка проходит через этот объект. Далее объект Queue моделирует очередь заявок, ожидающих освобождения сотрудника согласно правилу FIFO (в порядке поступления в очередь). Объект SelectOutput5 (распределение) направляет входящие заявки в один из трех выходных портов в зависимости от выполнения условий, заданных с помощью указанных в табл. 1 вероятностей.

В режиме работы к ним относятся вероятность задания на разработку документа СВ 2; вероятность задания на пересмотр СВ 3 и вероятность задания на редакцию СВ 4, которые в сумме (для всех трех выходных портов) равны единице. Выбор выходного порта, на который будет перенаправляться заявка, определяется случайным образом в соответствии с данными вероятностями. Если заявка содержит задание на редакцию (т. е. сгенерирована СВ 4), происходит переход к моделированию объекта Service (подготовка КСогласованию). В случае, когда заявка содержит задание на разработку (сгенерирована СВ 2) или задание на пересмотр (сгенерирована СВ 3), имеет место переход к объекту Service (подготовка к рецензии).

Длительность подготовки документа к рецензии СВ 5 генерируется с помощью функции normal (double sigma, mean, java.util.Random r). Описание параметров данной функции содержит табл. 3.

После подготовки документа к рецензии — в объекте Service (размещение НаРецензию) — генерируется длительность размещения на рецензию СВ 6 с помощью функции exponential (double lambda, double min, java.util.Random r). Описание параметров данной функции дано в табл. 4.

Далее в объекте SelectOut put (цикл Рецензирования) моделируется вероятность повторного цикла рецензирования СВ 7 с помощью функции bernoulli (double p, java.util.Random r). В табл. 5 представлено описание параметров данной функции.

Если необходимо направить документ на повторный цикл рецензирования, то управление передается объекту Service (подготовка к рецензии). В случае, когда повторное рецензирование не требуется или же поступило задание на редакцию, в объекте Service (подготовка КСогласованию) моделируется СВ 8 — длительность подготовки документа к согласованию аналогично СВ 5 и табл. 3. После подготовки документа к согласованию в объекте Service (размещение НаСогласование) генерируется СВ 9 — длительность размещения на согласование аналогично СВ 6 и табл. 4. Далее в объ-

Таблица 2

**Параметры функции poisson (double lambda, java.util.Random r)**

Имя	Тип	Описание
lambda	double	Частота возникновения
r	java.util.Random	Генератор случайных чисел

Таблица 3

**Параметры функции normal (double sigma, mean, java.util.Random r)**

Имя	Тип	Описание
sigma	double	Параметр формы = стандартное отклонение
mean	double	Параметр сдвига = среднее значение
r	java.util.Random	Генератор случайных чисел

Таблица 4

**Параметры функции exponential (double lambda, double min, java.util.Random r)**

Имя	Тип	Описание
lambda	double	Параметр формы
min	double	Минимальное значение x
r	java.util.Random	Генератор случайных чисел

Таблица 5

**Параметры функции bernoulli (double p, java.util.Random r)**

Имя	Тип	Описание
p	double	Вероятность того, что значение будет равно 1
r	java.util.Random	Генератор случайных чисел

екте SelectOut put (следЦиклСогл) моделируется СВ 10 — вероятность повторного цикла согласования аналогично СВ 7 и табл. 5.

Поскольку на данном этапе существует вероятность прекращения работы по заявке, в объекте Sink (отмена Заявки) генерируется СВ 11 — вероятность отмены заявки. Если заявка отменена, то процесс моделирования заканчивается и заявка попадает в счетчик накопления отмененных заявок. Если цикл согласования прошел успешно, заявка не отменена и не требуется следующего цикла согласования, управление передается объекту Service (подготовка Запроса На Утверждение), в котором генерируется СВ 12 — длительность подготовки запроса на утверждение. После подготовки запроса на утверждение в объекте Service (Проверка Запроса Утверждение) генерируется СВ 13 — длительность проверки запроса на утверждение.

При необходимости в объекте SelectOut put (повторный Запрос Утверждения) генерируется СВ 14 — вероятность повторной отправки запроса на утверждение. Если повторная отправка запроса на утверждение требуется, то управление передается объекту Service (подготовка Запроса На Утверждение). Если замечаний к запросу на утверждение нет,

то управление передается объектам Service (Подготовка К Утверждению и размещение Утверждения), в которых моделируется СВ 15 — длительность подготовки на утверждение и СВ 16 — длительность размещения на утверждение соответственно.

Далее в объекте SelectOut put (повторный Утверждения) моделируется СВ 17 — вероятность утверждения документа. Если документ не утвержден, то необходимо повторно подготовить его к согласованию, в этом случае управление передается объекту Service (подготовка К Согласованию). Если же документ утвержден без замечаний, он приобретает статус "готов" и публикуется. Объект timeMeasureEnd (расположенный перед объектом Заявка Выполнена) вычисляет для каждой поступившей заявки разность между текущим моментом времени и моментом, который "запомнен" моделью. Объект Sink (Заявка Выполнена) реализует счетчик выполненных заявок. Можно видеть, что в основе построения моделирующего алгоритма лежит метод реализации механизма управления модельным временем с постоянным шагом, так как события появляются регулярно, а момент поступления заявки предсказать достаточно сложно.

Период моделирования задается в месяцах, причем с помощью настройки расписания учитываются только рабочие дни недели. Поскольку в ОМК от сотрудников компании поступают заявки четырех типов (на разработку нового документа, редакцию, пересмотр и размещение существующего документа), исходные данные, характеризующие входной поток СМО, могут быть получены на основании отчета компании за годовой период по всем разработанным, пересмотренным, отредактированным и размещенным документам с учетом затраченного на них времени.

Главное меню СИМ-модели (рис. 3, см. вторую сторону обложки) представляет собой иерархическую диалоговую систему доступа к функциям системы. Форма ввода исходных данных имеет шапочную часть, в которой поля "Номер эксперимента", "Дата", "Инициатор эксперимента" заполняются автоматически, в поле "Период" задается период моделирования, за который необходимо получить прогноз целевой функции. Поле "Экспорт данных" позволяет пользователю сохранить результаты СИМ в заданное месторасположение на компьютере. Закладка "Параметры законов распределения" позволяет пользователю вручную ввести указанные параметры, возможность их автоматического определения обеспечивает эксплуатацию СИМ-модели пользователем, не имеющим опыта статистической обработки данных. Закладка "Персонал" предназначена для ввода следующих переменных: число сотрудников ОМК, размер окладов заработной платы и параметры сдельной оплаты труда, моделирование способов распределения работ между специалистами и помощниками.

Анализ результатов СИМ показывает, что своего минимального значения (1,28 млн руб., согласно рис. 4, см. вторую сторону обложки) целевая функция — затраты на оплату труда — достигает при принятии в штат трех новых сотрудников: помощников специалиста ОМК, с поручением им работ по редакции документов и размещению документов на разных этапах согласования.

## Заключение

При разработке СИМ-модели процесса деятельности ОМК определены ее основные параметры, идентифицированы законы распределения СВ, описана модель в терминах СМО и представлен моделирующий алгоритм в виде структурной схемы, сформированной с помощью объектов библиотеки Enterprise Library среды AnyLogic. Представленная СИМ-модель позволяет "проигрывать" комбинации между имеющимися и планируемыми ресурсами ОМК с учетом видов и объема выполняемых работ, что способствует оптимизации принимаемых организационных решений. По результатам СИМ определены среднее время обработки и процент выполненных заявок, процент отмененных заявок и процент заявок, находящихся в работе, а также затраты на оплату труда специалистов и помощников специалистов. Итогом является конкретное решение: разделить функции сотрудников ОМК и принять на работу помощников специалистов. Опыт разработки СИМ-модели деятельности ОМК показывает, что использование среды AnyLogic позволяет наглядно и эффективно решать достаточно важные вопросы, связанные с управлением бизнес-процессами ИТ-компаний.

## Список литературы

1. Ануфриев Д. П., Димов Э. М., Маслов О. Н. и др. Статистическое имитационное моделирование и управление бизнес-процессами в социально-экономических системах. Астрахань: Изд-во АСТИСИ, 2015. 366 с.
2. Борисов А. С., Голенко Д. И., Димов Э. М. и др. Имитационное моделирование производственных систем дискретно-непрерывного типа // Проблемы случайного поиска. АН Латв. ССР. Вып. 5. Рига: Зинатне, 1976. С. 197—229.
3. Емельянов В. В., Ясниковский С. И. Имитационное моделирование систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 584 с.
4. Семакин И. Г., Хеннер Е. К. Информационные системы и модели. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 303 с.
5. Димов Э. М., Маслов О. Н., Трошин Ю. В. Снижение неопределенности выбора управленческих решений с помощью метода статистического имитационного моделирования // Информационные технологии. 2014. № 6. С. 51—57.
6. Димов Э. М., Маслов О. Н., Трошин Ю. В. Выбор средств программного обеспечения процесса статистического имитационного моделирования // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 2. С. 132—139.
7. Сухова С. В. Повышение эффективности управленческих решений на основе результатов имитационного моделирования // Материалы XXI МНТК "Актуальные вопросы современной техники и технологии". Липецк, 2015. С. 25—31.
8. Снетков Н. Н. Имитационное моделирование экономических процессов. URL <http://simulation.su/uploads/files/default/sm-ec-proc-sn.pdf> (д.о. 11.06.2016).



## Simulation Activities of the Department of Quality Management Based on the Platform AnyLogic

*This article is dedicated to the development of a simulation model for the business process control quality optimization in IT-company. As an example of the activity process of management quality department of IT-companies consider the problem of modeling business processes occurring in non-reflexively complex systems (socio-economic, organizational, technical, environmental, etc.). Simulation environment of AnyLogic is used in the research. On the basis of this product is developed a model that allows to "play" combinations between existing and planned resources, taking into account the types and amount of work that contributes to the optimization of accepted organizational decisions.*

**Keywords:** quality management department, business process, statistical simulation, software AnyLogic

### References

1. Anufriyev D. P., Dimov E. M., Maslov O. N. i dr. *Statisticheskoye imitatsionnoye modelirovaniye i upravleniye biznes-protsessami v sotsialno-ekonomicheskikh sistemakh*. Astrakhan: Izd-vo AstI-SI, 2015. 366 p. (in Russian).
2. Borisov A. S., Golenko D. I., Dimov E. M. i dr. *Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh sistem diskretno-nepreryvnogo tipa, Problemy sluchaynogo poiska*. AN Latv. SSR. Vyp. 5. Riga: Zinatne, 1976, pp. 197—229. (in Russian).
3. Yemelyanov V. V., Yasinovskiy S. I. *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem*. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2009. 584 p. (in Russian).
4. Semakin I. G., Khenner Ye. K. *Informatsionnye sistemy i modeli*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znany, 2005. 303 p. (in Russian).

5. Dimov E. M., Maslov O. N., Troshin Yu. V. Snizheniye nepredelennosti vybora upravlencheskikh resheny s pomoshchyu metoda statisticheskogo imitatsionnogo modelirovaniya, *Informatsionnye tekhnologii*. 2014. no. 6, pp. 51—57 (in Russian).
6. Dimov E. M., Maslov O. N., Troshin Yu. V. Vybory sredstv programmogo obespecheniya protsessov statisticheskogo imitatsionnogo modelirovaniya, *Informatsionnye tekhnologii*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 132—139 (in Russian).
7. Sukhova S. V. Povysheniye effektivnosti upravlencheskikh resheny na osnove rezultatov imitatsionnogo modelirovaniya, *Materialy XXI MNTK "Aktualnye voprosy sovremennoy tekhniki i tekhnologii"*. L'petsk, 2015, pp. 25—31. (in Russian).
8. Snetkov N. N. *Imitatsionnoye modelirovaniye ekonomicheskikh protsessov*, URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/sm-ec-proc-sn.pdf> (d.o. 11.06.2016) (in Russian).

УДК 519.622.2, 621.039.526

В. Б. Маничев<sup>1</sup>, канд. тех. наук, доц., manichev@bmstu.ru,

Е. Ф. Митенкова<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, зав. лаб., Д. М. Жук<sup>1</sup>, канд. тех. наук, доц.,  
Д. Ю. Кожевников<sup>1</sup>, вед. инж., А. В. Соловьев<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,

Е. В. Соловьева<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., sol@ibrae.ac.ru

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана"

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук"

## Использование AL-устойчивых методов решения систем ОДУ для задач изотопной кинетики реакторных систем

*Разработка реакторов нового поколения с перспективными топливными композициями, повышение точности и надежности обоснования безопасности объектов с отработавшим ядерным топливом в условиях увеличенного выгорания требуют уточняющих прецизионных расчетов. Для решения задач изотопной кинетики реакторных систем в инженерных расчетах традиционно используют ~200...400 элементов. Широко применяемые для моделирования переходов в цепочках превращений программы семейства ORIGEN не обеспечивают вычисления погрешностей для всех элементов в цепочках превращений при использовании полного базиса элементов выхода продуктов деления облучаемого топлива (~1800). В работе рассматриваются результаты применения AL-устойчивых неявных методов с переменным шагом интегрирования, реализованных в программе MZK для решения задач изотопной кинетики реакторных систем.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), AL-устойчивые методы решения систем ОДУ, изотопная кинетика, реакторные системы

## Введение

Математическое моделирование выгорания ядерного топлива в задачах изотопной кинетики основывается на решении системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), которые описывают процессы распада и превращения нуклидов в нейтронном потоке и традиционно представляются уравнениями Бэтмена:

$$\begin{aligned} \frac{dN_i(t)}{dt} = & \sum_f \gamma_i^f(t) N_f(t) \langle \sigma_f \Phi \rangle(t) + \\ & + \sum_{j \neq i} \langle \sigma_{j \rightarrow i}^c \Phi \rangle(t) N_j(t) + \sum_{k \neq i} \lambda_{k \rightarrow i} N_k(t) - \\ & - \langle \sigma_i^\alpha \Phi \rangle(t) N_i(t) - \lambda_i N_i(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\gamma_i^f$  — выход нуклида  $i$  при делении  $f$ ;  $N_f(t)$  — число делящихся нуклидов;  $\langle \sigma_f \Phi \rangle(t)$  — скорость деления нуклида  $f$ ;  $\langle \sigma_{j \rightarrow i}^c \Phi \rangle(t)$  — скорость захвата нуклида  $j$ , приводящая к образованию нуклида  $i$ ;  $\lambda_{k \rightarrow i}$  — константа радиоактивного распада нуклида  $k$  в нуклид  $i$ ;  $\langle \sigma_i^\alpha \Phi \rangle(t)$  — суммарная скорость поглощения нуклида  $i$ .

Матрица переходов для системы (1) оказывается несимметричной, сильно разреженной, плохо обусловленной. Подобные системы относятся к так называемым жестким системам. Многие существующие программы для решения задач изотопной кинетики используют достаточно простые численные методы с постоянным шагом интегрирования. В программах ORIGEN реализован аналитический экспоненциальный метод для короткоживущих и долгоживущих изотопов [1]. Обеспечение корректного решения систем ОДУ большой размерности связано с определенными трудностями, обусловленными разными методами решения, применяемыми к короткоживущим изотопам, имеющим долгоживущих предшественников, или при их отсутствии, а также ограничениями на временные соотношения периода полураспада и шага расчетной сетки. Кроме того, использование в расчетах преобразованной матрицы переходов с исключением короткоживущих элементов и двух принципиально разных методов вычислений затрудняет получение гарантированной оценки точности вычисляемых концентраций нуклидов [2].

Использование ограниченного базиса элементов в матрице переходов с кумулятивными значениями оправданно в инженерных кодах, предназначенных для решения определенного класса задач, предполагающих вычисление конкретных нейтронно-физических характеристик — энерговыделения, активности и др. При решении систем уравнений кинетики изотопного состава, построенных на ограниченном базисе элементов, обычно используют

прямые методы типа Рунге—Кутты или Эйлера с постоянным шагом интегрирования. Для получения устойчивого решения жестких систем выбирают малый шаг интегрирования, приводящий часто к неприемлемо большим вычислительным затратам без гарантии корректности решения. Использование неявных методов с минимальными ограничениями на значение шага требует на каждом шаге интегрирования решения нелинейной системы алгебраических уравнений, приводящих к существенному усложнению реализации таких методов. При этом остаются принципиальные математические проблемы, связанные с обращением матриц большой размерности для жестких систем, и др. [3]. Адаптивные методы [4, 5] включают обязательную предварительную настройку расчетных параметров с возможностью их корректировки в процессе решения. Обеспечение корректного устойчивого решения с гарантированной точностью для жестких систем связано с математическими трудностями, обусловленными спецификой используемых вычислительных методов высокого порядка точности. Также возникают сложности при обосновании корректности получаемых решений с характерными градиентами на малых временных интервалах. В работе рассматриваются результаты применения *AL*-устойчивых неявных методов [6] с переменным шагом интегрирования для задач изотопной кинетики реакторных систем.

### Специфика использования *AL*-устойчивых методов решения систем ОДУ

На кафедре САПР МГТУ им. Н. Э. Баумана разрабатываются *AL*-устойчивые методы решения систем ОДУ, которые гарантируют достоверность и точность получаемых результатов при переменном шаге интегрирования. Матрица переходов постоянна на рассчитываемых интервалах времени, поэтому оценивать методы решения систем ОДУ можно применительно к решению однородной линейной системы ОДУ:

$$d\mathbf{X}/dt = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \quad (2)$$

где  $\mathbf{A}$  — постоянная действительная матрица размером  $n \times n$ ;  $\mathbf{X}$  — вектор координатного базиса дифференциальных переменных состояния размерностью  $n$ . Предположим, что известно множество всех собственных значений  $\lambda_i$  матрицы  $\mathbf{A}$ . В общем случае  $\lambda_i = \text{Re}(\lambda_i) + j\text{Im}(\lambda_i)$  — комплексные величины. Известно, что если собственные значения различны, то общее решение системы (2) будет линейной комбинацией фундаментальных решений  $c \cdot e^{\text{Re}(\lambda_i)t} \cdot \cos(\text{Im}(\lambda_i)t)$ , и  $c \cdot e^{\text{Re}(\lambda_i)t} \cdot \sin(\text{Im}(\lambda_i)t)$ , где  $c$  — некоторая константа. Для этих решений можно выделить пять областей комплексной плоскости  $\lambda_p$ , отражающих пять классов локальных задач интегрирования дифференциальных уравнений

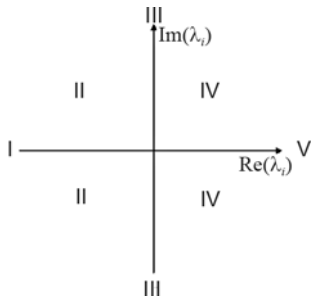


Рис. 1. Комплексная плоскость собственного значения  $\lambda_i$  матрицы  $A$

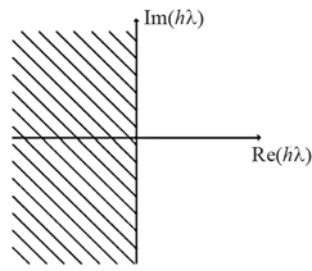


Рис. 2.  $AL$ -область ( $A$ - $(\pi/2)$ -область) абсолютной устойчивости методов численного решения систем ОДУ

(рис. 1). Для рассматриваемых в работе задач собственные значения матриц находятся в областях I и II.

Классический контроль локальной погрешности интегрирования обеспечит точность решения, а для контроля полной глобальной погрешности интегрирования необходимо обеспечить соответствующую устойчивость методов интегрирования. Чтобы гарантировать получение качественно корректного решения для вышеуказанных классов задач, метод интегрирования при переменном шаге интегрирования  $h$  должен быть устойчивым для устойчивых систем ОДУ (I и II классы задач) и должен быть неустойчивым для неустойчивых систем ОДУ (IV, V классы задач). Поэтому необходимо, чтобы методы интегрирования были соответственно  $AL$ -устойчивыми, т.е. абсолютно устойчивыми строго в левой полуплоскости комплексной плоскости устойчивости методов интегрирования (рис. 2) [6].

При невысоких требованиях к точности решения систем ОДУ данная область абсолютной устойчивости гарантирует сохранение качественно верного решения при увеличении шага интегрирования в плоскости  $h\lambda$ , так как при невысокой точности интегрирования шаг интегрирования может стать таким большим, что не  $AL$ -устойчивые методы интегрирования могут получать неверные траектории решения. Требованию  $AL$ -устойчивости отвечают неявные одношаговые методы интегрирования Рунге—Кутты [7].

Главный недостаток  $AL$ -устойчивых методов Рунге—Кутты состоит в том, что они не удовлетворяют требованиям  $L$ -устойчивости (устойчивость методов интегрирования при значительном увеличении шага интегрирования ( $h \rightarrow \infty$ ) [8]) и иногда выдают "ложные (паразитные) колебания" ("ringing") в решении, поэтому эти методы не нашли широкого применения на практике [3]. Решение данной проблемы приведено в работе [9]. Программная реализация этих методов в конечном итоге сводится к многократному решению соответствующих систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на каждом шаге численного интегрирования, что, как правило, приводит к нескольким тысячам и более обращений к программе-решателю СЛАУ на всем

заданном отрезке численного интегрирования.  $AL$ -устойчивые методы 2-го и 4-го порядков точности для задач невысокой размерности были реализованы в программе DMAN и в библиотеке SADEL [10, 11].

С помощью этих программ были решены различные тестовые и практические задачи моделирования технических систем и объектов во временной области. Проведенные расчеты показали, что для получения качественно корректного решения разнообразных систем ОДУ необходимо на всех шагах численного интегрирования обеспечить решение соответствующих тысяч разнообразных СЛАУ с гарантированной точностью в 15 верных значащих цифр для всех элементов вектора решений СЛАУ. Именно такая точность, которой соответствует тип *double* в языке программирования Си, реализована в упомянутых программах. Тестирование некоторых известных программ-решателей СЛАУ показало, что точность, используемая в них, недостаточна. Итерационные численные методы решения СЛАУ не решают эту проблему, так как не могут гарантировать указанную выше точность получаемых решений для всех элементов вектора решений СЛАУ. Решение этой проблемы возможно только с помощью точных, прямых численных методов решения СЛАУ и методов получения "сверхточных" (*extra precision*) решений, реализованных в математических пакетах и библиотеках программ: *Maple* (метод *Software Floating Point*), *MATLAB* (метод *Variable Precision Arithmetic*), *Mathematica* (метод *Arbitrary Precision Arithmetic*), методы библиотеки *Intel* для "сверхточных" десятичных вычислений (точность арифметических вычислений до 256 верных десятичных знаков — IEEE 754—2008 *Decimal Floating-Point for Intel® Architecture Processors*) и др. [12]. Для решения задач изотопной кинетики разработана специализированная программа MZK на основе решателя систем ДАУ *manzhuk*, в котором реализованы три метода интегрирования: M1 —  $A$ -устойчивый неявный метод первого порядка точности; M2 —  $AL$ -устойчивый неявный метод второго порядка точности; M3 —  $AL$ -устойчивый неявный метод Рунге—Кутты четвертого порядка точности. В программе MZK сначала выполняется предварительный грубый, быстрый расчет методом M1, затем — точный расчет методом M2 или M3 [13].

### Расчет накопления нуклидов в задачах изотопной кинетики по программам ORIGEN2 и MZK

Прецизионные расчеты выгорания, базирующиеся на современных библиотеках ядерно-физических данных, используют библиотеку выхода продуктов деления с максимально полным числом элементов. Такие библиотеки содержат ~1400 элементов выхода продуктов деления с периодом полураспада, различающимся в  $\sim 10^{20}$  раз. При этом число уравнений в системе (1) достигает нескольких тысяч с матрицей переходов размерности

~5000×5000. Для решения жестких систем ОДУ большой размерности необходимы новые подходы, обеспечивающие устойчивость решений с гарантированной точностью. В частности, в работах [14, 15] описаны подходы, связанные с аппроксимацией решения систем ОДУ сходящимися рядами экспоненциальных функций, которые, в свою очередь, аппроксимируются дробно-рациональными полиномами Чебышева. Сходимость решения требует вычисления соответствующих коэффициентов полиномов с очень высокой степенью точности. Для этого были разработаны специальные алгоритмы символического выполнения арифметических действий с точностью до нескольких сотен знаков.

В работе представлены результаты анализа состава облученных топливных композиций, полученных в расчетах по программе ORIGEN2 и MZK. Концентрации отдельных нуклидов приведены для уран-плутониевой (U-Pu) и U-композиций (табл. 1), облучаемых нейтронным потоком  $2,72 \cdot 10^{15} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение  $T = 1$  сут. (табл. 2, 3). Приведенный состав соответствует топливной загрузке металлического топлива экспериментальной ТВС, облученной в реакторе БОР-60 [16].

При общей согласованности значений концентраций для большей части нуклидов для отдельных изотопов (~3 % от общего числа) наблюдаются существенные различия. В расчетах по MZK заметно более медленное накопление, приводящее к различию до  $10^3$ . Коэффициент различия  $K_{\text{раз}}$  кон-

центраций, вычисленных по разным программам, определяется как отношение максимального значения к минимальному. Для удельных концентраций  $\rho_{\text{ORIG}}$ ,  $\rho_{\text{MZK}}$  в расчетах по ORIGEN2 и MZK

$$K_{\text{раз}} = \max(\rho_{\text{ORIG}}, \rho_{\text{MZK}}) / \min(\rho_{\text{ORIG}}, \rho_{\text{MZK}}).$$

Для уяснения отличий концентраций нуклидов (табл. 2, 3) применяют подход, использовавшийся ранее при анализе простых цепочек превращений [2]. Совпадающие решения по ORIGEN2 и MZK систем ОДУ невысокой размерности (14 уравнений) получены для тестовых задач, содержащих элементы

Таблица 3

Сравнительные концентрации нуклидов  $\rho$  и  $K_{\text{раз}}$  для  $T = 1$  сут. U-композиции

Нуклид	$\rho_{\text{ORIG}}$ , г/атом	$\rho_{\text{MZK}}$ , г/атом	$K_{\text{раз}}$
$^{126}\text{Te}$	$1,9622 \cdot 10^{-7}$	$1,9621 \cdot 10^{-7}$	1
$^{127}\text{Te}$	$8,4683 \cdot 10^{-7}$	$8,1855 \cdot 10^{-9}$	103
$^{127\text{m}}\text{Te}$	$3,6696 \cdot 10^{-7}$	$7,8152 \cdot 10^{-8}$	4,7
$^{128}\text{Te}$	$1,8392 \cdot 10^{-5}$	$1,8390 \cdot 10^{-5}$	1
$^{127}\text{I}$	$5,3590 \cdot 10^{-7}$	$9,6848 \cdot 10^{-9}$	55
$^{131}\text{Xe}$	$5,8069 \cdot 10^{-6}$	$1,1725 \cdot 10^{-9}$	4950
$^{132}\text{Xe}$	$2,2961 \cdot 10^{-5}$	$2,2921 \cdot 10^{-5}$	1
$^{133}\text{Xe}$	$1,0204 \cdot 10^{-4}$	$3,2040 \cdot 10^{-7}$	318
$^{134}\text{Xe}$	$3,8699 \cdot 10^{-4}$	$3,8697 \cdot 10^{-4}$	1
$^{133}\text{Cs}$	$4,7052 \cdot 10^{-6}$	$2,3298 \cdot 10^{-8}$	200
$^{134}\text{Cs}$	$4,3203 \cdot 10^{-8}$	$4,3150 \cdot 10^{-8}$	1
$^{143}\text{Pr}$	$6,6083 \cdot 10^{-5}$	$6,6039 \cdot 10^{-5}$	1
$^{144}\text{Pr}$	$1,2057 \cdot 10^{-8}$	$3,5453 \cdot 10^{-10}$	34

Таблица 1

Состав облучаемой топливной композиции, г/атом

Композиция	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$
U-Pu	4,86	8,53	3,15	0,16	0,0125
U	16,87	—	—	—	—

Таблица 2

Сравнительные концентрации нуклидов  $\rho$  и  $K_{\text{раз}}$  (U-Pu) композиции

Нуклид	$\rho_{\text{ORIG}}$ , г/атом	$\rho_{\text{MZK}}$ , г/атом	$K_{\text{раз}}$		
			$T = 1$ сут	$T = 10$ сут	$T = 40$ сут
$^{126}\text{Te}$	$3,0838 \cdot 10^{-7}$	$3,0363 \cdot 10^{-7}$	1,02	1,02	1,02
$^{127}\text{Te}$	$6,4396 \cdot 10^{-7}$	$1,1209 \cdot 10^{-8}$	58	397	315
$^{127\text{m}}\text{Te}$	$3,2712 \cdot 10^{-7}$	$1,072\text{E} \cdot 10^{-7}$	3	16	26
$^{128}\text{Te}$	$1,4099 \cdot 10^{-5}$	$1,3948 \cdot 10^{-5}$	1,01	1,01	1,01
$^{127}\text{I}$	$4,1322 \cdot 10^{-7}$	$1,3939 \cdot 10^{-8}$	30	264	336
$^{131}\text{Xe}$	$3,3765 \cdot 10^{-6}$	$4,2199 \cdot 10^{-9}$	800	4177	5327
$^{132}\text{Xe}$	$1,6946 \cdot 10^{-5}$	$1,6734 \cdot 10^{-5}$	1,01	1,01	1,01
$^{133}\text{Xe}$	$5,6132 \cdot 10^{-5}$	$4,9644 \cdot 10^{-7}$	113	144	127
$^{134}\text{Xe}$	$2,0915 \cdot 10^{-4}$	$2,0747 \cdot 10^{-4}$	1,01	1,01	1,01
$^{133}\text{Cs}$	$2,6023 \cdot 10^{-6}$	$4,1163 \cdot 10^{-8}$	63	148	132
$^{134}\text{Cs}$	$8,9291 \cdot 10^{-8}$	$8,7815\text{E} \cdot 10^{-8}$	1,02	1,13	2,3
$^{143}\text{Pr}$	$3,1729 \cdot 10^{-5}$	$3,1464 \cdot 10^{-5}$	1,01	1,01	1,01
$^{144}\text{Pr}$	$6,4562 \cdot 10^{-9}$	$9,0706 \cdot 10^{-10}$	7	39	93

Таблица 4

Динамика накопления отдельных нуклидов  $\rho$  и  $K_{\text{раз}}$  (U-Pu) композиции

$T$ , с	$\rho_{\text{ORIG}}$ , г/атом	$\rho_{\text{MZK}}$ , г/атом	$K_{\text{раз}}$
$^{131}\text{Xe}$			
1000	$6,206 \cdot 10^{-11}$	$4,332 \cdot 10^{-11}$	1,4
2000	$2,405 \cdot 10^{-10}$	$8,676 \cdot 10^{-11}$	2,8
5000	$3,049 \cdot 10^{-9}$	$2,179 \cdot 10^{-10}$	14
10000	$2,213 \cdot 10^{-8}$	$4,391 \cdot 10^{-10}$	50
20000	$1,307 \cdot 10^{-7}$	$8,912 \cdot 10^{-10}$	150
40000	$6,433 \cdot 10^{-7}$	$1,835 \cdot 10^{-9}$	350
$^{133}\text{Xe}$			
1000	$6,638 \cdot 10^{-9}$	$4,111 \cdot 10^{-9}$	1,6
2000	$2,250 \cdot 10^{-8}$	$8,267 \cdot 10^{-9}$	2,7
5000	$1,565 \cdot 10^{-7}$	$2,100 \cdot 10^{-8}$	7,5
10000	$7,318 \cdot 10^{-7}$	$4,310 \cdot 10^{-8}$	17
20000	$3,249 \cdot 10^{-6}$	$9,046 \cdot 10^{-8}$	35
40000	$1,334 \cdot 10^{-5}$	$1,970 \cdot 10^{-7}$	70
$^{133}\text{Cs}$			
1000	$1,368 \cdot 10^{-10}$	$1,335 \cdot 10^{-10}$	1,03
2000	$2,901 \cdot 10^{-10}$	$2,733 \cdot 10^{-10}$	1,06
5000	$1,044 \cdot 10^{-9}$	$7,312 \cdot 10^{-10}$	1,4
10000	$4,827 \cdot 10^{-9}$	$1,627 \cdot 10^{-9}$	3
20000	$3,429 \cdot 10^{-8}$	$3,946 \cdot 10^{-9}$	9
40000	$2,746 \cdot 10^{-7}$	$1,091 \cdot 10^{-8}$	25

Концентрации нуклидов  $\rho$  для (U-Pu) композиции

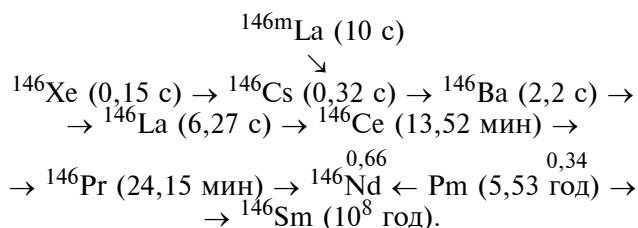
$T$ , сут.	$\rho_{\text{ORIG}}$ , г/атом	$\rho_{\text{MZK}}$ , г/атом	$K_{\text{раз}}$
$^{131}\text{Xe}$			
1	$3,377 \cdot 10^{-6}$	$4,220 \cdot 10^{-9}$	800
10	$3,277 \cdot 10^{-4}$	$7,847 \cdot 10^{-8}$	4177
20	$1,082 \cdot 10^{-3}$	$2,140 \cdot 10^{-7}$	5055
40	$3,025 \cdot 10^{-3}$	$5,678 \cdot 10^{-7}$	5327
$^{133}\text{Xe}$			
1	$5,613 \cdot 10^{-5}$	$4,964 \cdot 10^{-7}$	113
10	$1,042 \cdot 10^{-3}$	$7,234 \cdot 10^{-6}$	144
20	$1,406 \cdot 10^{-3}$	$1,063 \cdot 10^{-5}$	132
40	$1,519 \cdot 10^{-3}$	$1,199 \cdot 10^{-5}$	127
$^{133}\text{Cs}$			
1	$2,602 \cdot 10^{-6}$	$4,116 \cdot 10^{-8}$	63
10	$7,226 \cdot 10^{-4}$	$4,895 \cdot 10^{-6}$	148
20	$2,389 \cdot 10^{-3}$	$1,723 \cdot 10^{-5}$	139
40	$6,313 \cdot 10^{-3}$	$4,792 \cdot 10^{-5}$	132

с периодом полураспада не менее нескольких минут. Совпадение решений, подтвержденное точными решениями, обусловлено особенностями тестовых задач, не имеющих собственных значений с мнимыми ненулевыми частями. Специфика ORIGEN2 приводит к заметным различиям  $K_{\text{раз}}$  концентраций нуклидов при разных  $T$ . Так, нуклиды с существенно различающимися концентрациями при  $T = 1$  сут. (см. табл. 2) имеют практически одинаковые значения при  $T \leq 2000$  с (табл. 4). Кроме того, для отдельных цепочек превращений решение по ORIGEN2 оказывается сильно зависящим от выбора начального элемента облучения.

Расчеты, выполненные с помощью кодов MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN2 для разных топливных композиций тепловых реакторов (ВВЭР, высокотемпературных газовых реакторов) и быстрых реакторов [16–18], позволили определить значения расчетных параметров, в частности, при согласованных соотношениях временных шагов ( $N_{\text{step}}$ ) и мощности облучения шаг облучения равен 1, 10, 20 и 40 сут. Коэффициент  $K_{\text{раз}}$  для ряда нуклидов заметно увеличивается (табл. 5) со временем облучения, достигая при  $T = 40$  сут. значений  $\sim 300$  и  $\sim 5000$  раз для  $^{127}\text{I}$  и  $^{133}\text{Xe}$  соответственно.

#### Пример использования ORIGEN2 для цепочки превращений с короткоживущими элементами

Анализ отдельных цепочек превращений представлен на примере следующей цепочки распадов (в скобках приведены периоды полураспада):



Стандартные расчеты по MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN2 осуществляются в основном для  $N_{\text{step}} = 100$ . Это значение определено исходя из проведенного анализа состава композиций, облучаемых в разных нейтронных спектрах, и их сравнения с экспериментальными и расчетными значениями, полученными по другим кодам [19].

Начальная масса облучаемого  $^{146}\text{Xe}$  составляет 1 г/атом, нейтронный поток  $2,72 \cdot 10^{15}$  н · с<sup>-1</sup>. Различия в концентрациях, полученных в расчетах по ORIGEN2 и MZK (табл. 6), в целом оказываются меньшими при  $N_{\text{step}} = 40$ , нежели при стандартном значении  $N_{\text{step}} = 100$ . Лучшее согласие результата для  $N_{\text{step}} = 40$  подтверждает заметную чувствительность расчетов по ORIGEN2 к этому параметру, что затрудняет выбор универсального значения  $N_{\text{step}}$  при проведении полномасштабных расчетов выгорания на полном базисе элементов выхода продуктов деления.

#### Заключение

Совпадение результатов расчетов для большинства концентраций нуклидов, выполненных программами ORIGEN2 и MZK, реализующими принципиально разные методы и подходы к решению систем ОДУ, подтверждает достоверность и точность полученных результатов решения задач изотопной кинетики реакторных систем. Программы ORIGEN2 выполняют расчеты с постоянным шагом интегрирования. Программа MZK использует AL-устойчивые неявные методы и переменный

Концентрации нуклидов  $\rho$  и  $K_{\text{раз}}$  для  $T = 1$  сут.

Нуклид	$\rho_{\text{ORIG}}$ , г/атом		$\rho_{\text{MZK}}$ , г/атом	$K_{\text{раз}}$	
	$N_{\text{step}} = 40$	$N_{\text{step}} = 100$		$N_{\text{step}} = 40$	$N_{\text{step}} = 100$
$^{141}\text{La}$	$2,3523 \cdot 10^{-13}$	$2,5122 \cdot 10^{-13}$	$2,3511 \cdot 10^{-13}$	1,00	1,07
$^{143}\text{Ce}$	$2,2540 \cdot 10^{-4}$	$2,3730 \cdot 10^{-4}$	$2,2213 \cdot 10^{-4}$	1,01	1,07
$^{144}\text{Ce}$	$9,7540 \cdot 10^{-3}$	$1,0418 \cdot 10^{-2}$	$9,7508 \cdot 10^{-3}$	1,00	1,07
$^{143}\text{Pr}$	$1,4118 \cdot 10^{-4}$	$1,4860 \cdot 10^{-4}$	$1,3911 \cdot 10^{-4}$	1,00	1,07
$^{145}\text{Pr}$	$1,1950 \cdot 10^{-2}$	$1,4788 \cdot 10^{-2}$	$1,1954 \cdot 10^{-2}$	1,01	1,24
$^{145}\text{Nd}$	$1,8098 \cdot 10^{-1}$	$2,2169 \cdot 10^{-1}$	$1,7909 \cdot 10^{-1}$	1,01	1,24

шаг интегрирования, поддерживая заданную точность решения системы ОДУ, поэтому эти результаты лучше соответствует точному значению решения исходной системы ОДУ.

Значительные различия для отдельных нуклидов можно объяснить наличием ненулевых мнимых значений для некоторых собственных значений матрицы переходов (этим значениям соответствуют затухающие синусоидальные (косинусоидальные) траектории решений), программа MZK точно рассчитывает траектории для всех переменных решаемой системы ОДУ, а программа ORIGEN2 рассчитывает значение этих переменных только в конечной точке заданного интервала интегрирования. В работе [13] указывается, что некоторые собственные значения матрицы переходов могут быть комплексными с ненулевыми мнимыми частями. Различия для отдельных нуклидов можно объяснить именно наличием ненулевых мнимых значений для некоторых собственных значений матрицы переходов (этим значениям соответствуют затухающие синусоидальные (косинусоидальные) траектории решений). *AL*-устойчивость и переменный шаг интегрирования для методов, реализованных в программе MZK, обеспечивают точный расчет амплитуды и периода колебаний для таких траекторий, но не абсолютно точное значение таких переменных в конкретный момент времени, а программа ORIGEN2 рассчитывает значение этих переменных с постоянным шагом интегрирования и только в конечной точке заданного интервала интегрирования, что также не гарантирует абсолютно точного решения в этой точке и, кроме того, не позволяет оценить амплитуду и период колебаний, поэтому для таких переменных могут быть расхождения с результатами, полученными с помощью программы MZK.

Основные преимущества применения программы MZK для решения задач изотопной кинетики состоят в возможности отслеживания траекторий переменных для решаемых систем ОДУ и переменный шаг интегрирования, поддерживающий заданную точность благодаря *AL*-устойчивости используемых методов.

Для практического использования программы MZK в полномасштабных расчетах выгорания требуются значительные вычислительные ресурсы. В настоящее время программа MZK реализована без учета многопроцессорного режима работы и разреженности используемых матриц, что накладывает ограничение на размерность решаемой задачи, равную порядка 5000 уравнений, обусловленное лимитом доступной памяти процессора и приемлемым временем счета. В этой связи возможными направлениями развития программы MZK представляется разработка специализированных алгоритмов для многопроцессорного режима расчетов, а также для обработки и хранения матриц в разреженном виде.

1. Croff A. G. ORIGEN2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials // Nuclear technology. September 1983. Vol. 62. P. 335–352.
2. Соловьев А. В., Митенкова Е. Ф., Новиков Н. В., Соловьева Е. В. Решение задач изотопной кинетики с полным числом элементов выхода продуктов деления // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 3. С. 165–170.
3. Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. М.: Мир, 1999. 685 с.
4. Скворцов Л. М. Простые явные методы численного решения жестких обыкновенных дифференциальных уравнений // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 154–162.
5. Gear C. W. Numerical initial value problems in ordinary differential equations. Englewood Cliffs. Chapter 2. NJ: Prentice-Hall, 1971, 253 p.
6. Евстифеев Ю. А., Маничев В. Б. Эффективный А-устойчивый метод интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений для программ анализа электронных схем // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1986. Т. 29, № 11. С. 31–35.
7. Butcher J. C. Numerical methods for ordinary differential equations. 2nd ed., John Wiley & Sons Ltd, 2008. 484 p.
8. Деккер К., Вервер Я. Устойчивость методов Рунге–Кутты для жестких нелинейных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1988. 334 с.
9. Жук Д. М., Маничев В. Б., Ильицкий А. О. Методы и алгоритмы решения дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования систем и объектов во временной области // Информационные технологии. 2010. № 7, ч. 1. С. 16–24.
10. Жук Д. М., Маничев В. Б., Сахаров М. К. SADEL — библиотека "сверхточных" решателей для программного комплекса ПА10 (SADEL—PA10) // В сб. научных трудов МЭС-2012. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 147–153.
11. Жук Д. М., Маничев В. Б. Программа DMAN для решения дифференциально-алгебраических уравнений. Номер государственной регистрации 2009612666 от 27 мая 2009.
12. Маничев В. Б., Глазкова В. Н., Кожевников Д. Ю., Кирьянов Д. А., Сахаров М. К. Решение систем линейных алгебраических уравнений с удвоенной точностью вычислений на языке Си // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. 2011. Вып. 4.
13. Маничев В. Б. Достоверность численного моделирования непрерывных динамических систем // Инженерный вестник. Электрон. журн. 2015. № 11. URL: <http://engsi.ru/doc/821946.html> (дата обращения 09.08.2016).
14. Pusa M. Higher-order chebyshev rational approximation method (CRAM) // In: Proc. PHYSOR'2014. Kyoto, Japan, September 28 — October 3, 2014.
15. Pusa M. Correction to partial fraction decomposition coefficients for chebyshev rational approximation on negative real axis. 2012. Math.NA arXiv:1206.2880v1.
16. Mitenkova E. F., Novikov N. V., Gadzhiev G. I., Syuzov V. N. Studies of metal (U-Pu-Zr) fuel in BOR-609 reactor with focus on its use in high power sodium fast reactors // In Proc. PHYSOR'2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, May 9–14, 2010, CD-ROM, La-Grande Park, IL (2010).
17. Kuzavkov N., Mitenkova E., Novikov N., Sukharev Yu. et al. HTTR's start-up core benchmark physics calculations // 3st Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme (RCM on CRP) "Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance" IAEA Headquarters, Vienna, 2003. P. 35–47.
18. Митенкова Е. Ф., Новиков Н. В., Соловьева Е. В. Библиотеки с расширенным представлением выхода продуктов деления в расчетах нуклидного состава топлива в быстром спектре // Атомная энергия. 2014. Т. 117, вып. 6. С. 341–346.
19. Митенкова Е. Ф., Новиков Н. В. Минимальная погрешность расчета накопления газообразных продуктов деления в металлическом топливе, облучаемом в быстром спектре // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2016. Вып. 1. С. 77–90.
20. Маничев В. Б. Новые алгоритмы для программ анализа динамики технических систем // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение, 1996, Вып. 1. С. 48–56.

V. B. Manichev, PhD, Associate Professor, e-mail: manichev@bmstu.ru,  
E. F. Mitenkova, PhD, Head of Laboratory, e-mail: mit@ibrae.ac.ru,  
D. M. Zhuk, PhD, Associate Professor, D. Ju. Kozhevnikov, Lead Engineer,  
Bauman Moscow State Technical University,  
A. V. Solovjev, PhD, Leading Researcher, e-mail: solovjev@ibrae.ac.ru,  
E. V. Solovjeva, PhD, Researcher, e-mail: sol@ibrae.ac.ru,  
Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

## AL-Stable Methods in ODE Solving for Isotope Kinetics Problems of Reactor Systems

*The development of advanced reactors with the new fuel compositions, the improvement of accuracy and reliability for safety justification of facilities with the high burnout spent nuclear fuel require the accurate calculations. In engineering calculations are traditionally used ~ 200–400 elements for the solution of the isotope kinetics problems of reactor systems. The widely used ORIGEN programs for modeling transitions in chains of transformations do not provide computation of errors for all fission products (~ 1800) of irradiated fuel. The article analyzes the possibility of applying the AL-stable implicit methods with a variable step of ODE solution, which was realized in the MZK program for the problem decision of the isotope kinetics of reactor systems.*

**Keywords:** mathematical modelling, ordinary differential equation (ODE), AL-methods, isotope kinetics, reactor systems

### References

1. Croff A. G. ORIGEN2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials, *Nuclear technology*, September 1983, vol. 62, pp. 335–352.
2. Solovjev A. V., Mitenkova E. F., Novikov N. V., Solovjeva E. V. Reshenie zadach izotopnoj kinetiki s polnym chislom jelementov vyhoda produktov delenija (Solution of Isotopic Kinetic Problems using a Full Fission Yield Library), *Atomnaja Jenergija*, 2016, vol. 120, no. 3, pp. 165–170.
3. Hajrer Je., Vanner G. Reshenie obyknovennykh differencial'nykh uravnenij. Zhestkie i differencial'no-algebraicheskie zadachi (Solving ordinary differential equations II. Stiff and Differential-Algebraic problems). Moscow, Mir, 1999, 685 p.
4. Skvorcov L. M. Proste javnye metody chislennogo reshenija zhestkih obyknovennykh differencial'nykh uravnenij. (Simple explicit methods for the numerical solution of stiff ordinary differential equations), *Vychislitel'nye metody i programmirovanie*, 2008, vol. 9, pp. 154–162.
5. Gear C. W. *Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations*. Englewood Cliffs, NJ: Ch. 2. Prentice-Hall, 1971. 253 p.
6. Evstifeev Ju. A., Manichev V. B. Effektivnyj A-ustojchivyj metod integrirovaniya obyknovennykh differencial'nykh uravnenij dlja programm analiza jelektronnykh shem. (Effective A- stable method of integration of ordinary differential equations for programs of analysis of electronic circuits), *Izv. vuzov. Radiojelektronika*, 1986, vol. 29, no. 11, pp. 31–35.
7. Butcher J. C. *Numerical methods for ordinary differential equations* (2nd ed.), John Wiley & Sons Ltd, 2008. 484 p.
8. Dekker K., Verver Ja. *Ustojchivost' metodov Runge–Kutty dlja zhestkih nelinejnykh differencial'nykh uravnenij*. (Stability Of Runge-Kutta Methods For Stiff Nonlinear Differential Equations). Moscow, Mir, 1988, 334 p.
9. Zhuk D. M., Manichev V. B., Il'nickij A. O. *Metody i algoritmy reshenija differencial'no-algebraicheskih uravnenij dlja modelirovaniya sistem i ob'ektov vo vremennomj oblasti* (Methods and algorithms for solution of differential-algebraic equations for modelling systems and objects in time domain), *Informacionnye tehnologii*, 2010, no. 7, part 1, pp. 16–24.
10. Zhuk D. M., Manichev V. B., Saharov M. K. SADEL — biblioteka "sverhtochnykh" reshatelej dlja programmno kompleksa PA10 (SADEL—PA10). (SADEL — library "high-precision" solvers for PA10 (SADEL—PA10)), *Sb. nauchnykh trudov MJeS-2012*, Moscow, IPPM RAN, 2012, pp. 147–153.
11. Zhuk D. M., Manichev V. B. *Programma DMAN dlja reshenija differencial'no-algebraicheskih uravnenij* (The program DMAN for the solution of differential-algebraic equations), nomer gosudarstvennoj registracii 2009612666 ot 27 maja 2009.
12. Manichev V. B., Glazkova V. N., Kozhevnikov D. Ju., Kir'janov D. A., Saharov M. K. *Reshenie sistem linejnykh algebraicheskih uravnenij s udvoennoj tochnost'ju vychislenij na jazyke Si*. (Solving systems of linear algebraic equations with double precision in C), *Vestnik MGTU, ser. Priborostroenie*, 2011, vol. 4.
13. Manichev V. B. *Dostovernost' chislennogo modelirovaniya nepreryvnykh dinamicheskikh sistem* (The accuracy of the numerical simulation of continuous dynamic systems), *Inzhenernyj vestnik, MGTU im. N. E. Baumana. Jelektron. zhurn.* 2015, no. 11, URL: <http://engsi.ru/doc/821946.html> (data obrashhenija 09.08.2016).
14. Pusa M. Higher-order chebyshev rational approximation method (CRAM), *Proc. PHYSOR'2014. Kyoto, Japan, September 28 – October 3, 2014*.
15. Pusa M. *Correction to partial fraction decomposition coefficients for chebyshev rational approximation on negative real axis*, arXiv: 1206.2880v1 [math.NA] (2012).
16. Mitenkova E. F., Novikov N. V., Gadzhiev G. I., Syuzov V. N. *Studies of metal (U-Pu-Zr) fuel in BOR-609 reactor with focus on its use in high power sodium fast reactors*, *Proc. PHYSOR'2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, May 9–14, 2010*, on CD-ROM, La-Grande Park, IL, 2010.
17. Kuzavkov N., Mitenkova E., Novikov N., Sukharev Yu. et al. HTTR's start-up core benchmark physics calculations, *3rd Research Coordination Meeting for the Coordinated Research Programme (RCM on CRP), Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance*, IAEA Headquarters, Vienna, 2003, pp. 35–47.
18. Mitenkova E. F., Novikov N. V., Solov'eva E. V. *Biblioteki s rasshirenym predstavleniem vyhoda produktov delenija v raschetah nuklidnogo sostava topliva v bystrom spektre* (Fission Yield Libraries with Improved Energy Representation in Accurate Depletion Calculations of Fast Reactor Systems), *Atomnaja jenergija*, 2014, vol. 117, no. 6, pp. 341–346.
19. Mitenkova E. F., Novikov N. V. *Minimal'naja pogreshnost' rascheta nakoplenija gazoobraznykh produktov delenija v metallicheskom toplive, oblučaemom v bystrom spektre* (Minimum Calculation Error of Gaseous Fission Products Accumulation in the Metal Fuel Irradiated in Fast Neutron Spectrum), *Voprosy atomnoj nauki i tehniki, ser. Fizika jadernykh reaktorov*, 2016, no. 1, pp. 77–90.
20. Manichev V. B. *Novye algoritmy dlja programm analiza dinamiki tehniceskikh sistem* (New algorithms for software analysis of the dynamics of technical systems), *Vestnik MGTU, ser. Priborostroenie*, 1996, no. 1, pp. 48–56.

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 621.039.546.

**Е. П. Доморацкий**, д-р техн. наук, проф., e-mail: Domorackiy.E@mfua.ru  
Московский финансово-юридический университет МФЮА,  
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва

## Метод статистической малоракурсной реконструкции геометрических характеристик трехмерных объектов по их дискретным проекционным изображениям

*Рассмотрен метод статистической малоракурсной реконструкции геометрических характеристик трехмерных объектов выпуклой неправильной формы, аппроксимируемых эллипсоидом общего вида, по базовым признакам одной триады его взаимно ортогональных двумерных дискретных проекционных изображений. В качестве базовых признаков выбраны площади двумерных проекционных изображений объекта и линейные размеры одномерных проекционных изображений. Пространственными геометрическими характеристиками при описании размеров объекта являются линейные (габаритные) размеры и средний проектированный диаметр трехмерного изображения аппроксимирующего его эллипсоида общего вида, а при описании формы объекта — коэффициент несферичности, определяемый отношением максимального и минимального габаритных размеров (осей) аппроксимирующего эллипсоида.*

**Ключевые слова:** объект, способ реконструкции, геометрические характеристики, дискретное изображение, базовые признаки

### Введение

В настоящее время к наиболее эффективным методам определения геометрических характеристик трехмерных микро- и макрообъектов относятся проекционные изображающие методы, основанные на получении, обработке, анализе и синтезе первичной информации в виде различного рода одномерных и двумерных проекционных изображений объекта (томография, радиография, оптико-электронные методы и т.д.) [1, 2]. Вследствие несоответствия геометрических размеров и формы трехмерного объекта и его плоскостных проекционных изображений необходимо применение методов стереологической реконструкции (восстановления, синтеза) трехмерного изображения объекта по базовым геометрическим признакам его плоскостных проекционных изображений.

При этом качество определения геометрической характеристики объекта (например, среднего диаметра, коэффициента несферичности) определяется набором признаков его трехмерного изображения (образа), необходимых и достаточных для адекватного (с заданными точностью, достоверностью и временем обработки) описания этого образа [1, 3, 4]. В общем виде геометрическую ха-

рактеристику (контролируемый параметр) можно представить в виде функции [5]:

$$КП = f(Cn, Пу, Бэ, Со, Ру, Ки, Ср, Т), \quad (1)$$

где  $Cn$  — способ получения изображения;  $Пу$  — параметры изображения;  $Бэ$  — базовые элементы изображения (признаки изображения при анализе);  $Со$  — способ определения базовых элементов изображения;  $Ру$  — ракурс изображения (проекции) относительно объекта (углы Эйлера  $\alpha, \beta, \gamma$ );  $Ки$  — количество изображений (проекций);  $Ср$  — способ реконструкции (восстановления) образа объекта по признакам изображений;  $Т$  — время (длительность) определения  $КП$  ( $T = tu + to + tp$ ).

### Постановка задачи (цель работы)

Данная работа относится к области морфологической обработки изображений и заключается в разработке метода (процедур) статистической малоракурсной реконструкции геометрических характеристик трехмерных объектов (многомерных функций) по их дискретным проекционным изображениям (интегральным характеристикам).

При разработке метода реконструкции необходимо выполнение следующих процедур (операций).

1. Выбор математической модели, аппроксимирующей выпуклый трехмерный объект неправиль-



ной формы и геометрических характеристик его размеров и формы.

2. Определение и выбор оптимальных базовых геометрических признаков проекционных изображений.

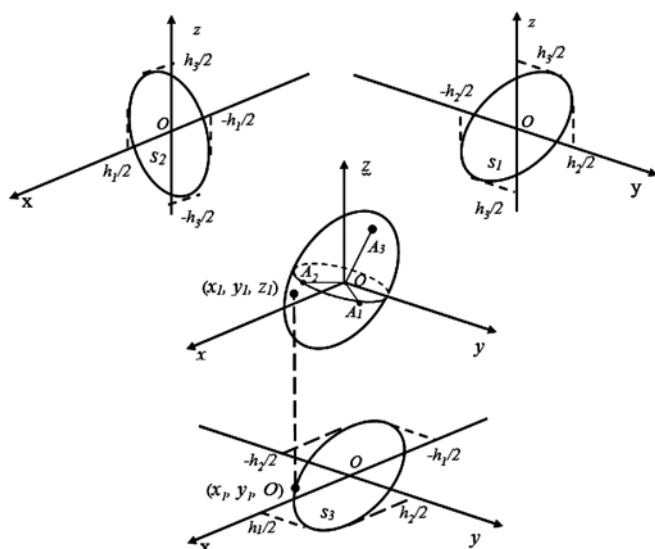
3. Получение математической модели двумерного проекционного изображения на выбранную плоскость наблюдения (ракурс) и геометрических характеристик его размеров и формы.

4. Получение математических моделей зависимостей выбранных базовых признаков проекционного изображения от геометрических размеров и пространственной ориентировки (ракурсов) трехмерного объекта.

Указанные операции относятся к прямым задачам интегральной геометрии, их решение для трехмерных объектов неправильной формы, аппроксимируемых эллипсоидом общего вида, приведено в работе [6]. Настоящая работа является продолжением этой тематики, и ее цель заключается в решении обратной задачи интегральной геометрии путем разработки математических моделей (функциональных зависимостей) реконструкции пространственных геометрических характеристик адекватного трехмерного изображения (образа) объекта на основе выбранных базовых геометрических признаков плоскостных (дискретных) проекционных изображений.

### Описание метода реконструкции

В качестве математической модели, аппроксимирующей геометрические характеристики выпуклого трехмерного объекта неправильной формы (его трехмерное изображение — образ), выбран эл-



Базовые геометрические признаки триады взаимно ортогональных двумерных проекционных изображений трехмерного объекта

липсоеид общего вида. При этом геометрические (габаритные) размеры трехмерного объекта определяются численными значениями взаимно ортогональных осей эллипсоида  $2A_1, 2A_2, 2A_3$ , а его средний диаметр ( $D$ ) и фактор формы ( $K$ ) определяются соответственно из соотношений [6]:

$$D = \sum_{i=1}^3 2A_i/3; K = \frac{\max\{A_1, A_2, A_3\}}{\min\{A_1, A_2, A_3\}}. \quad (2)$$

В качестве базовых геометрических признаков в данной работе выберем площади трех взаимно ортогональных двумерных проекционных изображений объекта ( $s_1, s_2, s_3$ ) и линейные размеры трех его одномерных проекционных изображений на взаимно ортогональные оси координат (ракурсы) ( $h_1, h_2, h_3$ ) (см. рисунок).

Числовые значения выбранных геометрических признаков в зависимости от линейных (габаритных) размеров и пространственной ориентировки (ракурсов) трехмерного объекта, аппроксимируемого эллипсоидом общего вида, определяются следующим образом [6]:

$$\begin{cases} h_i = 2 \left[ \sum_{j=1}^3 A_j^2 R_{ji}^2 \right]^{1/2}; \\ s_i = \pi A_1 A_2 A_3 \left[ \sum_{j=1}^3 R_{ji}^2 A_j^2 \right]^{1/2}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $j, i$  — номера проекции и текущей ориентировки (ракурса);  $R$  — матрица поворота эллипсоида (углы Эйлера  $\alpha, \beta, \gamma$ ):

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\alpha & -\cos\alpha \sin\beta \\ -\sin\alpha \cos\beta & \cos\alpha & \sin\alpha \sin\beta \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta \cos\gamma - \sin\alpha \sin\gamma & \cos\alpha \cos\beta \sin\gamma + \sin\alpha \cos\gamma & -\cos\alpha \sin\beta \\ -\sin\alpha \cos\beta \cos\gamma - \cos\alpha \sin\gamma & -\sin\alpha \cos\beta \sin\gamma + \cos\alpha \cos\gamma & \sin\alpha \sin\beta \\ \sin\beta \cos\gamma & \sin\beta \sin\gamma & \cos\beta \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Для получения функциональных зависимостей реконструкции выразим параметры, зависящие от значений  $A_j^2$  и  $R_{ij}^2$  в выражении (3), через  $h_i$  и  $s_i$  и подставим полученные величины в уравнение эл-

липсоида, произвольно ориентированного в пространстве [6]:

$$\begin{aligned} & \left[ \sum_{i=1}^3 (R_{i1}^2/A_i^2)x + \sum_{i=1}^3 (R_{i1}R_{i2}/A_i^2)y + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^3 (R_{i1}R_{i3}/A_i^2)z \right]x + \left[ \sum_{i=1}^3 (R_{i2}R_{i1}/A_i^2)x + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^3 (R_{i2}^2/A_i^2)y + \sum_{i=1}^3 (R_{i2}R_{i3}/A_i^2)z \right]y + \\ & \left[ \sum_{i=1}^3 (R_{i3}R_{i1}/A_i^2)x + \sum_{i=1}^3 (R_{i3}R_{i2}/A_i^2)y + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^3 (R_{i3}^2/A_i^2)z \right]z = 1. \end{aligned} \quad (4)$$

После подстановки уравнение эллипсоида (4) примет вид

$$\begin{aligned} & [(s_1^2/\pi^2)x + a_1y + a_2z]x + [a_1x + (s_2^2/\pi^2)y + a_3z]y + \\ & + [a_2x + a_3y + (s_3^2/\pi^2)z]z = A_1^2 A_2^2 A_3^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= [(s_1^2 s_2^2/\pi^4) - A_1^2 A_2^2 A_3^2 (h_3^2/4)]^{1/2}; \\ a_2 &= [(s_1^2 s_3^2/\pi^4) - A_1^2 A_2^2 A_3^2 (h_2^2/4)]^{1/2}; \\ a_3 &= [(s_2^2 s_3^2/\pi^4) - A_1^2 A_2^2 A_3^2 (h_1^2/4)]^{1/2}. \end{aligned}$$

При этом инварианты (параметры, не меняющиеся при пространственных поворотах эллипсоида вида (5)) определим из соотношений:

$$\begin{cases} I = \sum_{i=1}^3 s_i^2/\pi^2; \\ J = A_1^2 A_2^2 A_3^2 \left[ \sum_{i=1}^3 h_i^2/4 \right]; \\ D = A_1^2 A_2^2 A_3^2 \Pi, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Pi &= \left( \sum_{i=1}^3 h_i^3 s_i^2/4\pi^2 \right) - (h_1^2 h_2^2 h_3^2/32) \times \\ & \times \left\{ 1 - \left\{ \prod_{i=1}^3 [1 - (16/\pi^2)(h_i^2 s_i^2/h_1^2 h_2^2 h_3^2)] \right\}^{1/2} \right\}. \end{aligned}$$

Каноническое уравнение эллипсоида общего вида в декартовой системе координат  $x', y', z'$  определяется выражением [6]

$$(x'^2/A_1^2) + (y'^2/A_2^2) + (z'^2/A_3^2) = 1, \quad (7)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  — полуоси эллипсоида.

Инварианты для этого эллипсоида определим из соотношений:

$$\begin{cases} I = A_1^2 A_2^2 + A_1^2 A_3^2 + A_2^2 A_3^2; \\ J = A_1^2 A_2^2 A_3^2 \sum_{i=1}^3 A_i^2; \\ D = A_1^4 A_2^4 A_3^4. \end{cases} \quad (8)$$

Уравнения (5) и (7) описывают один и тот же эллипсоид и отличаются только его пространственным положением, поэтому члены, стоящие в правых частях уравнений (6) и (8), должны быть равны. Отсюда получаем систему уравнений относительно неизвестных  $A_1, A_2, A_3$ :

$$\begin{cases} A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 = M; \\ A_1^2 A_2^2 + A_1^2 A_3^2 + A_2^2 A_3^2 = I; \\ A_1^2 A_2^2 A_3^2 = \Pi, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$M = J/A_1^2 A_2^2 A_3^2.$$

Система уравнений (9) связывает размеры полуосей эллипсоида, произвольно ориентированного в пространстве, с выбранными базовыми геометрическими признаками проекционных изображений и, следовательно, определяет принципы данного метода реконструкции геометрических характеристик трехмерного объекта при его аппроксимации эллипсоидом общего вида.

Таким образом, с учетом соотношений (6) и (8) получаем систему уравнений функциональных зависимостей предложенного метода реконструкции:

$$\begin{cases} A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 = \sum_{i=1}^3 h_i^2/4; \\ A_1^2 A_2^2 + A_1^2 A_3^2 + A_2^2 A_3^2 = \sum_{i=1}^3 s_i^2/\pi^2; \\ A_1^2 A_2^2 A_3^2 = \left[ \sum_{i=1}^3 h_i^3 s_i^2/4\pi^2 \right] - (h_1^2 h_2^2 h_3^2/32) \times \\ \times \left\{ 1 - \left\{ \prod_{i=1}^3 [1 - (16/\pi^2)(h_i^2 s_i^2/h_1^2 h_2^2 h_3^2)] \right\}^{1/2} \right\}. \end{cases} \quad (10)$$

Решая систему уравнений (10) (например, тригонометрическим способом) относительно полуосей эллипсоида  $A_1, A_2, A_3$  и учитывая, что имеют смысл только положительные значения корней, получаем линейные размеры полуосей аппроксимирующего эллипсоида. При этом искомые геометрические характеристики размеров и формы трехмерного объекта определяются из соотношения (2).

## Заклучение

Решена обратная задача морфологической обработки изображений (задача синтеза) путем разработки метода статистической малоракурсной реконструкции пространственных геометрических характеристик трехмерного объекта выпуклой неправильной формы, аппроксимируемого эллипсоидом общего вида по базовым геометрическим признакам в виде площадей трех взаимно ортогональных двумерных проекционных изображений объекта и линейных размеров трех его одномерных проекционных изображений на взаимно ортогональные оси координат (ракурсы). Достоинством предложенного метода реконструкции является уменьшение числа ракурсов до трех, что наряду с выбором эффективных базовых признаков изображения обеспечивает оптимизацию (упрощение) его аппаратной и программной реализации и сокращение времени обработки изображения.

Полученные в данной работе математические модели могут быть использованы при разработке,

оптимизации и исследовании операций получения, обработки, анализа и синтеза изображений объектов; при оценке качества изображений; при геометрическом проекционном контроле трехмерных объектов и при распознавании образов.

## Список литературы

1. Левин Г. Г., Вишняков Г. Н. Оптическая томография. М.: Радио и связь. 1989. 224 с.
2. Доморацкий Е. П. Метод дистанционного контроля геометрических характеристик движущихся объектов по их дискретным импульсным изображениям // Материалы II Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли". Красноярск: Сибирский гос. аэрокосмический университет. 2015. С. 143–146.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1042 с.
4. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Соффера. 2 изд. М.: Физмалит. 2003. 784 с.
5. Доморацкий Е. П., Байбикова Т. Н. О качестве цифровых изображений объектов. // Вестник МФЮА. М.: МФЮА. 2014. № 2. С. 206–214.
6. Доморацкий Е. П. Алгоритм синтеза геометрических характеристик проекционных изображений трехмерных объектов // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 8. С. 597–604.

**E. P. Domorackiy**, Professor, e-mail: Domorackiy.E@mfua.ru  
Moscow University of Finance and Law (MFUA),  
Financial University under the Government of the Russian Federation

## Method of Statistical Few View Reconstruction of Geometrical Characteristics of Three-Dimensional Objects by their Discrete Projection Images

*In this paper the method of statistical few view reconstruction of the geometrical characteristics of three-dimensional convex objects of irregular shape which are approximated by an ellipsoid of General form is under consideration. The statistical reconstruction is carried out with the usage of the basic features of a triad of its mutually orthogonal two-dimensional discrete projection images. The areas of two-dimensional projection images of an object and its linear sizes of one-dimensional projection images are taken as the basic characteristics. While describing an object sizes, we consider that the spatial geometrical characteristics of an object are its linear (dimensional) sizes and the average projected diameter of a three-dimensional image of an ellipsoid of General form, which approximates this object. While describing the object shape, we consider that the spatial geometrical characteristics of an object are represented by the coefficient of asphericity that is determined as the ratio of the maximum and minimum dimensions (axes) of the approximating ellipsoid.*

**Keywords:** object, reconstruction method, geometrical characteristics, discrete image, basic characteristics

## References

1. Levin G. G., Vishnjakov G. N. *Opticheskaja tomografija* [Optical tomography], Moscow, Radio i svjaz'. 1989. 224 p. (in Russian).
2. Domorackiy E. P. Metod distancionnogo kontrolja geometricheskikh harakteristik dvizhushhihsja ob#ektov po ih diskretnym impul'snym izobrazhenijam [Method of remote control of geometrical characteristics of the moving objects with the usage of their discrete impulse images]. // *Materialy II Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Regional'nye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli*. Krasnojarsk. Sibirskij gos. ajerokosmicheskij universitet. 2015, pp. 143–146 (in Russian).
3. Gonsales R., Vuds R. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Digital image processing], Moscow, Tehnosfera, 2005. 1042 p. (in Russian).
4. *Metody komp'juternoj obrabotki izobrazhenij* [Methods of computer image processing]. Pod red. V. A. Sojfera. 2 izd., Moscow, FizmaLit. 2003. 784 p. (in Russian).
5. Domorackiy E. P., Baybikova T. N. O kachestve cifrovyh izobrazhenij ob#ektov [The quality of digital images of objects], *Vestnik MFJuA*, Moscow, MFJuA, 2014, no. 2, pp. 206–214. (in Russian).
6. Domorackiy E. P. Algoritm sinteza geometricheskikh harakteristik proekcionnyh izobrazhenij trehmernyh ob#ektov [Synthesis algorithm of the geometrical characteristics of the three-dimensional objects], *Informacionnye tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 8, pp. 597–604 (in Russian).

# ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ SOFTWARE ENGINEERING

УДК 004.42

**А. И. Долженко**, д-р экон. наук, проф., e-mail: doljenkoalex@gmail.ru,  
**С. А. Глушенко**, канд. экон. наук, ст. преподаватель, e-mail: www.555.sergey@mail.ru,  
Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), г. Ростов-на-Дону

## Динамическая валидация данных в WPF-приложениях

При создании приложений для платформы Windows на основе технологии Windows Presentation Foundation ставится задача валидации данных при их вводе на основе бизнес-правил, определяемых предметной областью. Цель данного исследования — разработка приемов динамической валидации данных для бизнес-правил, вычисляемых в процессе работы приложения с настройкой их на текущие значения параметров.

**Ключевые слова:** WPF-приложение, валидация, ввод данных, бизнес-правила, исключения, интерфейс IDataErrorInfo, правила ValidationRule

### Введение

При вводе данных в программных приложениях требуется их проверка (валидация) на допустимость в соответствии с различными бизнес-правилами, в качестве которых могут быть использованы как индивидуальные, так и перекрестно-связанные свойства (cross-coupled properties), где результат проверки одного свойства зависит от значения другого [1]. Технология связывания в Windows Presentation Foundation (WPF) для построения клиентских приложений Windows предоставляет несколько механизмов для решения задачи валидации данных, которые приведены в таблице [2].

Механизм проверки "Исключения" предполагает установку свойства `ValidatesOnExceptions` объекта `Binding` и обработку исключения, которое генерируется при попытке присвоить свойству недопустимое значение. Проверку допустимости значения обычно проводят в методе `set` верифицируемого свойства.

При использовании правила `ValidationRule` необходимо переопределить метод `Validate` для проверки допустимости изменения верифицируемого свойства. Этот механизм проверки переносит бизнес-логику верификации свойства в метод `Validate` (в механизме "Исключения" это реализовывалось в методе `set`) и приводит к генерации исключения `ExceptionValidationRule`.

Применение интерфейса `IDataErrorInfo` предполагает реализацию интерфейса для верифицируемого свойства, что необязательно для ранее рассмотренных правил проверки, и возвращение свойства `IDataErrorInfo.Error` при ошибке верификации.

На рис. 1 показан принцип работы проверки значений привязки данных (объекта `Binding`).

Тем не менее, встречаются ситуации динамической валидации, которые представляют определен-

ные затруднения, а именно ситуации, связанные с проверкой правил, пороговые значения для которых задаются не статически, а в процессе выполнения программы. На момент написания статьи

### Механизмы проверки

Способ проверки	Описание механизма
Исключения	Устанавливает ошибку проверки привязки данных (объекта <code>Binding</code> ), если генерируется исключение вследствие присвоения модифицированного значения свойству объекта
Правила <code>ValidationRule</code>	Устанавливает ошибку проверки привязки данных, если возвращаемый объект <code>ValidationResult</code> переопределенного метода <code>Validate</code> недопустим для связанного элемента управления
Интерфейс <code>IDataErrorInfo</code>	Устанавливает ошибку проверки привязки данных, если вызываемым интерфейсом <code>IDataErrorInfo</code> API будет установлено ненулевое или непустое значение для свойства <code>ValidatesOnDataErrors</code> объекта — источника данных

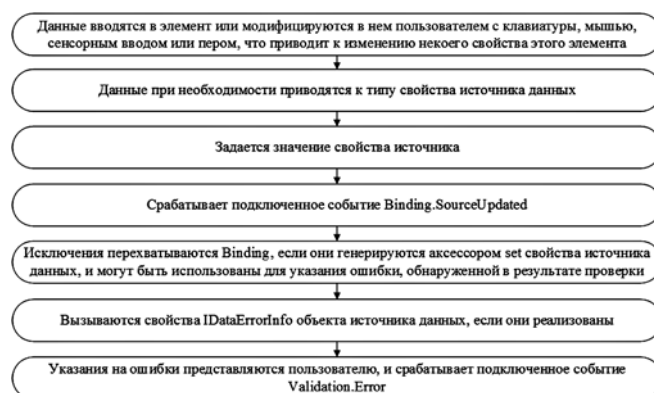


Рис. 1. Принцип работы проверки значений привязки данных

была исследована документация Microsoft Developer Network (MSDN) [3], а также материалы форумов разработчиков приложений на базе WPF, таких как: cyberforum.ru, programmersforum.ru, code-forum.net и др. Исследования показали, что аналогичные вопросы возникали и у других разработчиков, но предложенные решения не были найдены.

### Постановка задачи

При вводе пользователем данных в приложении их допустимые значения определяются бизнес-правилами предметной области, и эти ограничения вычисляются во время выполнения программы при каждом вводе данных.

Допустим, что в бизнес-процессе значение переменной  $par$  должно удовлетворять следующим условиям:

$$par \in [0, var]; \quad (1)$$

$$var = f(s_t) \in [min, max], \quad (2)$$

где  $var$  — вычисляемое значение границы допустимого диапазона для параметра  $par$ ;  $f(s_t)$  — функция, определяемая конкретным бизнес-процессом;  $s_t$  — состояние системы в момент времени  $t$ ;  $min, max$  — пороговые значения, которые задаются для конкретного бизнес-процесса.

В процессе ввода переменной  $par$  в приложение для текущего состояния системы  $s_t$  необходимо вычислить значение переменной  $var = f(s_t)$  для проверки условия (1).

Предположим, что в проектируемом приложении, которое предназначено для распределения учебной нагрузки по преподавателям кафедры университета, необходимо реализовать динамическую валидацию данных в процессе назначения нагрузки преподавателям. Модель классов задачи "Распределение нагрузки" приведена на рис. 2.

Класс TeachingLoad имеет свойства, характеризующие учебную нагрузку (например, Lecture — число лекционных часов, SumLoad — суммарная нагрузка по дисциплине), а также индикаторы состояния распределения нагрузки:

- IsLoad — признак распределения нагрузки (распределена или не распределена нагрузка по дисциплине между преподавателями);
- IsFaultLoad — признак ошибки распределения нагрузки (превышение плана распределения).

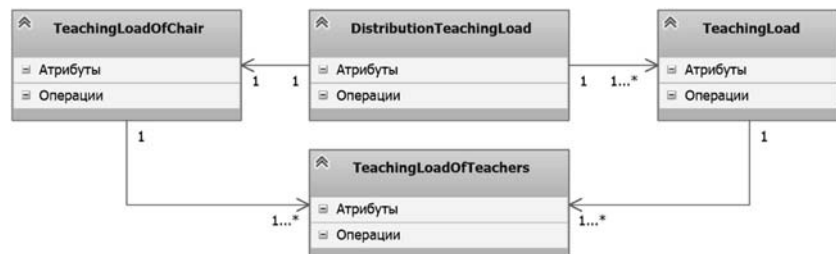


Рис. 2. Модель классов задачи "Распределение нагрузки"

Класс TeachingLoadOfChair содержит свойства, характеризующие учебную нагрузку кафедры университета, а класс TeachingLoadOfTeacher — нагрузку преподавателя. Класс DistributionTeachingLoad является базовым для поддержки бизнес-процесса распределения нагрузки и содержит свойство TeachingLoadOfChair для агрегации (1:1) с объектом одноименного класса, коллекцию TeachingLoadOfTeachers для агрегации (1:n) с объектами класса TeachingLoadOfTeacher и коллекцию ListDisciplineDistribution, предназначенную для использования в процессе распределения нагрузки. Учебная нагрузка по дисциплине кафедры рассматривается как плановая и должна быть распределена одному или нескольким преподавателям. Одним из бизнес-правил распределения нагрузки является следующее: распределение учебной нагрузки кафедры по каждой позиции дисциплины (лекции, лабораторные работы и т.п.) не должно превышать плановых значений.

При реализации бизнес-правила необходимо проверить для каждой распределяемой позиции списка, не превышает ли планового значения суммарное значение распределенной нагрузки. Бизнес-правило должно проверяться при каждом вводе или редактировании часов нагрузки для преподавателей по каждой позиции (лекции, лабораторные работы и т.п.) для выбранной дисциплины.

Для рассматриваемого случая в процессе валидации требуется проверять, не превосходит ли вводимое значение планового с учетом уже распределенной нагрузки:

$$lecture\_input \leq lecture\_distribution; \quad (3)$$

$$lecture\_distribution = lecture\_plan - \sum_{i=1}^N lecture\_teacher_i \quad (4)$$

где  $lecture\_input$  — вводимое значение для распределения лекционной нагрузки для преподавателя;  $lecture\_distribution$  — нераспределенная лекционная нагрузка по дисциплине;  $lecture\_plan$  — плановая нагрузка по дисциплине;  $lecture\_teacher_i$  — распределенная лекционная нагрузка  $i$ -му преподавателю.

Валидация должна обеспечивать проверку бизнес-правила для любой дисциплины и любого вида нагрузки (лекции, лабораторные работы и т.п.). Учитывая, что нагрузка может распределяться между несколькими преподавателями, в процессе валидации вводимые значения по каждому виду нагрузки должны сравниваться с плановыми и уже распределенными другим преподавателям, если такие имеются.

Выбор предметной области для валидации данных не является принципиальным. Аналогичные задачи возникают и для приложений WPF других предметных областей, например при моделировании нейронных нечетких сетей в системах принятия решений.

## Реализация динамической валидации

Рассмотрение механизмов валидации показывает, что правила `ValidationRule` не позволяют реализовать динамическую валидацию в XAML-разметке, так как предполагают задание пороговых свойств класса валидации, используемых в качестве граничных для проверки, в виде констант. Применение механизма связывания `Binding` для пороговых свойств класса валидации невозможно, так как требует использования свойства зависимости.

Теоретически возможными являются механизмы проведения проверки при установке значения вводимого свойства (в методе `set`) и генерации исключения, а также использование интерфейса `IDataErrorInfo`. Оба эти варианта оставляют открытым вопрос, где вычислять граничные значения свойств и как их подвергать механизму проверки.

Нами был предложен вариант использования интерфейса `IDataErrorInfo` для валидации, но процесс получения вычисляемого значения для граничного параметра может быть применен и для генерации исключений при задании значения проверяемого свойства.

Общая схема реализации динамической валидации состоит в следующем.

1. Класс данных, для которых реализуется валидация (в рассматриваемом случае `TeachingLoad`),

должен реализовать интерфейсы `INotifyPropertyChanged` и `IDataErrorInfo`.

2. Для рассматриваемой задачи необходимо осуществлять проверку для нескольких свойств учебной нагрузки (лекции, лабораторные работы и т.п.), и алгоритм проверки должен быть унифицированным.

3. При назначении преподавателю отдельной позиции нагрузки обязательно изменяется суммарная распределенная нагрузка по дисциплине, поэтому изменение суммарной нагрузки преподавателя было выбрано в качестве события для формирования граничного значения для проверяемого свойства. Это обеспечивает вычисление граничного значения для любого проверяемого свойства при назначении отдельных позиций нагрузки по дисциплине для преподавателя. Данные действия являются обязанностью класса `TeachingLoad`. Такой выбор не является принципиальным, так как в любом другом случае всегда можно выбрать подходящее событие для проведения необходимых вычислений граничного значения для проверяемого свойства.

4. При изменении суммарной нагрузки по дисциплине для преподавателя классом `TeachingLoad` формируется сообщение об этом факте с помощью класса `Messenger`.

5. На сообщение подписывается экземпляр класса `DistributionTeachingLoad`, где происходит вычисление граничных свойств и проверка бизнес-правила. Результатом является формирование значения признака ошибки распределения нагрузки `IsFaultLoad` и создание сообщения с признаком ошибки.

6. Класс `TeachingLoad` подписывается на сообщение класса `DistributionTeachingLoad`, получает признак ошибки распределения нагрузки `IsFaultLoad` и в индексае интерфейса `IDataErrorInfo` осуществляет проверку бизнес-правила.

Общая схема реализации бизнес-правила приведена на рис. 3.

Класс `TeachingLoad` посылает сообщение `MessageSumLoad` при вводе данных и изменении суммарной нагрузки преподавателя. В классе `DistributionTeachingLoad` проверяется бизнес-правило `LoadRule`. После вычисления признака ошибки ввода формируется сообщение `MessageFaultLoad` с признаком ошибки. Признак ошибки используется индексаем интерфейса `IDataErrorInfo` для формирования результатов валидации.

Предложенное решение можно формализовать в виде шаблона проектирования динамической валидации `DynamicValidation` (рис. 4). На рис. 4 утолщенными линиями выделены классы библиотеки .NET Framework.

Класс `DataWithValidation` поддерживает интерфейсы `INotifyPropertyChanged` и `IDataErrorInfo`, а также содержит:

- свойство `memberData`, которое определяет допустимое значение для свойства валидации;
- свойство `actualData`, которое изменяется при вводе данных в приложение;

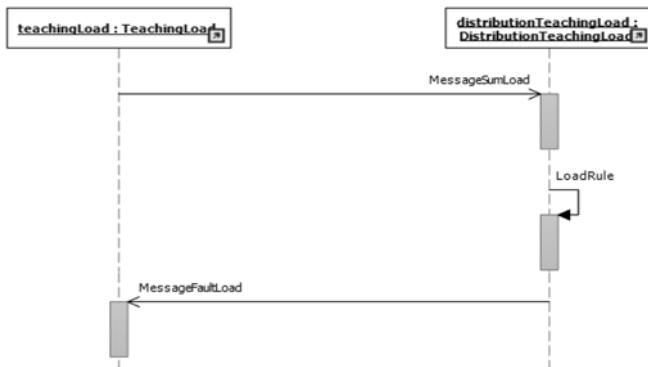


Рис. 3. Диаграмма формирования признака ошибки

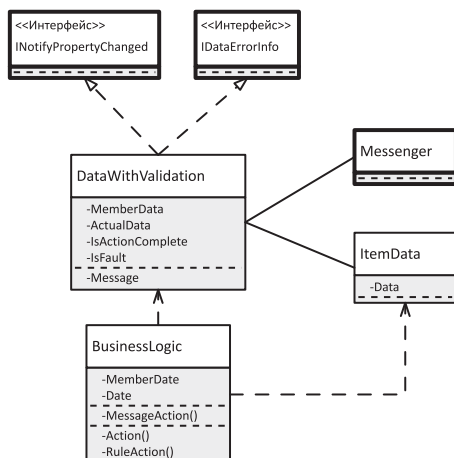


Рис. 4. Шаблон `DynamicValidation`

- свойство `IsActionComplete`, которое определяет успешность выполнения действий бизнес-процесса;
- свойство `IsFault`, определяющее наличие ошибки при попытке изменения свойства `actualData` пользователем (вводе данных);
- сообщение `Message`, которое формируется при изменении пользователем свойства `actualData`.

Класс `ItemData` получает значение свойства `Data` при успешном выполнении операции бизнес-процесса.

Класс `Messenger` используется для формирования сообщений.

Класс `BusinessLogic` использует свойства `MemberData` и `Data` для реализации заданного бизнес-процесса, реализуемого методом `Action()`, выполняет проверку бизнес-правила методом `RuleAction()` и с помощью метода `MessageAction()` задает значения `IsActionComplete` и `IsFault` класса `DataWithValidation`.

Рассмотрим программную реализацию динамической валидации. Фрагмент кода класса данных `TeachingLoad` (слой `Model` шаблона `MVVM`), поддерживающий интерфейсы `INotifyPropertyChanged` и `IDataErrorInfo`, приведен в листинге 1.

В листинге 1 приведено одно свойство `Lecture`, характеризующее число лекционных часов по дисциплине. При изменении свойства `Lecture` вызывается метод вычисления суммарной нагрузки преподавателя `SetSumLoad()`, что приводит к изменению суммарной нагрузки `SumLoad`, и генерируется событие изменения значения `Lecture`.

При изменении суммарной нагрузки `SumLoad` в обработчике события `PropertyChanged` классом `Messenger` отправляется (`Send`) сообщение (листинг 2).

Метод `Send()` является типизированным, где первый тип указывает класс передаваемого сообщения (`DataTeachingLoad`), а второй (необязательный токен) — тип получателя сообщения (`DistributionTeachingLoadViewModel`). Параметром метода `Send()` является экземпляр типа передаваемого сообщения, в нашем случае это экземпляр класса `DataTeachingLoad`.

Приемником сообщения является класс `DistributionTeachingLoadViewModel` (слой `ViewModel` шаблона `MVVM`), который подписывается на сообщение класса `DataTeachingLoad`, регистрируя его с помощью метода `Register()` класса `Messenger` (листинг 3).

При изменении свойства `IsFaultLoad` генерируется событие, и в обработчике события классом `Messenger` отправляется (`Send`) сообщение (листинг 4).

Источником сообщения является класс `DistributionTeachingLoadViewModel`, а получателем — класс `DataTeachingLoad`. Класс `DataTeachingLoad` подписывается на сообщение (листинг 5).

Лямбда-выражение (`x => IsFaultLoad = x.IsFaultLoad`) второго параметра метода `Register()` определяет задание значения свойства `IsFaultLoad` — индикатора ошибки ввода данных.

В классе `DataTeachingLoad` индикатор интерфейса `IDataErrorInfo` реализует валидацию ввода

```
public class DataTeachingLoad : INotifyPropertyChanged, IDataErrorInfo
{
    double lecture;
    public double Lecture
    {
        get { return lecture; }
        set { lecture = value; SumLoad = SetSumLoad();
            OnPropertyChanged("Lecture"); }
    }
    #region Реализация интерфейса IDataErrorInfo
    public string Error => null;
    public string this[string name]
    {
        get { string result = null;
            if (name == "Lecture")
            {
                if (!this.IsFaultLoad)
                    result = "Превышение плана недопустимо";
                if (lecture < 0)
                    result = "Отрицательное значение недопустимо";
            }
            return result; }
    }
    #endregion Реализация интерфейса IDataErrorInfo
    #region INotifyPropertyChanged Members
    public event PropertyChangedEventHandler PropertyChanged;
    private void OnPropertyChanged(string propertyName)
    {
        var handler = PropertyChanged;
        if (handler != null)
            handler(this, new PropertyChangedEventArgs(propertyName));
        switch (propertyName)
        {
            case "SumLoad":
                Messenger.Default.Send<DataTeachingLoad,
                    DistributionTeachingLoadViewModel>(this);
                break;
            default: break; }
    }
    #endregion INotifyPropertyChanged Members
}
```

Листинг 1. Код класса данных `TeachingLoad` (фрагмент)

```
case "SumLoad":
    Messenger.Default.Send<DataTeachingLoad,
        DistributionTeachingLoadViewModel>(this);
    break;
```

Листинг 2. Код вызова метода `Send` класса `Messenger` (вариант 1)

```
private void RegistrationMessenger()
{
    // Регистрация сообщений об изменении суммарной нагрузки
    Messenger.Default.Register<DataTeachingLoad>(this,
        x => { int count = SetTeachingLoad.ListDistributionLoad.Count;
            if (count > 1)
            {
                // суммарная плановая нагрузка по дисциплине
                double planDiscipline =
                    SetTeachingLoad.ListDistributionLoad[0].SumLoad;
                // плановая нагрузка по дисциплине
                double planLecture =
                    SetTeachingLoad.ListDistributionLoad[0].Lecture;
                double lecture, loadDiscipline = 0;
                // распределенная нагрузка по дисциплине
                for (int i = 1; i < count; i++)
                {
                    // распределенная суммарная нагрузка
                    loadDiscipline +=
                        SetTeachingLoad.ListDistributionLoad[i].SumLoad;
                    // распределенная суммарная нагрузка по отдельным видам
                    lecture +=
                        SetTeachingLoad.ListDistributionLoad[i].Lecture;
                }
                // Проверка превышения плана распределения
                IsFaultLoad = (lecture <= planLecture);
            }
        });
}
```

Листинг 3. Код метода `RegistrationMessenger` класса `Messenger`

```
case "IsFaultLoad": // Ошибка - превышение плана нагрузки
    Messenger.Default.Send<DistributionTeachingLoadViewModel,
        DataTeachingLoad>(this);
    break;
```

Листинг 4. Код вызова метода `Send` класса `Messenger` (вариант 2)

```
Messenger.Default.Register<DistributionTeachingLoadViewModel>(this,
    x => IsFaultLoad = x.IsFaultLoad);
```

Листинг 5. Код вызова метода `Register` класса `Messenger`

данных в части превышения плановых значений (`!this.IsFaultLoad`) и ввода отрицательных чисел (`if(lecture < 0)`) (листинг 6).

В XAML-коде описания колонки "Лекции" для валидации данных в привязке `Binding` необходимо

```

public string this[string name]
{ get {
    string result = null;
    if (name == "Lecture")
    {
        if (!this.IsFaultLoad)
            result = "Превышение плана недопустимо";
        if (lecture < 0)
            result = "Отрицательное значение недопустимо";
    }
    return result;
} }

```

Листинг 6. Код индекатора интерфейса IDataErrorInfo

```

<DataGridTextBoxColumn Header="Лекц."
    ElementStyle="{Binding Mode=OneWay, Source={StaticResource
    GridCell}}"
    Binding="{Binding Path=Lecture, Mode=TwoWay,
    UpdateSourceTrigger=LostFocus, ValidatesOnDataErrors=True}" />

```

Листинг 7. XAML-код описания колонки "Лекции"

Группа	Студ.	Лекц.	Лаб.	Практ.	Конс.	Экз.	Зач.
ПИЭ-331	28	18	54	0	0.9	0	7
ПИЭ-331	28	20	0	0	0.9	0	7
ПИЭ-331	28	0	54	0	0	0	0

Превышение плана недопустимо

Рис. 5. Визуализация ошибки ввода с подсказкой

свойству `ValidatesOnDataErrors` задать значение `True` (листинг 7).

Если в процессе ввода данных вводимое значение будет превышать плановое или будет отрицательным, соответствующая ячейка сетки будет обрамлена красным цветом.

Для улучшения интерфейса целесообразно добавить пояснения при вводе ошибочных данных. Это можно реализовать, сформировав всплывающую подсказку, при наведении курсора на элемент ввода с ошибкой.

В случае ошибки ввода свойству `ToolTip` будет присвоено значение строки, которую сформирует индекатор интерфейса `IDataErrorInfo` (рис. 5).

Предложенный подход к динамической валидации данных был использован при разработке "Программы расчета нагрузки преподавателей университета" (НП-С) [4] и дизайна нечеткой нейронной сети анализа риска проектов. С кодом проекта "Программы расчета нагрузки преподавателей университета" можно ознакомиться на GitHub [5].

## Заключение

В статье предложен универсальный подход к реализации динамической валидации данных в приложениях WPF, который формализован в виде проектного шаблона `DynamicValidation`. Динамическая валидация основывается на использовании механизма передачи сообщений, предоставляемого классом `Messenger`, и применении интерфейса `IDataErrorInfo` в источнике данных, а также свойства `ValidatesOnDataErrors` объекта `Binding` в элементе управления представления.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00285 мол а "Методы и модели нечеткой логики в системах принятия решений управления рисками".*

## Список литературы

1. Долженко А. И. Современные технологии программирования. Разработка приложений на базе WPF и Silverlight: учебник. Ростов н/Д: Рост. гос. экон. ун-т (РИНХ). 2011. 266 с.
2. Нойз В. Проверка ввода: применение в WPF сложных бизнес-правил к вводу данных // MSDN Magazine. 2010. Июнь. URL: <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/ff714593.aspx>.
3. MSDN Library. Data Binding How-to Topics. URL: <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms752039.aspx>.
4. Долженко А. И., Глушенко С. А., Малеев Д. В., Агаркова А. В. Программа расчета нагрузки преподавателей университета (НП-С) — № 2014616215 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М., 24.04.2014.
5. Проект Нагрузка преподавателя. URL: <https://github.com/DolzhenkoAlex/tl03>

A. I. Dolzhenko, Professor, e-mail: [doljenkoalex@gmail.ru](mailto:doljenkoalex@gmail.ru),  
S. A. Glushenko, Senior Researcher, e-mail: [www.555.sergey@mail.ru](mailto:www.555.sergey@mail.ru),  
Rostov State Economic University (RINE), Russia, Rostov-on-Don

## Dynamic Data Validation in WPF Applications

*When you create applications for the Windows platform based on Windows Presentation Foundation occurs task data validation as you type based on business rules, defined by subject area. The purpose of this research is to develop dynamic data validation techniques for business rules, computed in the runtime application with settings and their current values.*

**Keywords:** WPF-application, validation, data entry, business rules, exceptions, `IDataErrorInfo`, `ValidationRule`

### References

1. Dolzhenko A. I. *Sovremennye tehnologii programmirovaniya. Razrabotka prilozhenij na baze WPF i Silverlight: uchebnic*, Rostov n/D: Rostovskij Gos. jekon. un-t RINH, 2011, 266 p. (in Russian).
2. Noyes V. Proverka vvida: Primenenie v WPF slodznih bizness-pravil k vvodu dannich, *MSDN Magazine*, 2010, ijun'. URL: <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/ff714593.aspx/> (in Russian).
3. MSDN Library. *Data Binding How-to Topics*, URL: <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms752039.aspx>.
4. Dolzhenko A. I., Glushenko S. A., Maleev D. V., Agarkova A. V. *Programma pascheta nagruzki prepodavatelei university (NP-S) — № 2014616215, Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM*, Moscow, 24 04 2014 (in Russian).
5. *Project Nagruzka prepodavatelja*. URL: <https://github.com/DolzhenkoAlex/tl03> (in Russian).



# БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ CRYPTOSAFETY INFORMATION

УДК 621.391

**С. В. Дворников**, д-р техн. наук, проф., e-mail: practicdsv@yandex.ru,

**С. С. Дворников**, лаборант, **Р. В. Иванов**, **А. А. Гулидов**,

**А. П. Чихонадских**, канд. тех. наук,

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург

## Защита от структурных помех радиоканалов с частотной манипуляцией

*Рассматриваются вопросы оценки имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией. Представляются результаты, характеризующие вероятность ошибки в зависимости от длительности интервалов совпадения структурной помехи с сигналом. Даются предложения по практическому использованию результатов.*

**Ключевые слова:** частотная модуляция, канал управления, структурные помехи

### Введение

Стремительное развитие робототехнических систем (РТС), в том числе беспилотных летательных аппаратов, стимулирует к поиску решения проблемы обеспечения устойчивого управления данными объектами в условиях их радиоэлектронного подавления (РЭП). В большинстве современных РТС предусмотрен автономный режим работы, однако его применение ограничено, поскольку он рассчитан на критические ситуации при потере управления. Следовательно, основным источником управления РТС является радиоканал, посредством которого осуществляется доведение команд, поэтому от надежности и устойчивости его работы в условиях РЭП во многом зависит эффективность функционирования РТС.

Одно время наметилась тенденция применения широкополосных каналов управления с использованием шумоподных сигналов или режимов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты [1]. Однако это решение является продуктивным только при использовании РТС на малых дальностях и в условиях достаточно "спокойной" радиоэлектронной обстановки. В связи с этим на практике для каналов управления используют сигнальные конструкции, в основе которых лежит частотная модуляция (манипуляция) [2]. Это объясняется бинарным форматом команд, применяемых для управления РТС.

Именно наличие радиоканала делает РТС уязвимыми к воздействию помех. Между тем энергетическое подавление, заключающееся в постановке прицельных или заградительных помех шумового характера большой мощности, легко идентифици-

руется [3]. Это позволяет современным РТС своевременно переходить в автономный режим работы, при котором они выполняют свои задачи по заранее подготовленным программам, поэтому специалисты РЭП считают, что для борьбы с РТС более эффективным является воздействие на каналы управления посредством структурных помех [3]. Структурные помехи позволяют не только нарушить процесс доведения команды, но и в ряде случаев обеспечить перехват управления [4].

К несомненным достоинствам такого рода РЭП следует отнести отсутствие явных признаков подавления [5], что существенно затрудняет своевременное принятие мер помехозащищенности. Поэтому РЭП, заключающееся в постановке структурных помех каналу управления, можно отнести к одному из наиболее опасных видов деструктивного воздействия на РТС.

Применительно к настоящей статье определим постановку структурных помех как процесс имитонавязывания, а способность противостоять имитонавязыванию — как имитостойкость [5].

Проблема имитонавязывания многократно рассматривалась в различных работах [3—7], но затрагиваемая в них тематика в большей степени касалась вопросов обнаружения самого факта РЭП, в то время как настоящая статья направлена на разработку метода компенсации структурных помех.

Между тем применительно к рассматриваемой тематике интерес представляют результаты, полученные в [8]. Несмотря на то что они относятся к способам защиты радиосетей от селективных по частоте искусственных радиопомех, заложенные в них идеи позволяют во многом эффективно ре-

шать вопросы борьбы со структурными помехами в каналах радиосвязи. В аспекте решенных в [8] задач настоящую статью можно рассматривать как продолжение их развития применительно к новому объекту исследования, имеющего свои особенности, обусловленные спецификой применения РТС.

### Предложения по оценке и повышению устойчивости каналов управления к имитонавязыванию

При имитонавязывании формируются помехи, имеющие близкую частотно-временную структуру к командным сигналам для их подмены в канале управления [3, 7]. Причем для команд бинарной структуры имитонавязывание будет состоять в изменении значения демодулированного символа [6].

Следовательно, для сигналов частотной модуляции структурная помеха должна обеспечить для решающего устройства демодулятора условия, при которых принятие решения происходит случайным образом. Очевидно, что этого можно достигнуть, если структура помехи в каждый момент времени будет соответствовать противоположному символу, передаваемому сигналом управления. С позиций РЭП идеальным случаем является ситуация, при которой РТС навязывается требуемая команда, например, на ее самоуничтожение.

С учетом высокой динамики перемещения РТС их приемные тракты реализуют некогерентную обработку двухпозиционных частотно-манипулированных сигналов (ЧМ-2), при которой согласно [9] обеспечивается вероятность битовой ошибки, равная (рис. 1)

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_B}{2N_0}\right) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2}h_0^2\right), \quad (1)$$

где  $E_B$  — энергия, приходящаяся на бит (для сигналов ЧМ-2 — на символ  $E_c$ );  $N_0$  — спектральная плотность мощности шума;  $h_0^2 = \frac{E_B}{N_0} = \frac{E_c}{N_0}$  — от-

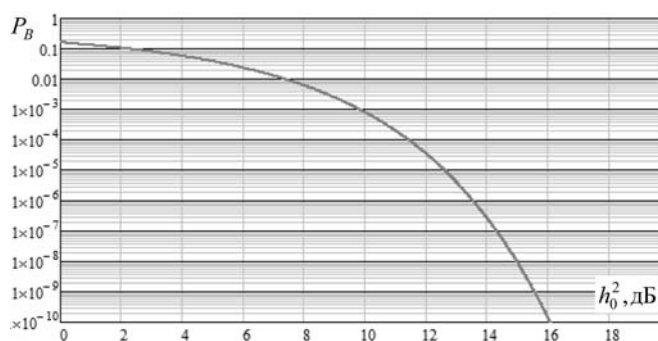


Рис. 1. Зависимость вероятности битовой ошибки при некогерентном приеме сигналов ЧМ-2 от ОСШ

ношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума (ОСШ) (в рассматриваемой ситуации — спектральной плотности мощности структурной помехи).

Анализ известных подходов к имитонавязыванию [3, 7] показал, что проблемой, определяющей эффективность постановки структурных помех, является сложность их тактовой синхронизации с подавляемым сигналом, поскольку высокая динамика перемещения РТС приводит к тому, что для системы РЭП практически невозможно однозначно учитывать разность между дистанциями связи и подавления.

В работе [4] для учета степени тактового рассогласования помехи и сигнала введено понятие коэффициента эффективности имитонавязывания (КЭИ)  $\rho$ , который количественно определяет степень временного несовпадения структурной помехи и подавляемого сигнала на входе демодулятора.

Значение КЭИ лежит в пределах  $\rho \in [0; 1]$ , причем  $\rho = 1$  соответствует условиям эффективного имитонавязывания, при котором на тактовом интервале помехой формируется логический символ, полностью противоположный символу, передаваемому сигналом управления. А  $\rho = 0$  соответствует условиям передачи помехой символа, полностью совпадающего с передаваемым управляющим сигналом. Это условие способствует достоверному приему. Следовательно, чем выше значение  $\rho$ , тем эффективнее имитонавязывание.

На рис. 2 показана геометрическая интерпретация значения коэффициента  $\rho = 0,25$  (для наглядности отображения имитационная помеха, соответствующая символу "1", смещена относительно полезного сигнала по оси ординат). Для условий, представленных на рис. 2, имитационная помеха, соответствующая "1", лишь на длительности четверти такта полезного сигнала "0" будет оказывать деструктивное воздействие. При этом для предыдущего полезного сигнала "1" помеха будет способствовать достоверному приему.

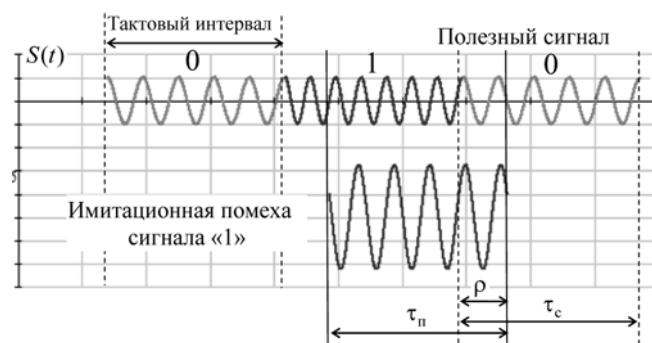


Рис. 2. Графическая интерпретация сущности коэффициента эффективности имитонавязывания

С энергетических позиций для системы РЭП наилучшая ситуация наступит в случае равенства энергии структурной помехи  $E_{\Pi}$  и энергии полезного сигнала  $E_c$  на решающем устройстве, что возможно обеспечить при повышении мощности структурных помех:

$$E_{\Pi} = E_c. \quad (2)$$

Действительно, поскольку некогерентный детектор представляет собой два интегратора, накапливающих энергию, соответствующую информационным символам "0" и "1", то условие неопределенности в принятии решения будет возникать при выполнении следующего равенства:

$$\rho E_{\Pi} = E_c, \quad (3)$$

т. е. энергия помехи должна в  $1/\rho$  раз превышать энергию сигнала.

Согласно (3) деструктивное воздействие на канал управления РТС достигается даже при значении  $\rho < 1$ . Для этого достаточно увеличить мощность помехи. Однако применение пороговых ограничителей на входе демодуляторов сигналов ЧМ-2 не позволяет в полной мере использовать данный эффект. Поэтому в работе [4] обосновано, что система РЭП будет стремиться к решению задач имитонавязывания преимущественно за счет выполнения условия  $\rho = 1$ , при котором согласно (2) наступает полная неопределенность на входе решающего устройства демодулятора РТС. С учетом указанных замечаний выражение (1) можно представить следующим образом:

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_c + (1 - 2\rho)E_{\Pi}}{2N_0}\right). \quad (4)$$

Преобразуем выражение (4) к следующему виду:

$$\begin{aligned} P_B &= \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_c}{2N_0} + \frac{(2\rho - 1)E_{\Pi}}{2N_0}\right) = \\ &= \frac{1}{2} \exp(-0,5 h_0^2 + (\rho - 0,5) h_0^2), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $h_0^2 = \frac{E_{\Pi}}{N_0}$  — отношение энергии помехи к спектральной плотности мощности шума (ОПШ).

Если допустить равенство значений  $h_0^2 = h_0^2$ , которое будет обеспечиваться за счет ограничителя на входе, то формулу (5) можно представить в виде

$$P_B = \frac{1}{2} \exp(-h_0^2 + \rho h_0^2) = \frac{1}{2} \exp(h_0^2(\rho - 1)). \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет оценить влияние шумов на вероятность ошибки.

## Результаты компьютерного моделирования

Значение вероятности битовой ошибки, описываемое выражением (6), было положено в основу компьютерного моделирования. Так, на рис. 3 показана зависимость  $P_B(\rho)$  при значениях ОСШ

$$h_{01}^2 = 0 \text{ дБ}, h_{02}^2 = 10 \text{ дБ}, h_{03}^2 = 13 \text{ дБ}, h_{04}^2 = 16 \text{ дБ}.$$

Анализ полученных результатов указывает на существенную зависимость  $P_B(\rho)$  от КЭИ  $\rho$ , поскольку начиная с ОСШ 16 дБ в радиоканале 10 %-е увеличение коэффициента эффективности имитонавязывания приводит к ухудшению показателя  $P_B$  более чем на порядок.

Результаты, представленные на рис. 3, в полной мере характеризуют только частный случай ( $h_0^2 = h_0^2$ ), описываемый формулой (6). Для общего случая в качестве модели оценки вероятности ошибки в канале с частотной модуляцией в условиях воздействия оптимальных по структуре имитационных помех целесообразно рассматривать выражение (4).

Предлагаемая модель позволяет оценить уровень деструктивного урона, нанесенного в результате имитонавязывания в зависимости от значения тактовой синхронизации помехи и полезного сигнала (совпадения по времени), которое в модели (4) учитывается посредством КЭИ  $\rho$ .

Так, при  $\rho = 1$ , т.е. при  $P_B = 0,5$ , имеем полную неопределенность на решающем устройстве демодулятора в случае выполнения условия (2). А при  $\rho = 0$  в результате суммирования энергии сигнала и помехи происходит повышение достоверности принятия правильного решения. Поскольку анализ результатов, представленных на рис. 3, однозначно указывает на то, что имитонавязывание определяется не только величиной  $\rho$ , но и текущим значением ОСШ и ОПШ, то, чем ниже исходное величина ОСШ, тем выше эффективность деструктивного воздействия, поскольку увеличение шума

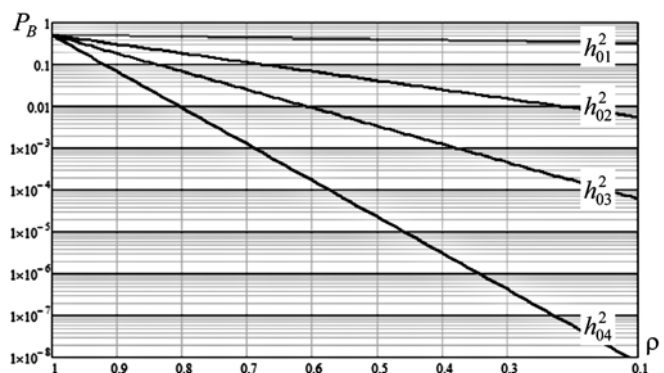


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки при некогерентном приеме сигналов ЧМ-2 от ОСШ

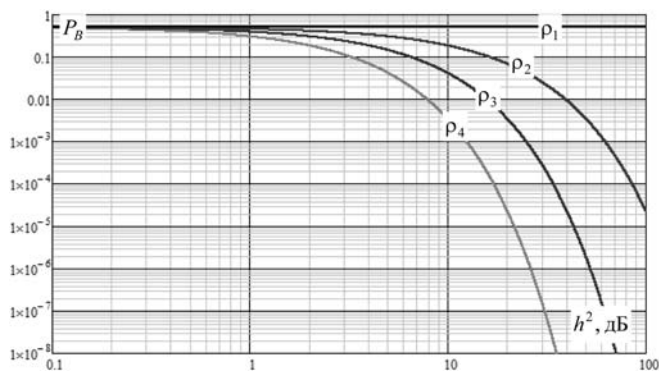


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ при различных значениях КЭИ

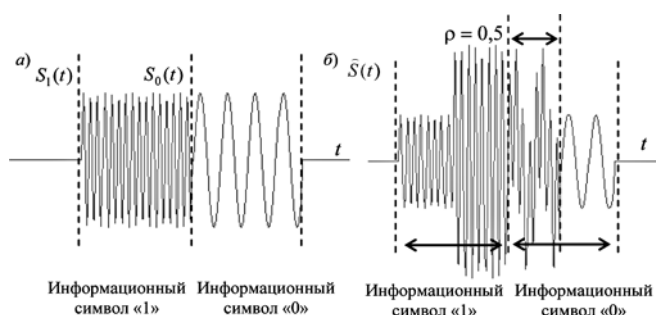


Рис. 5. Сигнал ЧМ-2 на входе демодулятора: а — не пораженный помехой; б — пораженный помехой с  $\rho = 0,5$

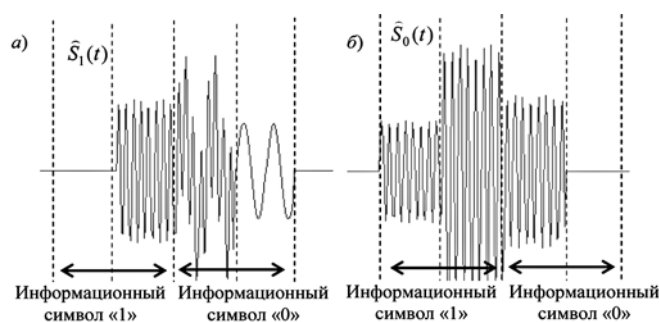


Рис. 6. Восстанавливаемый фрагмент пораженного сигнала: а — при суммировании его с сигналом символа "1"; б — при суммировании его с сигналом символа "0"

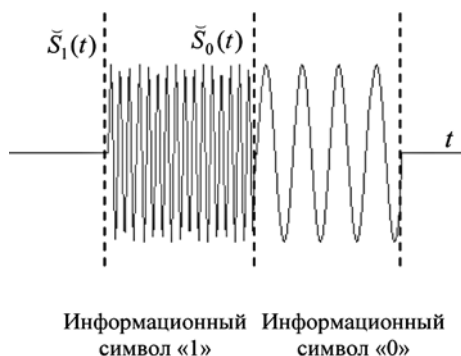


Рис. 7. Результирующий сигнал ЧМ-2 после его восстановления

ведет к снижению вероятности правильного принятия решения даже при отсутствии РЭП.

В подтверждение данного заключения на рис. 4 представлены результаты зависимости вероятности битовой ошибки  $P_B$  от ОСШ при различных значениях  $\rho$ .

В качестве искомым при построении графиков на рис. 4 были определены следующие значения КЭИ:  $\rho_1 = 1$ ;  $\rho_2 = 0,8$ ;  $\rho_3 = 0,5$  и  $\rho_4 = 0$ .

Полученная вероятностная оценка позволяет выработать конструктивные предложения по защите каналов управления от имитонавязывания, базирующиеся на обнаружении самого факта постановки помех, например, с использованием методов, представленных в [10–12].

В [4] выявлено, что при имитонавязывании, когда КЭИ  $\rho < 1$ , результирующий сигнал на длительности тактового совпадения помехи и сигнала представляет собой амплитудно-модулированное колебание.

Так, на рис. 5 показаны результаты воздействия структурной помехой с КЭИ  $\rho = 0,5$ . Действительно, воздействие структурной помехи при несовпадении значения имитационного символа ведет к формированию пораженного сигнала амплитудной модуляции на длительности тактового интервала, определяемого КЭИ. Между тем модуляционный фрагмент пораженного сигнала может выступать признаком имитонавязывания, который может быть выявлен или посредством процедур энергетического обнаружения [11, 12], или же путем распознавания, в частности, согласно способу, предложенному в работе [13]. Такой подход рассмотрен в [4]. Между тем анализ самого процесса имитонавязывания позволяет выработать меры по его компенсации, с учетом теоретической базы, разработанной в [10].

В частности, предлагается следующий метод.

Из пораженного сигнала  $\hat{S}(t)$  вычитают непораженные сигналы  $S_1(t)$  и  $S_0(t)$ , соответствующие символам "1" и "0" на длительности тактового интервала. В результате получают промежуточный сигнал для нулевого и единичного символов  $\tilde{S}_0(t) = \hat{S}(t) - S_0(t)$  и  $\tilde{S}_1(t) = \hat{S}(t) - S_1(t)$ . В качестве непораженных сигналов могут использоваться как синтезированные заранее, так и принятые в условиях отсутствия помех. На рис. 6 показаны промежуточные сигналы  $\tilde{S}_0(t)$  и  $\tilde{S}_1(t)$  для рассматриваемого примера.

И заключительным этапом является вычитание из пораженного сигнала промежуточных сигналов  $\tilde{S}_0(t)$  и  $\tilde{S}_1(t)$  (рис. 7).

Аналитически указанные процедуры можно представить как

$$\tilde{S}_{1,0}(t) = \hat{S}(t) - (\hat{S}(t) - S_{1,0}(t)). \quad (7)$$

Следует отметить, что выражение (7) имеет два исхода. Это полностью восстановленный сигнал (в том случае, если, например, пораженный сигнал соответствовал символу "1" и из него вычитался непораженный сигнал, также соответствующий символу "1"), или же искаженный сигнал (в том случае, если, например, пораженный сигнал соответствовал символу "0" и из него вычитался непораженный сигнал, соответствующий символу "1").

Таким образом, окончательное решение целесообразно принимать по результатам распознавания, используя подходы, например, разработанные в работе [13].

Заметим, что предложенный метод может быть адаптирован для различных условий. Например, обрабатывать не пару принимаемых сигналов, а один пораженный, на длительности символа. В этом случае пораженный символ суммируется с непораженными сигналами, соответствующими символам "1" и "0", и таким же образом вычитается из полученного результата.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что имитонавязывание, как процесс передачи заведомо ложных команд, представляет реальную угрозу для каналов управления РТС. Однако, зная особенности постановки структурных помех, возможно бороться с ними.

Поскольку эффективность имитонавязывания существенно зависит от временного совпадения тактовых интервалов излучения помех и сигналов на входе демодулятора, то целесообразно использовать команды с различными тактовыми интервалами следования командных сигналов. Или же использовать радиоизлучения, формируемые в негармонических базисах [14, 15], что существенно усложнит процедуры синтеза для них структурных помех.

Другой конструктивной мерой, позволяющей избежать имитонавязывания, является установка на входе демодулятора индикатора уровня принимаемого сигнала. При обнаружении факта имитонавязывания реализовываются процедуры разрабатываемого метода или же подходы, предложенные в свое время в работах [8, 10].

Следует отметить, что авторы в настоящей статье не претендуют на получение однозначного ответа все возможные аспекты затронутой проблематики. В представленной работе рассмотрена только возможность подавления радиоканала за счет искажения информационных бинарных символов "1" и "0". За рамками исследования оста-

лись вопросы учета иных способов имитонавязывания (навязывание ложных режимов работы приемному оборудованию, например, на канальном уровне и т.д.), а также восстановления искаженных сигналов в регистрирующих устройствах. Дальнейшие исследования видятся в автоматизации процессов принятия решения, что очень важно для скоростных РТС, в частности беспилотных летательных аппаратов.

### Список литературы

1. **Вольнская А. В., Сапожников И. В.** Моделирование линейного мультипараметрического модема для каналов передачи информации с низким отношением сигнал/помеха // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 8. С. 590—594.
2. **Точилев Л.** Системы управления БЛА. URL: [http://www.ispl.ru/Sistemy\\_upravleniya-BLA.html](http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html), свободный.
3. **Современная радиоэлектронная борьба.** Вопросы методологии / Под ред. В. Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2006. 424 с.
4. **Дворников С. В., Погорелов А. А., Вознюк М. А., Иванов Р. В.** Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией // Информация и космос. 2016. № 1. С. 32—35.
5. **Дворников С. В.** Методика оценки имитостойкости каналов управления роботизированных устройств // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 64—69.
6. **Орошук И. М.** Оценка имитостойкости радиоканала с замираниями при использовании сигналов с частотной манипуляцией // Радиотехника. 2004. № 11. С. 12—18.
7. **Wang Z., Bovik A., Sheikh H., Simoncelli E.** Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity // IEEE Transaction on Image Processing. 2004. Vol. 13, N. 4. P. 600—612.
8. **Орошук И. М.** Способ защиты от искусственных радиопомех (варианты). Патент на изобретение № 2257009(RU); МПК 7 H04B 15/00, 1/10; Пр. 15.05.2003. / Изобретения. Полезные модели: Оф. бюл. Роспатента. М.: Фипс, 20.07.2005. № 20.
9. **Proakis J. G.** Digital Communications, 4-th ed. New York: McGraw -Hill, 2000.
10. **Орошук И. М.** Метод исправления ошибок в радиоканале с частотной манипуляцией при воздействии имитационных помех // Известия высших учебных заведений России. Радиотехника. 2002. № 3.
11. **Дворников С. В.** Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 4. С. 92—97.
12. **Дворников С. В.** Метод обнаружения сигналов диапазона вч на основе двухэтапного алгоритма принятия решения // Научное приборостроение. 2005. Т. 15, № 3. С. 114—119.
13. **Дворников С. В., Степанин Д. В., Дворников А. С., Букарёва А. П.** Формирование векторов признаков сигналов из вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 46—49.
14. **Агиевич С. Н., Дворников С. В., Гусельников А. С.** Описание сигналов в базисах функций сплайн-Вилленкина-Кристенсона // Контроль. Диагностика. 2009. № 3. С. 52—57.
15. **Дворников С. В., Дворников С. С., Спиринов А. М.** Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций // Информационные технологии. 2013. № 12. С. 52—55.

**S. V. Dvornikov**, Professor, e-mail: practicsv@yandex.ru,  
**S. S. Dvornikov**, Assistant, e-mail: dvornikov\_s\_s@mail.ru,  
**R. V. Ivanov, A. A. Gulidov, A. P. Chihonadskih**, Candidate of Engineering Sciences,  
Military Communications Academy named after Marshal SM Budyonny, St. Petersburg

## Protection of Structural Noise Radio Channel Frequency Shift Keying

*The development of robotic systems requires a stable control channels. Robotic systems control channels have to work in conditions of jamming. To control the mobile robot system justified the use of radio. However, radio is the source of interference. The most dangerous are the structural obstacles that could lead to the interception control robotic systems.*

*To combat Jamming use broadband systems and complex signals. But these measures are good for controlling robotic systems at small distances. At large distances FSK signals used in control channels.*

*The process is called staging structural interference simulation imposition. The ability to resist the imposition of imitating simulation called resistance.*

*When simulation imposing form interference that have a structure similar to the structure of the control signals. As a result, there is a demodulator uncertain situation to make a decision.*

*Fast moving robotic systems allow only non-coherent signal processing. Due to the complexity of the software synchronization signal and interference, electronic countermeasures will not always be effective. To assess the effectiveness of jamming is proposed to use a coefficient that takes into account the degree of simulation imposing. The coefficient ranges from zero to one. When the unit comes complete coincidence in time and signal interference. If the signal energy and noise energy have the same values, the demodulator decides randomly.*

*When imposing simulation reconnaissance signs appear in the form of parasitic amplitude modulation. This effect allows you to detect the fact of setting structural interference and take measures against suppression.*

*To combat simulation imposition suggest the following method. Of the affected signal interference sequentially subtract test signals, which correspond to the information symbol "zero" and the information symbol "unit". Then again, the result is subtracted from the affected structural hindrance signal. When the test signal coincides with a signal interference affected reconstructed signal obtained as a result of these operations. If the test signal does not coincide with the staggered structure signal, the signal is not restored after the proposed operations.*

*The findings led to the following conclusions.*

*Imitating the imposition of a real threat for robotic systems, which are controlled by radio.*

*The efficiency depends on imposing simulation time coincidence clock periods and interference signal at the demodulator input.*

*Detect simulation can impose on the emergence of wasps oscillations at the receiver input.*

*The developed method is an effective measure to combat the structural interference.*

*Further research directed at the development of automatic decision-making procedures.*

**Keywords:** frequency modulation, control channel, structural interference

### References

1. **Volynskaya A. V., Sapozhnikov I. V.** Modelling of linear multi-parametric data modem for transmission channels with low signal / noise ratio, *Information Technology*, 2015, vol. 21, no. 8, pp. 590–594 (in Russian).
2. **Tochilov L.** *Control Systems UAV, mode of access*; URL: [http://www.ispl.ru/Sistemy\\_upravleniya-BLA.html](http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html), free (in Russian).
3. **The modern electronic warfare. Methodological issues.** Ed. VG Radzi-ray, Moscow, Radiotekhnika, 2006, 424 p. (in Russian).
4. **Dvornikov S. V., Pogorelov A. A., Voznyuk M. A., Ivanov R. V.** Ocenka imitostojkosti kanalov upravleniya s chastotnoj modulyaciej, *Informaciya i kosmos*, 2016, no. 1, pp. 32–35. (in Russian).
5. **Dvornikov S. V.** Metodika ocenki imitoustojchivosti kanalov upravleniya robotizirovannyh ustrojstv, *Radiopromyshlennost'*, 2016, no. 2, pp. 64–69. (in Russian).
6. **Oroschuk I. M.** Evaluation imitoprotection radio channel fading when using signals with frequency shift keying, *Radiotekhnika*, 2004, no. 11, pp. 12–18. (in Russian).
7. **Wang Z., Bovik A., Sheikh H., Simoncelli E.** Image Quality Assessment: Form Error Visibility to Structural Similarity, *IEEE Transaction on Image Processing*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600–612.
8. **Oroschuk I. M.** Sposob zashchity ot iskusstvennyh radiopomekh (varianty). Patent na izobrenenie. № 2257009 (RU); IPC 7 H04B 15/00, 1/10; Pr. 15.05.2003. *Inventions. Utility Models: of. Bull. Rospatent*, Moscow, Phipps, 20.07.2005, no. 20. (in Russian).
9. **Proakis J. G.** *Digital Communications*, 4-th ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
10. **Oroschuk I. M.** Metod ispravleniya oshibok v radiokanale s chastotnoj manipulyaciej pri vozdeystvii imitacionnyh pomekh, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika*, 2002, no. 3 (in Russian).
11. **Dvornikov S. V.** Metod obnaruzheniya na osnove posimvol'nogo peremnozheniya realizacij spektra nablyudaemogo processa s avtomaticheskim raschetom poroga prinyatiya resheniya, *Nauchnoe priboroostroenie*, 2004, vol. 14, no. 4, pp. 92–97 (in Russian).
12. **Dvornikov S. V.** Metod obnaruzheniya signalov diapazona vch na osnove duvhehtapnogo algoritma prinyatiya resheniya, *Nauchnoe priboroostroenie*, 2005, vol. 15, no. 3, pp. 114–119 (in Russian).
13. **Dvornikov S. V., Stepynin D. V., Dvornikov A. S., Bukareva A. P.** Formirovanie vektorov priznakov signalov iz vejjvlet-koefficientov ih frejmovykh preobrazovanij, *Informacionnye tehnologii*, 2013, no. 5, pp. 46–49. (in Russian).
14. **Agievich S. N., Dvornikov S. V., Gusel'nikov A. S.** Opisanie signalov v bazisah funkcij splajn-Vilenkina-Kristensona, *Kontrol'. Diagnostika*, 2009, no. 3, pp. 52–57. (in Russian).
15. **Dvornikov S. V., Dvornikov S. S., Spirin A. M.** Sintez manipulirovannyh signalov na osnove vejjvlet-funkcij, *Informacionnye tehnologii*, 2013, no. 12, pp. 52–55. (in Russian).

УДК 004.05

**С. М. Авдошин**, канд. техн. наук, проф., руководитель департамента программной инженерии факультета компьютерных наук НИУ ВШЭ, e-mail: savdoshin@hse.ru,  
**Е. Ю. Песоцкая**, доц. факультета компьютерных наук НИУ ВШЭ, e-mail: epesotskaya@hse.ru, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ)

## Интернет вещей: Металлургия

*Рассматривается возможность использования Интернета вещей в металлургии, а также потенциал развития Интернета вещей в России. В рамках исследования проанализированы текущие тренды с изучением отдельных примеров решений в процессах металлургической промышленности. Представлены основные процессы и возможности использования цифровых технологий для основных металлургических процессов, приведены некоторые примеры целесообразности использования Интернета вещей для снижения издержек и получения дополнительной выгоды в сталелитейных процессах, процессах плавки и производства готовой продукции. Предложены рекомендации по применению и использованию Интернета вещей в металлургии. При формировании рекомендаций учтены предпосылки, существующие в развитии цифровых технологий в России и основные мировые тренды, связанные с цифровой трансформацией, мобильными и облачными технологиями.*

**Ключевые слова:** цифровая трансформация, Интернет вещей, автоматизация, облачные технологии, мобильные технологии, мобильные приложения

### Введение

Проникновение цифровых технологий как в бизнес, так и в повседневную жизнь раздвигает привычные границы компаний и даже целых отраслей, расширяя их возможности. Сейчас можно наблюдать, как происходит интеграция предприятий и цифровых платформ, физического и виртуального мира, а также бизнесов самых разных отраслей: телекоммуникационных и страховых компаний, мобильных операторов и банков. Это связано с необходимостью обработки больших объемов данных, расширения каналов передачи данных, эффективной взаимосвязью машин между собой, что создает синергию классической и цифровой экономики. Только так можно оптимизировать процессы, повысить конкурентоспособность и стимулировать рост экономики.

Цифровая трансформация дает компаниям новую возможность собирать, обрабатывать и анализировать большие объемы информации о производственных процессах, поставщиках и клиентах. Это позволяет им более точно предсказывать рыночные изменения и принимать решения более целенаправленно. Производственные процессы выходят на новый уровень автоматизации благодаря прогрессу в цифровых технологиях и искусственному интеллекту. В результате компании смогут разрабатывать и предлагать качественно новые продукты и услуги. Все это меняет саму основу цепочек создания стоимости в промышленности. Традиционно шаткие цепочки превращаются в ди-

намичные сети, а коммуникации и непрерывный обмен информацией между производственными единицами, корпоративными департаментами и внешними поставщиками придают им гибкости.

Одним из воплощений цифровой трансформации бизнеса является Интернет вещей. Термин "Интернет вещей" (Internet of things, IoT) был предложен в 1999 г. Кевином Эштоном [1], который предположил, что возможно связать несколько объектов на производстве для обмена информацией между ними. Тогда же исследователи группы Auto-ID, работающей при Массачусетском технологическом институте, обрисовали руководству Procter & Gamble перспективы широкого внедрения радиоидентификационных меток. Специалисты Cisco Systems считают, что Интернет вещей родился где-то в 2008—2009 гг., когда число подключенных к Сети устройств сравнялось с численностью жителей Земли [2].

В эпоху Интернета вещей главной возможностью для бизнеса становится создание чего-то нового. Идея Интернета вещей подкупает возможностью объединить практически безграничный пул устройств и управлять им, однако в рамках этого подхода до сих пор очень мало средств для интеграции инструментов разработки, визуализации, аналитики и промышленных приложений [3]. Готовых схем не существует, и это говорит о том, что в Интернете вещей заложен огромный потенциал. Именно поэтому ИТ-компании расширяют линейки своих продуктов, предлагая новые платформы для создания решений в области Интернета вещей. Так,

в 2015 г. компания SAP презентовала свою новую платформу SAP HANA Cloud Platform for the Internet of Things, разработанную специально для Интернета вещей. Платформа для Интернета вещей дает все необходимое для сбора информации на основе данных, получаемых от подключенных к Сети людей, устройств и прочих объектов. Это дает возможность интегрировать данные в облако с помощью Интернет-устройств нового поколения и трансформировать бизнес-процессы на новом уровне. Вычисления в памяти позволяют компаниям быстро разрабатывать, внедрять и управлять приложениями для Интернета вещей и межмашинного взаимодействия [4].

Уже сейчас разрабатываемая ИТ-инфраструктура подразумевает не просто автоматизацию процессов на локальном производстве, но и более глобальное понятие, когда не только компьютер или смартфон, но и другие приборы, начиная с кофе-машины в офисе и заканчивая холодильником дома, подключены к Интернету. Потребителям такие технологии делают жизнь комфортнее, в промышленности — это способ экономии ресурсов и оптимизации производства.

Интернет вещей позволяет создавать динамические Сети, состоящие из миллиардов вещей, коммуницирующих между собой. Таким образом, обеспечивается связь между накопленным объемом данных и реальными объектами, для которых приложения, сервисы, сами устройства — это источники данных. В такой среде создаются иные, чем сегодня, условия для бизнеса, охраны здоровья, обеспечения экологической безопасности и всего остального, что окружает человека.

### **Развитие Интернета вещей**

Одно из первых воплощений Интернета вещей — межмашинное взаимодействие (M2M). Это общее название технологий, позволяющих машинам обмениваться информацией друг с другом [5]. Прототипами M2M могут считаться технологии передачи данных, такие как базовые системы телеметрии и отраслевые системы управления. С годами технология M2M получила развитие в направлении дистанционного мониторинга и управления процессами. В последнее время благодаря технологии M2M начали создаваться платформы, позволяющие интегрировать архитектуру построения сетей проводной или беспроводной связи и услуги сотовой и спутниковой связи, в том числе услуги глобальной спутниковой системы определения местоположения.

Существует огромное множество датчиков, сенсоров и меток. Самый известный пример — радиочастотные метки RFID (Radio frequency identification), датчики которых позволяют компьютерам следить как за продукцией по мере ее производства, так и за готовыми товарами на складах. Больше того, можно оптимизировать логистические и производственные цепочки, минимизировать расходы на транспорт и хранение, а также снизить значение

человеческого фактора на всех этапах производства и продажи товаров. "Умные продукты", снабженные RFID-метками или датчиками, обладающие собственным уникальным идентификатором, могут быть в любой момент отслежены, знают свою историю, текущее состояние и могут вовремя сообщить о неполадках в работе.

По прогнозу McKinsey Global Institute [6], к 2025 г. Интернет вещей может приносить мировой экономике от 3,9 до 11,1 трлн долл. ежегодно. По данным Accenture [7], к 2030 г. капиталовложения в промышленный Интернет вещей в США и ожидаемый от него прирост производительности могли бы увеличить совокупный ВВП страны на 6,1 трлн долл. Если бы Соединенные Штаты инвестировали в соответствующие технологии на 50 % больше и улучшили влияющие на эту область факторы (такие как наличие профессиональных навыков, распространение широкополосных сетей и т. п.), то к 2030 г. прирост мог бы достичь 7,1 трлн долл. США, увеличив таким образом ВВП страны на 2,3 % по сравнению с исходными прогнозами.

В свою очередь, Германия могла бы повысить совокупный ВВП на 700 млрд долл. США, или на 1,7 %, к 2030 г., предприняв схожие дополнительные меры. Великобритания могла бы повысить совокупный ВВП на 531 млн долл. США, или на 1,8 %, к 2030 г. по сравнению с исходными прогнозами. Экономические выгоды от промышленного Интернета вещей для Китая ожидаются большими, чем для России, Индии или Бразилии. Благодаря возможным мерам поддержки и развития промышленного Интернета вещей Китай мог бы к 2030 г. повысить свой совокупный ВВП на 1,8 трлн долл. США, увеличив его на 1,3 % по сравнению с исходными прогнозами.

Страны, которые лидируют по потенциалу внедрения промышленного Интернета вещей, — это США, Швейцария, Скандинавские страны и Нидерланды. Испания и Италия вместе с Россией, Индией и Бразилией образуют группу стран, находящихся в самом начале пути.

### **Интернет вещей в металлургии**

Металлургия является ключевой отраслью российской экономики — она дает примерно 4,7 % в ВВП страны, около 12 % промышленного производства [8].

В металлургии есть такие же бизнес-процессы, как и везде, — планирование, взаимодействие с заказчиком, процесс разработки нового продукта, техническое обслуживание установок и машин, а также уникальные процессы, отличающиеся отраслевой спецификой (рис. 1). Например, разработка нового продукта — это целый комплекс исследований и переналадки оборудования. Многие параметры выявляются только экспериментальным путем, поэтому очень важно сохранять все данные о предыдущих технологических рецептурах и пара-



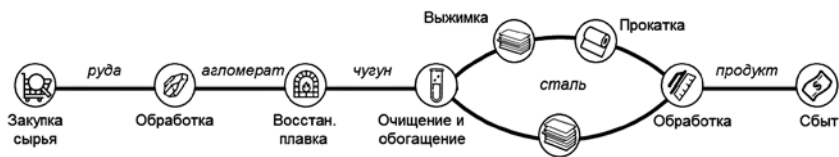


Рис. 1. Основные металлургические процессы

метрах плавки, проката и других процессов для последующего анализа, использования, сравнения.

Сложность и экономические риски заключаются в том, что в крупных производственных компаниях ущерб от останковки производства, случившейся из-за технических проблем, может быть весьма значительным. Компаний металлургической отрасли это касается даже в большей степени, поскольку производственные процессы слишком сложны и их запуск, наладка и остановка требуют много времени. Сбой в работе любого процесса может привести к самым серьезным последствиям. В связи с этим интерес руководства компаний к проблемам, связанным с техническим обслуживанием и ремонтом оборудования (ТОиР) растет, а специалисты инженерных служб все чаще задаются вопросом, что им может дать внедрение систем управления ТОиР. Как может использоваться тот огромный массив данных, на создание которых затрачивается столько усилий? Можно ли на основе этих данных делать прогнозы о работе оборудования, вырабатывать технические и организационные решения, направленные на повышение производительности и надежности устройств? Можно ли предсказать количество брака в итоговой продукции? Как правило, решением всех этих задач может служить облачный сервис Интернета вещей, обеспечивающий удаленный мониторинг за счет подключения к датчикам, сенсорам и устройствам слежения, чтобы оперативно корректировать производственный процесс, оптимизировать узкие места, снижать издержки путем снижения числа дефектов и брака. Интернет вещей включает в себя множество Интернет-совместимых устройств, которое может быть практически безгранично: термометры, электросчетчики, тормозные механизмы, приборы для измерения кровяного давления и почти все остальное, что может контролироваться или измеряться [9].

Значительная оптимизация может быть также достигнута за счет мониторинга состояния производственных мощностей в целях выявления потребностей в обслуживании, прогнозирования поломок, износа деталей или незапланированного простоя.

В металлургии традиционно используется большое число датчиков для сбора разносторонней производственной информации, в частности для определения простоев оборудования. Широко практику получило использование RFID-меток на готовой продукции или заготовках. Сейчас у оборудования высокая степень автоматизации, но взаимодействие устройств в основном происходит с помощью человека. Наибольшей распространен-

ностью пользуется карманный персональный компьютер (PDA). Своевременный контроль оборудования на предмет поломок путем использования RFID, своевременное оповещение о поломке на ранней стадии, рациональное использование персонала, оптимизированные маршруты обходов могут значительно снизить время простоя оборудования и добиться существенной экономии (рис. 2, см. третью сторону обложки).

Особый интерес представляют процессы, связанные с технологией и производством, — например, процесс разлива стали или другого металла, когда из плавильных печей сталь сливается в ковш и затем разливается в чугунные формы для изготовления слитков или специальные кристаллизаторы. Уже на данном этапе специалистам хочется понимать узкие места, возможности возникновения брака и пути его отслеживания и предотвращения на раннем этапе, находить способы повышения качества литых заготовок и получения высококачественных слитков.

Что касается технологических операций прокатного производства, таких как подготовка исходного металла, нагрев, прокатка и отделка проката, большое внимание уделяется раннему определению и удалению различных поверхностных дефектов: трещин, царапин, закатов. Визуально эти дефекты бывает достаточно сложно определить, поэтому большие надежды возлагаются на Интернет вещей, который подскажет специалистам узкие места и позволит повысить, таким образом, качество конечного продукта. Такой эффект обеспечивается за счет большого числа сенсоров, контроллеров и передатчиков, позволяющих обеспечить экономически оправданный процесс сбора всевозможных данных для дальнейшей обработки, контроля качества.

При нагреве слитков и заготовок для получения высокой пластичности и требуемой структуры Интернет вещей может обеспечить строгое соблюдение режимов нагрева. Основное требование при нагреве — равномерный прогрев слитка или заготовки по сечению и длине до соответствующей температуры за минимальное время с наименьшей потерей металла в окалину<sup>1</sup> и экономным расходом топлива. Помимо нагрева, существенное значение имеет режим охлаждения. Быстрое и неравномерное охлаждение приводит к образованию трещин и короблению. Появление мощных аналитических инструментов, позволяющих оперировать накопленными данными в режиме, близком к реальному времени, делает возможным контроль температуры начала и конца процесса, режима обжатия, настройки валков в результате наблюдения за размерами и формой проката.

<sup>1</sup> Окалина — это смесь оксидов, образующихся прямым действием кислорода при накаливании на воздухе металлов.

Так, взаимодействие датчиков доменной печи может снизить потребление ресурсов до 15 %. Датчик 1 (рис. 3, см. третью сторону обложки) обрабатывает показатели домны и оптимизирует подачу шихты. При снижении температуры датчик 2 увеличивает подачу газа и командует датчику 1 снизить подачу шихты. Для увеличения интенсивности горения датчик 2 командует датчику 3 повысить подачу воздуха.

Трещины горячие и холодные — разрывы в теле отливки, образуются при заливке чрезмерно перегретым металлом, неправильной конструкции отливок и охлаждения металла. Мониторинг в режиме реального времени, часто с использованием облачных сервисов, заключается в отображении телеметрии от датчиков на экране компьютера или мобильного приложения в виде специальных графиков температуры и нагрева/охлаждения, сравнивая текущие значения с целевыми или историческими данными.

Для контроля состояния поверхности проката регулярно отбираются пробы. Существует несколько методов обнаружения дефектов. Наружные дефекты отливок обнаруживаются при внешнем осмотре после извлечения отливки из формы или после очистки. Внутренние дефекты определяются с помощью радиографических или ультразвуковых методов дефектоскопии. Трещины выявляются при люминесцентном контроле, магнитной или цветной дефектоскопии. Для таких сложных операций требуется целая сеть сенсоров давления, расположенная на формах отлива. Анализируя показатели сенсоров давления, можно в онлайн-режиме предсказывать и выявлять дефекты, получать данные о ложных срабатываниях. Информация о дефекте передается в режиме реального времени специальной службе, что позволяет практически мгновенно обнаруживать дефект и устранять его без потери качества конечной продукции (рис. 4, см. третью сторону обложки). По данным датчика 2 датчик 1 регулирует подачу металла в кристаллизатор. При возникновении неполадок работники получают уведомление и предотвращают брак.

Также нужно отметить, что в металлургии возможны производственные травмы. Это обусловлено тем, что металлургические процессы связаны с негативными факторами, влияющими на здоровье работников: высокие температуры, вибрации, шум. Взаимодействие устройств, следящих за здоровьем работников, сокращает число несчастных случаев до 90 %. Браслеты измеряют параметры здоровья работников и отправляют сигнал в диспетчерский центр при критических значениях, после чего сотруднику могут оказать первую помощь и оперативно заменить его на рабочем месте (рис. 5).

Новые возможности, связанные с Интернетом вещей, которые открываются отраслевым и промышленным компаниям, на первый взгляд кажутся крайне перспективными, однако зачастую успех их использования зависит от выбора инструментов, решений и платформ, неправильный выбор которых может существенно ограничить ожидаемый эф-



Рис. 5. Взаимодействие устройств мониторинга состояния здоровья

фект. Нужно понимать, что на металлургических предприятиях существует множество автоматизированных систем управления (АСУ), которые потребуют обновления для технологии Интернет вещей, что само по себе представляет достаточно дорогостоящий и болезненный процесс. Эффект, который будет достигнут за счет оптимизации производства, может иметь достаточно долгосрочную перспективу.

Другая наиболее распространенная проблема — это ограничение платформы облачных технологий, необходимых для поддержки Интернет вещей. Ограничение заключается в том, что облачные технологии не всегда могут справиться с масштабным потоком данных реального времени, генерируемого приложениями Интернет вещей, и анализировать происходящие события. Число подключенных к Сети устройств с каждым днем становится все больше, это значит, что подходы к передаче и обработке данных, их хранению должны постоянно дорабатываться и обновляться. При этом сами устройства требуют простоты инвентаризации, обновления, мониторинга и обслуживания. Какие же требования предъявляются к платформам для Интернет вещей сегодня?

### Платформы, решения и сервисы для Интернет вещей

Как правило, любая платформа обеспечивает механизм доставки и управления данными в рамках заданных бизнес-процессов и позволяет бизнес-решениям мгновенно срабатывать на основе сложных математических и статистических правил, применяемых к потоку данных от устройства. Облачная платформа упрощает управление устройствами и данными. Она соединяет распределенные устройства и корпоративные бизнес-приложения, используя безопасные, открытые и надежные протоколы с поддержкой услуг [10].

**Масштабируемость.** Объемы собираемых и передаваемых данных растут в геометрической прогрессии, и уже сейчас многие предприятия сталки-

ваются с тем, что их приложения не рассчитаны на столь большие объемы данных. Нередко можно услышать, что анализ данных составляет два-три дня и эта проблема не решается заменой серверов, так как решение не было спроектировано с учетом использования многопоточности и т.д. Для платформы Интернета вещей, которая базируется в облаке, должна существовать возможность масштабирования емкости, в том числе добавлять по запросу пользователей серверную емкость для поддержки подключенных устройств: от нескольких датчиков до миллионов одновременно подключенных сенсоров и машин. Независимо от масштабов подключенных устройств и передаваемых данных платформа должна обеспечивать постоянную доступность.

**Безопасность.** Следует уделять особое внимание вопросам IoT-безопасности и защищенности данных на всех этапах работы с устройствами Интернета вещей — их аутентификации, идентификации соединения и организации обмена данными. С увеличением количества данных в Интернете вещей существенно увеличивается важность информационной безопасности как для Сети и облака, так и для точек доступа с IoT-устройств, которые должны в обязательном порядке подтверждать операции посредством уникальной комбинации идентификатора, заданного конкретным заказчиком, и аутентификации с помощью токена и отслеживать несанкционированную передачу и обмен данными между устройствами. Должный уровень безопасности должен быть реализован на всех участках IoT-сети: от источника информации — сенсора, концентратора, который собирает данные с сенсоров и проводит преданализику, чтобы минимизировать трафик между сенсорами и облаком, и до самой облачной инфраструктуры.

**Стандартизация.** На рынке Интернета вещей в данный момент наблюдается очевидная конкуренция стандартов. Вопросы стандартизации встают крайне остро при разработке любой экосистемы, включающей множество заинтересованных сторон, которые понимают, что в одиночку одерживать победу на рынке становится все сложнее [11]. Проблема отсутствия единых стандартов сбора, передачи и обработки огромных объемов информации, генерируемой IoT-системами, а также проблема совместимости IoT-устройств и приложений могут нарушить баланс экосистемы, состоящей из взаимовыгодных партнерств и предполагающей открытость и взаимодействие. Отсюда возникают открытые консорциумы по стандартизации, например Open Interconnect Consortium (<https://openinterconnect.org/>).

Для обеспечения непрерывности функционирования IoT-платформа предприятия должна поддерживать все наиболее распространенные форматы данных и предлагать API для остальных. После того как информация получена системой, данные можно представлять в любом виде, а также передавать в уже стандартных форматах, например, на серверы приложений для дальнейшего использования [12].

На рынке платформенных решений традиционно происходит противостояние основных игроков рынка, что не мешает развитию более мелких систем и приложений.

Одним из лидеров рынка технологий в области Интернета вещей принято считать Microsoft и их набор инструментов Azure IoT Suites (<https://azure.microsoft.com>), который является частью предварительно сконфигурированных IoT-решений компании, построенных на базе Azure. Широкий набор протоколов, который поддерживает Azure, и набор IoT-сервисов из Azure IoT Suites позволяют быстро создавать приложения для Интернета вещей. IoT-сервисы дают разработчику возможность собирать данные с устройств, анализировать потоки информации в реальном времени, хранить большие наборы данных и работать с ними, проводить анализ и визуализацию как данных в реальном времени, так и исторических сведений.

IBM выпустила в декабре 2015 г. (одновременно с открытием новой штаб-квартиры в г. Мюнхене) свою IoT-платформу под названием Watson Internet of Things Platform (<https://www.ibm.com/internet-of-things>). Также для работы с устройствами Интернета вещей IBM запустила управляемый облачный сервис IoT Foundation, размещаемый в облаке Bluemix (основанная на открытых стандартах облачная платформа PaaS).

SAP предлагает комплексный портфель решений для Интернета вещей (IoT), их платформу *in-memory*, которая помогает управлять вашими приложениями для Интернета вещей и межмашинного взаимодействия, действующими в режиме реального времени, а также быстро разрабатывать и внедрять такие приложения. Решения SAP Predictive Maintenance and Service, SAP Connected Logistics и SAP Manufacturing Execution (<https://go.sap.com/solution/internet-of-things.html>) предусматривают использование облачной платформы SAP HANA Cloud Platform для прогнозной аналитики и обработки сложных событий на единой платформе. Решение должно способствовать оптимальному использованию бизнес-данных, технической информации и неструктурированных данных из различных источников, а также внедрению повышающих производительность инноваций. Решение поможет анализировать архивные данные и информацию с датчиков для прогнозирования и предотвращения неисправностей и связанных с ними расходов.

Стоит отметить, что тема Интернета вещей стала настолько популярна, что многие компании участвуют в разработке собственных интеллектуальных платформ. Так, например, Nokia выпустила защищенную платформу IMPACT, которая предусматривает сбор данных, обработку событий, управление устройствами, обработку данных, аналитику, сквозную защиту и реализацию приложений для любых устройств, протоколов и приложений, а также дает операторам, предприятиям и госструктурам возможность масштабировать новые сервисы Интернета вещей.

## Заключение

В эпоху стремительного развития цифровых технологий термин "Интернет вещей" уже не является чем-то новым и скорее стал всеобщим трендом. Многие отрасли видят способы повышения эффективности производства и оказания услуг за счет объединения множества устройств, их новых коммуникационных и вычислительных возможностей. Умные сенсоры, коммуникация и передача данных между машинами, аналитика в режиме реального времени, датчики для контроля заданных параметров — это то, к чему уже сейчас стремятся крупные промышленные компании. Сегодня вопрос стоит в определении новых стандартов совместимости и безопасности данных для обеспечения нового уровня обмена данными между компаниями, а также стандартов производительности, новых возможностей экономии и получения прибыли. Конечно, все это, несомненно, потребует изменения существующей ИТ-архитектуры, внедрения новых технологий. Что касается металлургии, стоит отметить, что эта отрасль является базовой для российской экономики, что делает Интернет вещей для предприятий металлургической промышленности крайне востребованным. Однако стоит отметить, что при большом разнообразии решений и возможностей для внедрения новых технологий предприятия еще не до конца научились извлекать пользу из подобных средств Интернета вещей. Это говорит об огромном потенциале, который существует для промышленных компаний, и существенных возможностях для оптимизации работы, прогнозирования и увеличения производительности.

### Список литературы

1. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A Literature [Electronic resource] // Review. Journal of Computer and Communications, 2015, N. 3. P. 164–173. URL: [http://file.scirp.org/pdf/JCC\\_2015052516013923.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JCC_2015052516013923.pdf) (accessed: 02.09.2016).

2. Evans D. The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything // Cisco Corporation, 2011 [Official website] URL: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf) (accessed: 10.09.2016).

3. Кулиничев И. Облако для Интернета вещей // Открытые системы СУБД 2015 № 02 [Официальный сайт]. URL: <http://www.osp.ru/os/2015/02/13046277/> (дата обращения: 12.09.2016).

4. Реальное время Интернета вещей // SAP [Официальный сайт] URL: <http://sapplanet.ru/journals/sap-planet/2015/2/realnoe-vremya-interneta-veshchej.html> (дата обращения: 12.09.2016).

5. Mehmood Y., Gurg C., Muehleisen M., Timm-Giel A. Mobile M2M communication architectures, upcoming challenges, applications, and future directions // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015 [Official website]. URL: <http://jwcn.eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-015-0479-y> (accessed: 20.09.2016).

6. Manyika J., Chui M., Bisson P., Woetzel J., Dobbs R., Bughin J., Aharon D. The Internet Of Things: Mapping The Value Beyond The Hype [Electronic resource] // McKinsey Global Institute, 2015 [Official website]. URL: <http://www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world> (accessed: 04.09.2016).

7. Daugherty P., Berthon B. Winning with the Industrial Internet of Things // Accenture, 2015 [Official website]. URL: [https://www.accenture.com/ng-en/~media/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital\\_1/Accenture-Industrial-Internet-of-Things-Positioning-Paper-Report-2015.pdf](https://www.accenture.com/ng-en/~media/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital_1/Accenture-Industrial-Internet-of-Things-Positioning-Paper-Report-2015.pdf) (accessed: 20.09.2016).

8. Прогноз социально-экономического развития российской федерации на 2016 год и на плановый период 2017 и 2018 годов // Минэкономразвития России [Официальный сайт]. URL: <http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e/1.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e> (дата обращения: 14.09.2016).

9. Семенов А. Интернет Вещей: практически везде // Ежедневник IT Weekly. 2014, № 44–45. С. 44–45 [Официальный сайт]. URL: <http://www.it-weekly.ru/download/pdf/itweekly/98/44-45.pdf> (дата обращения: 20.09.2016).

10. Жирков А. Интернет вещей и облачные технологии Eurotech // Современные технологии автоматизации. 2015, № 2 [Официальный сайт]. URL: <http://www.cta.ru/cms/f/460221.pdf> (дата обращения: 24.09.2016).

11. Авдошин С. М., Песоцкая Е. У. Экосистемы программного обеспечения: инновации в ИТ // Информационные технологии. 2014. № 8 (216). С. 64–69.

12. Васильева Е. Круглый стол, промышленный Интернет вещей // Рациональное Управление Предприятием. 2015. № 4 [Официальный сайт]. URL: [http://www.remmag.ru/upload\\_data/files/2015-04/RT.pdf](http://www.remmag.ru/upload_data/files/2015-04/RT.pdf) (дата обращения: 20.09.2016).

S. M. Avdoshin, PhD, Professor, Head of Software Engineering School,  
Faculty of Computer Science, HSE, e-mail: savdoshin@hse.ru,

E. Yu. Pesotskaya, Docent, Faculty of Computer Science, HSE, e-mail: epesotskaya@hse.ru  
National Research University Higher School of Economics (HSE)

## Internet of Things: Metallurgy

*The paper describes the possibility of using the Internet of Things in metallurgy as well as potential of using internet of things in Russia. The research objective is to identify the possibilities of using Internet of Things in the metallurgy process and to give the examples for getting economy and cost reduction in industry. The author provides recommendations of using internet of things technology in metallurgy, taking into considerations existing aspects and current worldwide trends of global transformation, digitalization and cloud technologies.*

**Keywords:** digital transformation, internet of things, automation, cloud technologies, mobile applications

## References

1. **Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S.** Internet of Things (IoT): A Literature, *Review. Journal of Computer and Communications*, 2015, no. 3, pp. 164–173. URL: [http://file.scirp.org/pdf/JCC\\_2015052516013923.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JCC_2015052516013923.pdf) (accessed: 02.09.2016).
2. **Evans D.** The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything, *Cisco Corporation*, 2011 [Official website]. URL: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf) (accessed: 10.09.2016).
3. **Kulínichev I.** Oblako dlya Interneta veshey, *Otkrytie Sistemy*, 2015, no. 02. [Official website]. URL: <http://www.osp.ru/os/2015/02/13046277/> (accessed: 12.09.2016) (in Russian).
4. **Realnoe** vremya Interneta veshey, *SAP* [Official website] URL: <http://sapplanet.ru/journals/sap-planet/2015/2/realnoe-vremya-interneta-veshchej.html> (accessed: 12.09.2016) (in Russian).
5. **Mehmood Y., Gurg C., Muehleisen M., Timm-Giel A.** Mobile M2M communication architectures, upcoming challenges, applications, and future directions, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015 [Official website]. URL: <http://jwcn.eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-015-0479-y> (accessed: 20.09.2016).
6. **Manyika J., Chui M., Bisson P., Woetzel J., Dobbs R., Bughin J., Aharon D.** The Internet Of Things: Mapping The Value Beyond The Hype [Electronic resource], *McKinsey Global Institute*, 2015 [Official website]. URL: <http://www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world> (accessed: 04.09.2016).
7. **Daugherty P., Berthon B.** Winning with the Industrial Internet of Things, *Accenture*, 2015 [Official website]. URL: [https://www.accenture.com/ng-en/~media/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital\\_1/Accenture-Industrial-Internet-of-Things-Positioning-Paper-Report-2015.pdf](https://www.accenture.com/ng-en/~media/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Digital_1/Accenture-Industrial-Internet-of-Things-Positioning-Paper-Report-2015.pdf) (accessed: 20.09.2016).
8. **Prognoz** sozialno-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federazii na 2016 god I na planoviy period 2017 I 2018 godov [Electronic resource], *Minekonomrazvitiya Rossii* [Official website]. URL: <http://economy.gov.ru/wps/wcm/connect/fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e/1.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=fb93efc7-d9ad-4f63-8d51-f0958ae58d3e> (accessed: 14.09.2016) (in Russian).
9. **Semenov A.** Internet veshey: prakticheski vezde, *IT Weekly*, 2014, no. 44–45, pp. 44–45 [Official website]. URL: <http://www.it-weekly.ru/download/pdf/itweekly/98/44-45.pdf> (accessed: 20.09.2016) (in Russian).
10. **Zhirkov A.** Internet veshey I oblachnye tehnologii Eurotech, *Sovremennye tehnologii avtomatizatsii*, 2015, no. 2 [Official website]. URL: <http://www.cta.ru/cms/f/460221.pdf> (accessed: 24.09.2016) (in Russian).
11. **Avdoshin S. M., Pesotslaya E. Y.** Ecosistemy programmno obecpecheniya: innovazii v IT, *Informazionnye tehnologii*, 2014, no. 8 (216), pp. 64–69. (in Russian).
12. **Vasilyeva E.** Krugliy stol, promyshlenniy Internet veshey, *Razionalnoe upravlenie predpriyatiem*, 2015, no. 4 [Official website]. URL: [http://www.remmag.ru/upload\\_data/files/2015-04/RT.pdf](http://www.remmag.ru/upload_data/files/2015-04/RT.pdf) (accessed: 20.09.2016) (in Russian).

УДК 004.042:504.058: 519.688

**А. Ю. Владова**, д-р техн. наук, нач. отдела программно-аналитического обеспечения, e-mail: [VladovaA.Y.@niitnn.tra](mailto:VladovaA.Y.@niitnn.tra),  
ООО "НИИ Транснефть", г. Москва

## Алгоритмическое обеспечение информационной системы геотехнического мониторинга транспорта углеводородов в условиях многолетней мерзлоты

*Рассмотрены задачи анализа диагностической информации, принятия решения о состоянии геокриологических условий трассы магистрального нефтепровода и разработки информационной системы геотехнического мониторинга. Снижение размерности задачи анализа и прогнозирования температур грунтов трассы транспортирующих объектов предложено проводить группировкой термоскважин по ряду признаков. Предлагаемый метод кластерного анализа температурных измерений включает формирование многомерных данных, кластеризацию термоскважин, нормализацию температурных измерений, построение и анализ моделей изменения температур в каждом кластере. Метод отличается от известных тем, что термоскважины объединяют в группы на основе слабо изменяющихся во времени характеристик, а модели изменения температуры грунтов строят внутри кластеров по данным разновременных измерений.*

**Ключевые слова:** информационная система, термометрический профиль, температурный режим, геотехнический мониторинг, кластерный анализ, температурный градиент

### Введение

Повышение эффективности транспорта углеводородов в сложных условиях многолетней мерзлоты достигается внедрением системы геотехнического мониторинга трассы. Особое внимание в этой системе уделяют вопросу изменения температурного режима грунтов, вызванного растепляющим действием перекачиваемого продукта и провоцирующего изменение планово-высотного положения транспортирующих объектов (ТО). Измерения температур грунтов осуществляют регулярным сбором показаний датчиков, установленных в термометри-

ческие скважины. Число термометрических скважин ТО, проходящего в геокриологических условиях, достигает 4,5 тыс. шт. на 500 км трассы. Термометрические скважины (ТС) располагают в местах развития экзогенных процессов, у опор ТО, в местах переходов из надземной в подземную прокладку и оборудуют термометрическими косами, состоящими из 12...15 датчиков. Поскольку с увеличением наработки ТО растет число экзогенных процессов и возникает необходимость дополнительного обустройства термоскважин, накапливается большой объем информации, который сложно проанализировать существующими инженерными методами.

Снижение размерности задачи анализа и прогнозирования температур грунтов трассы ТО предложено проводить группировкой термоскважин по ряду признаков.

### Обзор публикаций

Как известно, численные алгоритмы решения задач теплопроводности в основном базируются на различных модификациях метода конечных элементов и методов конечных разностей [1, 2]. Применение этих методов на мелкомасштабном сеточном разбиении для пространственно протяженных объектов приводит к большим временным затратам и необходимости усложнения алгоритмов за счет параллелизации вычислений.

Вопросы оценки термического влияния нефтепровода на многолетнемерзлые грунты рассмотрены в статьях [3, 4]. Вопросам построения замкнутой геотехнической системы посвящены статьи [5–7]. Способы установки термокос, методы съема и преобразования данных датчиков подробно освещены в нормативных документах, например [8]. Однако методы принятия решений об изменении температурного режима трассы требуют дальнейшего развития и совершенствования.

Вопросам разработки и использования методов прогнозирования временных рядов посвящены публикации [9].

Анализ развития и применения методов кластеризации проведен в работах [10, 11]. В работе [12] представлены подходы к применению методов кластеризации при анализе процессов коррозии подземных трубопроводов.

Задаче выбора оптимального подмножества признаков посвящена работа [13].

### Организация информационной системы геотехнического мониторинга

На участках трассы ТО, требующих регулярного контроля фактической температуры грунтов (наличие многолетнемерзлых грунтов (ММГ), развитие опасных геокриологических процессов в местах наибольшей прогнозируемой осадки грунта, после реконструкции участка вследствие просадки с нанесением тепловой изоляции, с монтажом подвесных

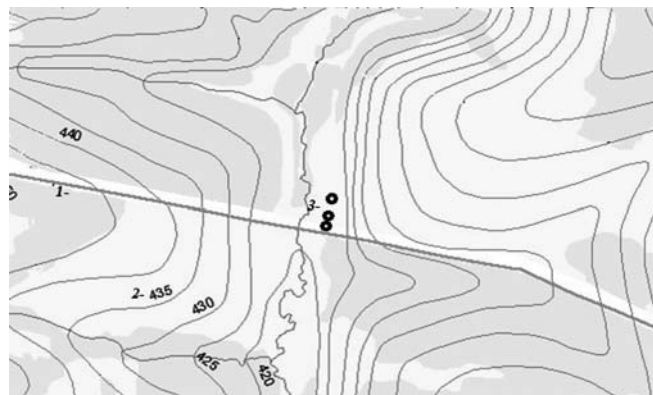


Рис. 1. Обустройство термометрического профиля: 1 — ось трубопровода; 2 — отметка высоты; 3 — термометрические скважины (ТС-1, ТС-2, ТС-3)

опор и др.), обустраивают термометрические профили. Рассматриваемые термометрические профили состоят из трех ТС, расположенных на линии, перпендикулярной оси ТО (рис. 1), со следующим размещением от боковой образующей трубы: ТС-1 глубиной 15 м на расстоянии от 1 до 2 м; ТС-2 глубиной 10 м на расстоянии до 4,0 м; контрольная ТС-3 глубиной 10 м на расстоянии до 10,7 м.

Сбор показаний датчиков термокос, установленных в термоскважины, осуществляют еже seasonно с последующей загрузкой и анализом в информационной системе. В табл. 1 приведены изменения температур по глубине трех ТС термометрического профиля, расположенного на 1704 км дистанции ТО, полученные в дневное время в феврале и сентябре 2015 г.

Разница температур приповерхностного грунта контрольной термоскважины ТС-3 по сравнению с ТС-1 и ТС-2 говорит об аномальности окружающих условий, не связанных с ТО. Предварительный анализ данных, представленный табл. 2, показал рост среднегодовых температур, зафиксированных термометрическими профилями, расположенными на 1704 и 1713 км дистанции ТО в интервале [0,0; 1,5] °С на исследуемом термометрическом профиле. В то же время согласно показаниям контрольной ТС-3, устойчивого положительного изменения температурного поля грунтов на расстоянии 8 м от трубы не зафиксировано.

Таблица 1

Фрагмент первичных измерений температур

Месяц	№ ТС	Глубина расположения датчиков, м								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Февраль	ТС-1, °С	-18,94	-17,13	-13,30	-8,19	-3,96	-1,96	-1,59	-1,32	-1,49
Февраль	ТС-2, °С	-19,29	-17,35	-13,13	-8,23	-5,06	-2,92	-1,89	-1,62	-1,58
Февраль	ТС-3, °С	-8,58	-2,47	-0,47	-0,71	-0,92	-0,95	-1,17	-1,39	-1,39
Сентябрь	ТС-1, °С	1,87	-0,01	0,12	-0,62	-0,98	-1,27	-1,59	-1,52	-1,81
Сентябрь	ТС-2, °С	1,58	-0,04	-0,35	-1,04	-1,50	-1,65	-1,77	-1,81	-1,97
Сентябрь	ТС-3, °С	4,50	3,04	0,03	-0,83	-1,17	-1,21	-1,43	-1,58	-1,58

Предварительный анализ изменений среднегодовых температур в 2014–2015 гг.

Дистанция, км	№ ТС	Глубина расположения датчиков, м								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
1704	ТС-1, °С	0,71	-1,72	-0,62	0,00	-0,42	-1,01	-1,18	-1,21	-0,88
	ТС-2, °С	0,04	-2,21	-1,27	-0,62	-0,64	-0,69	-0,67	-0,59	-0,40
	ТС-3, °С	1,49	0,62	0,21	0,28	0,32	0,28	0,27	0,29	0,22
1713	ТС-1, °С	0,35	-2,04	-1,53	-1,14	-0,72	-0,86	-0,63	-0,42	-0,33
	ТС-2, °С	-0,64	-1,25	-0,31	-0,27	-0,30	-0,35	-0,36	-0,34	-0,32
	ТС-3, °С	1,09	-1,19	-1,61	-1,12	-0,95	-0,74	-0,50	-0,23	-0,17

Амплитуда изменения среднегодовых температур в 2014–2015 гг. термометрического профиля, расположенного на 1698 км трассы ВСТО-1, приведена на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки). Анализ отчетов показывает, что часть экспертов считает, что с ростом наработки ТО происходит изменение температурного режима грунта, не связанное с климатическими условиями. По мнению других, изменение температурного режима в разных районах имеет различный тренд или вообще не идет однонаправленно.

### Метод кластерного анализа изменения температур

Для снижения размерности задачи разумно сгруппировать термоскважины, расположенные на участках с однородными физико-географическими и геокриологическими условиями, с помощью методов кластерного анализа. Кластерный анализ изучает однородность сложных, неочевидно связанных объектов по совокупности признаков [14]. Однородными считают объекты, наблюдаемые признаки которых находятся в непосредственной близости друг от друга. Норму близости, называемую метрикой расстояния, выбирают экспертным образом. На рис. 3 представлены четыре этапа метода кластерного анализа изменения температурного режима, включающие формирование многомерных данных, кластеризацию термоскважин, нормализацию температурных измерений, построение и анализ моделей изменения температур в каждом кластере.

На первом этапе метода основное внимание уделено выбору слабо изменяющихся во времени признаков, таким как экспозиция склона и состав грунта в месте расположения, высота устья, глубина ТС. Эти признаки определяют исходное состояние грунта до пуска продукта. После пуска продукта на температуру грунтов будет оказывать влияние дальность расположения термоскважины от боковой образующей трубы и кривая изменения температур по трассе трубопровода, определяемая расположением пунктов подогрева нефти. Экспозиция склона характеризует пространственную ориентацию склона по отношению к сторонам света и солнечному освещению. В зависимости от экспозиции склона существенно различны условия его увлажненности, что влияет на ход склоновых процессов.

Например, на южных склонах в области развития мерзлоты происходит таяние мерзлоты и активизируются солифлюкция и оползни. Векторы значений, определенных для перечисленных признаков ТС, образуют многомерные массивы данных. Некоторые значения выбранных признаков приведены в табл. 3.

Для выполнения второго этапа алгоритм работы итеративного метода кластеризации [15] дополнен



Рис. 3. Этапы метода кластерного анализа температурных измерений

Таблица 3

Фрагмент значений признаков кластеризации

№ ТС	Дистанция, км	Высота устья ТС, м	Азимут экспозиции склона, °	Дальность ТС от трубы, м
ТС10-3	3634	30,87	40	8,5
ТС30-3	3656	29,12	200	10,2
ТС57-2	3758	31,33	235	4,0
ТС68-1	3787	30,01	36	2,0

```

input: (1) массивы признаков термоскважин; (2) количество
элементов массивов
output: (3) массив центров кластеров; (4) набор
кластеризованных термоскважин
INITIALIZE clustering // запуск процедуры кластеризации
OPEN files
READ input
DEFINE number of clusters // определение количества
кластеров
LOOP until done //повтор, пока наборы элементов кластеров
меняются
COMPUTE mean of each cluster //вычисление центров тяжести
кластеров
UPDATE clustering based on new means // перегруппировка
данных согласно новым центрам тяжести по заданной метрике
ENDLOOP
CLOSE files

```

Рис. 4. Обобщенный алгоритм кластеризации в псевдокоде

возможностью анализа  $N$  признаков и представлен на рис. 4 в псевдокоде [16].

При равномерном распределении количественных признаков наблюдаемых объектов измерения рационально проводить, обращаясь к метрике евклидова расстояния:

$$P(X_i, X_j) = \sum_{m=1}^N \frac{1}{w_m} (x_{im} - x_{jm})^2,$$

где  $X_i, X_j$  — координаты  $i$ -й и  $j$ -й термоскважин в  $N$ -мерном пространстве;  $x_{im}, x_{jm}$  — величина  $m$ -го признака у  $i$ -й ( $j$ -й) термоскважины ( $m = 1, 2, \dots, N$ ;  $i, j = 1, 2, \dots, M$ );  $M$  — число термоскважин;  $w_m$  — весовой коэффициент  $m$ -го признака.

При кластеризации сознательно исключена часто используемая на этом этапе процедура нормализации, поскольку она уменьшает различия между группами по тем признакам, по которым наилучшим образом обнаруживались групповые значения [17]. Процедура нормализации выполнена для температурных измерений после распределения термоскважин по кластерам на основе независимых признаков.

Для построения временных рядов температурных измерений проведено вычисление температурных градиентов измерений внутри кластеров. Температурный градиент приповерхностных измерений  $\text{grad } S$  определен как среднее значение измерений температур  $t_S$ , выполненных приповерхностными датчиками (расположенными на глубине сезонного промерзания), приходящееся на единицу глубины  $\Delta h_S$ :

$$\text{grad } S_i = \frac{t_S}{\Delta h_S}, \quad (1)$$

где  $i$  — номер кластера,  $i = 1, 2, \dots, k$ .

Для рассматриваемой тестовой выборки диапазон его изменения  $[-1,09; 1,62]$ . Температурный градиент глубинных измерений  $\text{grad } H$  определен как среднее значение измерений температур  $t_H$ , выполненных глубинными датчиками (расположенными ниже глубины сезонного промерзания), приходящееся на единицу глубины  $\Delta h_H$ :

$$\text{grad } H_i = \frac{t_H}{\Delta h_H}. \quad (2)$$

Для тестовой выборки диапазон его изменения  $[-0,22; 0,09]$ . Система из двух температурных градиентов позволяет учесть сезонность колебаний температуры приповерхностных измерений и очистить от сезонной составляющей пласт измерений, проведенных на глубине многолетнего промерзания грунтов.

## Формирование многомерных данных

Подготовка массивов значений признаков осуществлена по проектным планам и продольным профилям трассы ТО. Азимут экспозиции склона определен как угол в плане, отсчитываемый по часовой стрелке между направлением на север и направлением максимального уклона склона. Азимут экспозиции плоского склона приравнен к нулю. Высота устья ТС определена как расстояние по отвесной линии до уровневой поверхности, принятой за начало счета высот. В табл. 3 приведен образец исходных данных азимутов экспозиции склонов, высот устьев скважин, дальности ТС от боковой образующей трубы, определенные по профилям линейной части ТО.

При кластеризации термоскважин для тестового набора данных проведено кодирование значений признаков "Азимут экспозиции склона" ( $Ex$ ) и "Дальность ТС от боковой образующей трубы" ( $Ds$ ) по следующим правилам:

$$Ex' = \begin{cases} 0, & Ex \in [0...45)^\circ \cup (315...360)^\circ; \\ 1, & Ex \in [45...135)^\circ; \\ 2, & Ex \in [135...225)^\circ; \\ 3, & Ex \in [225...315)^\circ. \end{cases} \quad (3)$$

$$Ds' = \begin{cases} 1, & Ds \in [1,0...2,0) \text{ м}; \\ 2, & Ds \in [2,0...4,0) \text{ м}; \\ 3, & Ds \in [4,0...10,7) \text{ м}. \end{cases}$$

На рис. 5 приведен алгоритм подготовки данных в псевдокоде, который проверяет отсутствие значений признаков, их соответствие типу данных и нормативным диапазонам. Отсутствующее значение заменяют нейтральным (средним значением). Такая замена не влияет на математическое ожидание признака и коэффициенты корреляции между признаками.

Для описания состава грунтов использована представленная в проектной документации инженерно-геологическая модель трассы на основе комплекса инженерно-геологических элементов (ИГЭ),

```

input: (1) значения признаков
output: (2) конвертированные значения признаков
INITIALIZE converting // запуск процедуры подготовки данных
OPEN files
LOOP until done //повтор, пока есть необработанные значения
READ input
// проверка наличия, типа и диапазона значения
IF EXIST input AND type of input = true
AND range of input = true THEN
DETERMINE input // конвертирование значения
ELSE COMPUTE input as mean // подстановка среднего значения
ENDLOOP
CLOSE files

```

Рис. 5. Алгоритм подготовки данных в псевдокоде



где ИГЭ — некоторый объем грунта одного и того же происхождения и вида [18]. На рис. 6 (см. четвертую сторону обложки) отображен профиль участка трассы с 3634 по 3637 км с составом грунтов в принятой системе ИГЭ.

### Результаты кластерного анализа температурных измерений

Проведена кластеризация данных по нескольким тестовым наборам, сформированным следующим образом:

$$O_1(Ex, Ds, Hs); O_2(Ex, Ds', Hs);$$

$$O_3(Ex', Ds', Hs); O_4(Ex, Ds', Hs, Ig),$$

где  $O_i$  — набор тестовых данных,  $i = 1, \dots, 4$ ;  $Ex, Ex'$  — массивы исходных и конвертированных значений азимутов экспозиций склона;  $Ds, Ds'$  — массивы исходных и конвертированных значений дальности ТС от боковой образующей трубы;  $Hs$  — массив значений высот устьев ТС, м;  $Ig$  — массив значений ИГЭ.

На рис. 7 представлено распределение термоскважин по трем кластерам, построенное для тестовой выборки с достаточно явными границами кластеров.

Анализ кластеров ТС показал, что контрольные ТС, наиболее далеко отстоящие от боковой образующей трубы, формируют отдельный кластер, что хорошо согласуется с затуханием влияния продукта на тепловой режим грунтов с ростом расстояния от трубы. Распределение остальных ТС обуславливают довольно близкие (дисперсия 3,6) значения высот устьев ТС (равнинный участок) и экспозиций склонов.

Выявлено, что:

- для всех наборов тестовых данных, исключая последний, 38 % всех термоскважин стабильно попадают в одни и те же кластеры. Добавление в качестве признака состава грунтов уменьшает это количество до 13 %;
- конвертация значений признака "Дальность трубы" по трем группам (близкая, средняя, далекая) не влияет на финальное распределение тестовых значений по кластерам;
- конвертация значений признака "Азимут экспозиции склона" по четырем группам (север, восток, юг, запад) вносит помехи при кластеризации тестовых значений. Использование большего числа групп, учитывающих промежуточные направления (северо-восток, юго-восток и пр.) позволяет снизить расхождения в определении принадлежности к кластеру по сравнению с массивом значений в градусах. Конвертацию можно провести по следующему правилу (рис. 8).

На третьем этапе проведены процедуры исключения нулевых значений, оценки основных статистических характеристик, нормализации разновременных температурных данных вычитанием математического ожидания и делением на стандартное отклонение выборки, а также проверки диапазонов изменения температур по сезонам (рис. 9).

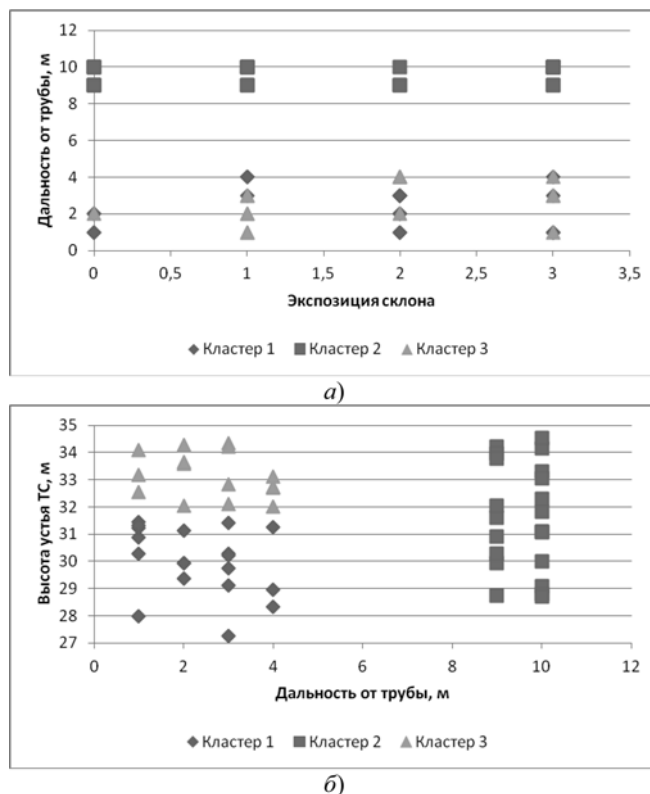


Рис. 7. Кластерное распределение термоскважин по признакам: а — "Экспозиция склона и дальность от трубы"; б — "Дальность от трубы и высота устья ТС"

```
input: (1) значения признака «Азимут экспозиции склона»;
output: (2) конвертированные значения признака
OPEN files
READ input
LOOP until done //повтор, пока есть необработанные значения
CASE Ex OF
(Ex<=0+x) OR (Ex>=360-x) : Ex='Север'
(0+x<Ex<=90-x) : Ex='Северо-Восток'
(90-x<Ex<=90+x) : Ex='Восток'
(90+x<Ex<=180-x) : Ex='Юго-Восток'
(180-x<Ex<=180+x) : Ex='Юг'
(180+x<Ex<=270-x) : Ex='Юго-Запад'
(270-x<Ex<=270+x) : Ex='Запад'
ENDCASE
ENDLOOP
CLOSE files
```

Рис. 8. Правила конвертирования в псевдокоде

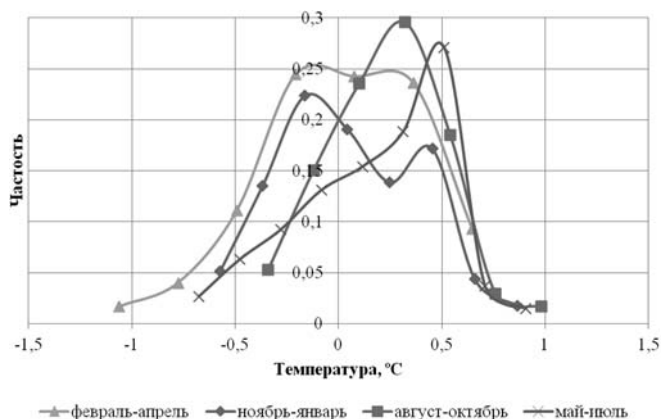


Рис. 9. Распределение температур грунтов трассы по сезонам года

## Обсуждение

Отмечено, что промерзание грунтов происходит с запаздыванием и пики минимальных температур приходится на февраль—апрель.

Для нормализованных данных согласно четвертому этапу предложенного метода проведено вычисление и усреднение значений температурных градиентов грунтов и построение моделей изменения температуры в каждом кластере (рис. 10).

Таким образом, для каждого кластера определены вид моделей изменения температурных градиентов по времени и их коэффициенты. Приповерхностные температурные градиенты представлены в виде:

$$\begin{aligned} \text{grad } S_1 &= -0,02t^2 + 0,28t - 0,89; \\ \text{grad } S_2 &= -0,03t^2 + 0,51t - 1,67; \\ \text{grad } S_3 &= -0,04t^2 + 0,59t - 1,98. \end{aligned} \quad (4)$$

Глубинные температурные градиенты представлены в виде:

$$\begin{aligned} \text{grad } S_1 &= -0,001t^2 + 0,03t - 0,11; \\ \text{grad } S_2 &= -0,003t^2 + 0,05t - 0,20; \\ \text{grad } S_3 &= -0,002t^2 + 0,04t - 0,18. \end{aligned} \quad (5)$$

Результаты моделирования позволили снизить число кластеров для тестового набора температурных данных с учетом того, что измерения температур проведены до запуска нефтепровода и его тепловое влияние можно считать минимальным.

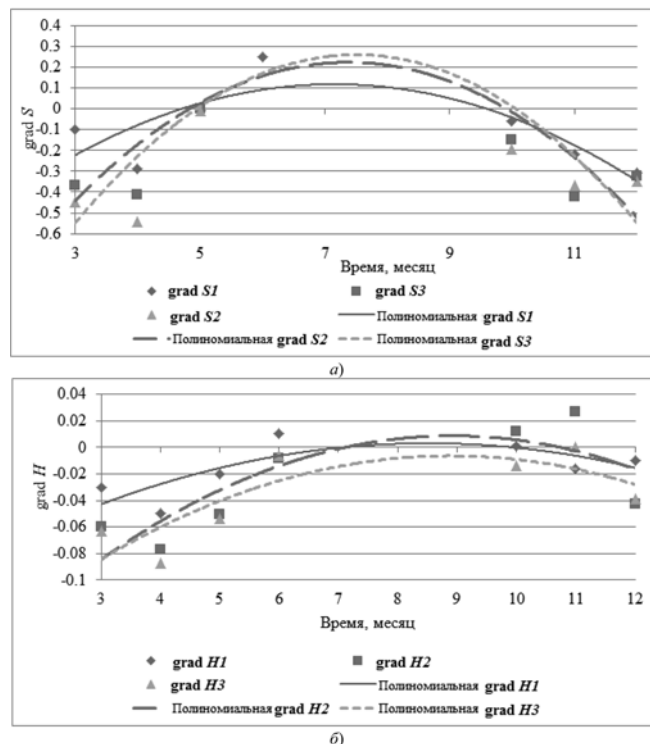


Рис. 10. Модели изменения: а — приповерхностных и б — глубинных температурных градиентов по кластерам:  $S_1, H_1$  — кластер 1;  $S_2, H_2$  — кластер 2;  $S_3, H_3$  — кластер 3

Для больших наборов данных ( $M > 1000$  шт.) при выполнении второго этапа метода предложено автоматическое вычисление количества кластеров  $k$  по формуле Стерджесса:

$$k = 1 + 3,322 \lg M. \quad (6)$$

Уточнение числа кластеров термоскважин, вычисленного по (1) в сторону уменьшения, возможно для монотонной местности. Определение минимального числа кластеров термоскважин проводят сравнением коэффициентов аппроксимирующих моделей после вычисления температурных градиентов грунтов.

В качестве дополнительных признаков кластеризации предложены следующие: глубина кровли многолетнемерзлых грунтов, климатические зоны в месте расположения термоскважины, коэффициент эрозии, удаленность от рек, дорог, населенных пунктов, геоморфологический элемент (междуречье, склон, речная долина), характеристика рельефа (равнинный с углами наклона до  $2^\circ$ , всхолмленный с углами наклона до  $4^\circ$ , пересеченный с углами наклона до  $6^\circ$ , горный и предгорный с углами наклона более  $6^\circ$ ) и др.

При прогнозировании температуры грунтов в криолитозоне с учетом пуска нефтепродукта возможно в первом приближении использовать формулу распределения температуры вдоль трубы на основании [4], полученную для китайского участка нефтепровода "Восточная Сибирь — Тихий Океан":

$$T_s = 2,5 + 12,5 \sin\left(\frac{2\pi}{365 \cdot 24} t_h + \frac{\pi}{2}\right), \quad (7)$$

где  $T_s$  — температура стенки трубы,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_h$  — время эксплуатации, ч.

## Заключение

Предложен четырехэтапный метод кластерного анализа температурных измерений, отличающийся тем, что термоскважины объединяют в группы на основе слабо изменяющихся во времени характеристик, а модели изменения температуры грунтов строят внутри кластеров по данным разновременных измерений.

Использование системы температурных градиентов позволяет провести прогнозирование температуры приповерхностных грунтов с коэффициентами сезонности по модели [9]:

$$\begin{aligned} a_i &= \alpha_1 \frac{t_i}{f_{i-1}} + (1 - \alpha_1) a_{i-1}, \quad 0 < \alpha_1 < 1; \\ f_i &= \alpha_2 \frac{t_i}{f_i} + (1 - \alpha_2) f_{i-1}, \quad 0 < \alpha_2 < 1, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — сглаживающие коэффициенты, выбираемые пользователем;  $a_i$  — взвешенная сумма, характеризующая тенденцию развития процесса;  $t_i$  — температурный градиент;  $f_i, f_{i-1}$  — коэффициенты сезонности;  $l$  — число фаз в сезонном цикле,  $l = 4$ .

В качестве коэффициента сезонности берут его наиболее позднюю оценку, сделанную для аналогичной фазы цикла. Затем величину  $a_i$ , полученную по первому уравнению, используют для определения новой оценки коэффициента сезонности по второму уравнению.

*Автор выражает благодарность за полезные обсуждения и замечания в ходе работы над статьей своим коллегам к. геол. н., в. н. с. А. В. Розовой, в. н. с. Е. С. Востречевой, н. с. В. О. Михайлову.*

#### Список литературы

1. Светушков Н. Н. Параллельный метод струн для численного решения нелинейных задач теплопроводности // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 9. С. 689–693.
2. Гишкелюк И. А., Станиловская Ю. В., Евланов Д. В. Прогнозирование оттаивания многолетнемерзлых грунтов вокруг подземного трубопровода большой протяженности // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2015. № 1 (17). С. 20–25.
3. Wang T., Zhou G., Wang J., Zhao X. Stochastic analysis of uncertain thermal characteristic of foundation soils surrounding the crude oil pipeline in permafrost regions // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 99. P. 591–598.
4. Wang Y., Jin H., Li G. Investigation of the freeze-thaw states of foundation soils in permafrost areas along the China-Russia Crude Oil датчикPipeline (CRCOP) route using ground-penetrating radar (GPR) // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 126. P. 10–21.
5. Комаров И. А., Ананьев В. В., Бек Д. Д. К проблеме использования хладоресурса сжиженного природного газа для це-

лей термостабилизации грунтов // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 2. С. 75–80.

6. Сапсай А. Н., Павлов В. В., Кауркин В. Д., Коргин А. В. Внедрение и развитие технологий термостабилизации грунтов на объектах НПС-2 магистрального трубопровода "Куюмба-Тайшет" // Вестник МГСУ. 2014. № 8. С. 62–71.

7. СТТ-91.060.00-КТН-097-12 Технические решения по термостабилизации грунтов под объектами трубопровода ТС "Заполярье — НПС "Пур-Пе". Специальные технические требования.

8. РД-91.200.00-КТН-158-12 Методика определения мест размещения термометрических скважин и их обустройства на участках с многолетнемерзлыми грунтами.

9. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.

10. Lee I., Yang J. Common Clustering Algorithms. In Comprehensive Chemometrics. Elsevier, Oxford. 2009. 618 p.

11. Liao S.-H., Chu P.-H., Hsiao P.-Y. Data mining techniques and applications — A decade review from 2000 to 2011 // Expert Systems with Applications, 2012. Vol. 39, Is. 12. P. 11303–11311.

12. Yajima A., Wang H., Liang R. Y., Castaneda H. A clustering based method to evaluate soil corrosivity for pipeline external integrity management // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2015. Vol. 126–127. P. 37–47.

13. Катруца А. М., Стрижов В. В. Проблема мультиколлинеарности при выборе признаков в регрессионных задачах // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 1. С. 8–17.

14. Симчера В. М. Методы многомерного анализа статистических данных Методы многомерного анализа статистических данных. М.: Финансы и статистика, 2008. 400 с.

15. McCaffrey J. K-Means Data Clustering Using C# Режим доступа: URL: <https://visualstudiomagazine.com/articles/2013/12/01/k-means-data-clustering-using-c.aspx> Дата обращения: 12.05.2016.

16. Agarwal V. B., Tayal S. P., Gupta M. Software Engineering and Testing. Canada: Jones and Bartlett Learning, 2010. 516 p.

17. Ким Дж.-О., Мюллер Ч. У., Клекка У. Р., Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализы. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

18. ГОСТ 20522 2012: Грунты. Методы статистической обработки результатов.

A. Ju. Vladova, Doctor of Engineering, Chief of Analysis Software Department,  
e-mail: VladovaAY@niitnn.transneft.ru,  
LLC Transneft Research Institute for Oil and Oil Products Transportation

## Algorithmic Support of Information System for Geotechnical Monitoring of Hydrocarbon Transportation in Permafrost Conditions

*This study focuses on the analysis of diagnostic information, the decision making about the state of permafrost conditions of the pipeline route and the basic steps of development of information system for geotechnical monitoring.*

*The dimension reduce of soil slopes temperature analysis and forecasting problem is reached by grouping thermometric wells on several grounds. The proposed method of cluster analysis of temperature measurement involves organizing multi-dimensional data, clustering thermometric wells, normalizing temperature measurements, constructing and analysing temperature change patterns in each cluster.*

*The proposed method differs from the known ones in a way that thermometric wells are grouped on the basis of slightly varying (in time) characteristics, and the models of soil temperature changes are built inside of clusters according to different time dimensions.*

**Keywords:** information system, thermometric sensors, thermometric profile, geotechnical monitoring, cluster analysis, temperature gradient

#### References

1. Svetushkov N. N. Parallel'nyj metod strun dlja chislenogo reshenija nelinejnyh zadach teploprovodnosti (Parallel Strings Method for the Numerical Solution of Nonlinear Heat Conduction Problem), *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 9, pp. 689–693.

2. Gishkeluk I. A., Stanilovskaya J. V., Evlanov D. V. Prognozirovanie ottaivaniya mnogoletnemerzlyh gruntov vokrug podzemnogo truboprovoda bol'shoj protjazhennosti (Forecasting of permafrost thawing around an underground cross-country pipeline), *Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov*. Nauchno-

issledovatel'skij institut transporta nefti i nefteproduktov Transneft', 2015, no. 1 (17), pp. 20–25 (in Russian).

3. Wang T., Zhou G., Wang J., Zhao X. Stochastic analysis of uncertain thermal characteristic of foundation soils surrounding the crude oil pipeline in permafrost regions, *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 99, pp. 591–598.

4. Wang Y., Jin H., Li G. Investigation of the freeze-thaw states of foundation soils in permafrost areas along the China-Russia Crude Oil Pipeline (CRCOP) route using ground-penetrating radar (GPR), *Cold Regions Science and Technology*, 2016, vol. 126, pp. 10–21.

5. Komarov I. A., Ananiev V. V., Bek D. D. K probleme ispol'zovanija hladoresursa szhizhenного природного газа dlja celej termostabilizacii gruntov (Problem of utilization of the cooling capacity of natural liquid gas for the termostabilization of ground), *Kriosfera Zemli*, 2015, vol. XIX, no. 2, pp. 75–80 (in Russian).

6. Sapsay A. N., Pavlov V. V., Kaurkin V. D., Korgin A. V. Vnedrenie i razvitie tehnologij termostabilizacii gruntov na ob'ektah NPS-2 magistral'nogo truboprovoda "Kujumba-Tajshet" (Introduction and development of soil thermal stabilization technologies at the objects of oil pumping station-2 of "Kuyumba — Tayshet" trunk oil pipeline), *Vestnik MGSU*. MGSU Publ. 2014, no. 8, pp. 62–71 (in Russian).

7. STT-91.060.00-KTN-097-12 *Tekhnicheskie reshenija po termostabilizacii gruntov pod ob'ektami truboprovoda TS "Zapoljar'e — NPS "Pur-Pe". Special'nye tekhnicheskie trebovanija.* (Technical solutions for soils thermal stabilization under the pipeline "Arctic — Pur-Pe". Special Technical Requirements), Nauchno-issledovatel'skij institut transporta nefti i nefteproduktov Transneft'. 2012 (in Russian).

8. RD-91.200.00-KTN-158-12 *Metodika opredelenija mest razmeshhenija termometricheskikh skvazhin i ih obustrojstva na uchastkakh s mnogoletnemerzlymi gruntami.* (Methods of determining the placement of thermometric wells and their arrangement in areas with permafrost soils). Nauchno-issledovatel'skij institut transporta nefti i nefteproduktov Transneft'. 2012. (in Russian).

9. Lukashin Yu. P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennyh rjadov* (Adaptive methods of short-term time series forecasting). Moscow: Finansy i statistika Publ. 2003. 416 p. (in Russian).

10. Lee I., Yang J. Common Clustering Algorithms. In *Comprehensive Chemometrics*. Elsevier, Oxford. 2009. 618 p.

11. Liao S.-H., Chu P.-H., Hsiao P.-Y. Data mining techniques and applications — A decade review from 2000 to 2011, *Expert Systems with Applications*, 2012, vol. 39, is. 12, pp. 11303–11311.

12. Yajima A., Wang H., Liang R. Y., Castaneda H. A clustering based method to evaluate soil corrosivity for pipeline external integrity management, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2015, vol. 126–127, pp. 37–47.

13. Katrutsa A. M., Strijov V. V. Problema mul'tikollinernosti pri vybore priznakov v regressionnyh zadachah (The Multicollinearity problem for feature selection methods in regression), *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 8–17 (in Russian).

14. Simchera V. M. *Metody mnogomernogo analiza statisticheskikh dannyh* (Methods of multivariate statistical data analysis). Moscow, Finansy i statistika Publ. 2008. 400 p. (in Russian).

15. McCaffrey J. K-Means Data Clustering Using C# Режим доступа: URL: <https://visualstudiomagazine.com/articles/2013/12/01/k-means-data-clustering-using-c.aspx>

16. Agarwal B. B., Tayal S. P., Gupta M. *Software Engineering and Testing*. Canada: Jones and Bartlett Learning, 2010. 516 p.

17. Kim J.-O., Mueller C. W., Klecka W. R., Aldenderfer M. S., Blashfield R. K. *Faktornyj, diskriminantnyj i klasternyj analizy* (Factor, discriminant and cluster analysis), Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989, 215 p. (in Russian).

18. GOST 20522 2012: *Gruntj. Metody statisticheskoy obrabotki rezul'tatov.* (Soils. Methods of statistical processing of the results). 2012. (in Russian).

УДК 004.04

С. Н. Маликов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зам. ген. дир. по научно-конструкторской работе,  
e-mail: sergej.malikov@bk.ru,  
ОАО "НИИ суперЭВМ", г. Москва

## Концепция сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями на основе аксиоматического метода

Формулируются научно-методические основы перехода информационных технологий организации на сервис-ориентированную ИТ-архитектуру. Приводится в формализованном виде концепция, которая определяет сигнатуру операционной среды специалиста, обеспечивающей реализацию необходимого набора информационных сервисов на основе базовых множеств программных средств, стандартов и стандартизованных решений. Предложенная концепция на основе аксиоматического метода позволяет сформировать правила построения функции полезности элементов операционной среды специалиста и решающие правила для интегральной оценки исследуемых альтернатив операционной среды.

**Ключевые слова:** сервис-ориентированный подход, стратегия управления ИТ, архитектура предприятия, профиль операционной среды специалиста, аксиоматический метод

### Введение

Периодичность и характер изменений, происходящих с бизнесом, требуют от ИТ-подразделений организации полностью соответствовать текущей стратегии бизнеса. Новые требования к информационным системам (ИС) выражаются в необходи-

мости постоянной готовности к изменениям во всех аспектах их функциональности: в объеме и составе предоставляемых информационных услуг, способах их реализации, причем современные требования связаны именно с непрерывными изменениями. Существующие методологии управления информационными технологиями (ИТ) организа-

ции, основанные на итеративных процессах, ориентированы на достижение заранее сформулированного и согласованного результата. Требование текущего момента: самостоятельно выявить существующие или прогнозируемые риски и в рамках цикла Деминга минимизировать их влияние на работу организации. Деятельность по совершенствованию информационных услуг не должна затрагивать интересов конкретных потребителей информационных услуг и отрицательно влиять на систематическую работу по повышению качества и рентабельности информационного обеспечения производственных процессов.

В нашей стране и за рубежом накоплен значительный опыт использования ИС. Произошло осознание возможностей и выгод от их применения, также накоплен большой опыт по ликвидации последствий от сбоев в работе ИС. На всех уровнях управления организацией сформировался образ идеальной ИС, способной обеспечить информационную поддержку производственной деятельности на приемлемом уровне. Уровень формализации архитектуры передовых предприятий позволяет сопоставлять их архитектуру с требованиями стандартов, выявлять несоответствия архитектуры предприятия и ИТ-архитектуры, оценивать уровень зрелости реализации бизнес-процессов и информационного обеспечения. Устоявшийся термин "стоимость владения" ИС в условиях развития внешнего и внутреннего аутсорсинга теряет свой смысл. На первый план выходит дифференцированное сравнение затрат на отдельные информационные услуги, возникает вопрос о целесообразности владения собственной ИС. Применение проблемно-ориентированных собственных ИС становится неактуальным. Повсеместное использование уникальных ИС, "заточенных" для конкретных организаций, также уходит в прошлое. Перспективной стратегией управления ИТ организации является использование типовых информационных решений. Возникает вопрос о доступности типовых информационных решений, не подверженных угрозам прекращения поддержки и запретам по санкциям.

Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных содержит почти 400 ссылок на программные продукты по классу программного обеспечения "Системы управления процессами организации". Многие указанные продукты имеют узкоспециализированную направленность. Тем не менее, процесс типизации информационных сервисов развивается и приобретает более совершенные формы. Однако на сегодняшний день уровень формализации информационных сервисов недостаточно стандартизован, правовое обеспечение постоянно совершенствуется, обобщенный опыт недостаточно систематизирован. С учетом изложенного актуальным представляется разработка концепции сервис-ориентированного подхода к управлению информационными

технологиями организации, систематизирующей знания и обобщенный опыт специалистов. Эффективным подходом к решению данной задачи является применение аксиоматического метода для систематизации базовых понятий и утверждений, выделения структурных элементов знаний и построения взаимосвязей между ними.

### **Общесистемные решения на этапе создания сервис-ориентированной архитектуры организации**

Сервис-ориентированная архитектура рассматривается как (Service-Oriented Architecture, SOA) [1] ИТ-архитектура организации, предназначенная для установления связи с информационными ресурсами в ходе выполнения производственных процессов. Информационные ресурсы и механизмы их предоставления в ходе выполнения бизнес-процесса рассматриваются как набор информационных сервисов, ориентированных на решение задач бизнеса. Основным структурным элементом приложений сервис-ориентированной архитектуры становится сервис, а не подсистема, система или компонент ИТ. Процессный подход в управлении деятельностью организации придает сервис-ориентированной ИТ-архитектуре свойство гибкости. Так, например, изменение логики бизнес-процесса не затрагивает функциональность используемых информационных сервисов. Указанное обстоятельство облегчает внесение изменений в ИТ-архитектуру организации [2].

Текущий контроль выполнения бизнес-процессов — рутинная производственная задача. Именно здесь заложены резервы повышения эффективности работы организации. Одним из эффективных подходов для решения данной задачи является функционально-стоимостной подход при анализе статистики выполнения бизнес-процессов и привлекаемых модификаций сервисов для их реализации [3]. Организация, которая стремится к оптимизации затрат, имеет возможность проанализировать, на что, как и зачем она тратит деньги, какую пользу данные затраты приносят организации. Как известно, функционально-стоимостной подход направлен, в первую очередь, на повышение потребительской стоимости производимых товаров и услуг [4]. Именно покомпонентный анализ бизнес-процессов и бизнес-функций позволяет локализовать и устранять риски потери качества и избыточных затрат. Выявление неэффективных действий (бизнес-процессов и бизнес-функций) — задача более легкая, чем выявление факторов, влияющих на реализацию отдельных потребительских функций продукции (функций организации). Применение сервис-ориентированного подхода к управлению ИТ позволяет выявить неэффективные сервисы и рассмотреть возможность их совершенствования.

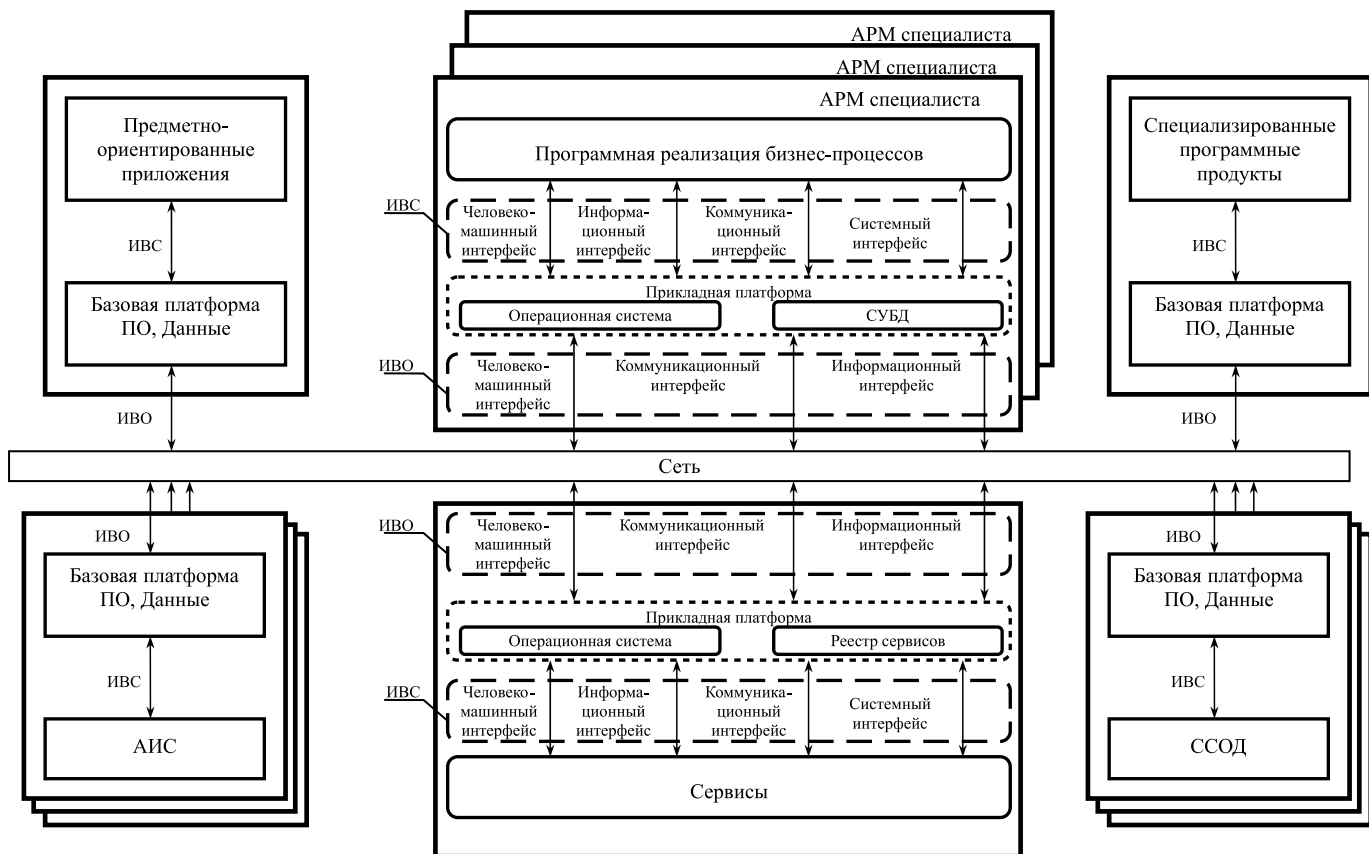
Необходимым условием перехода организации на применение сервис-ориентированной ИТ-архи-

тектуры является представимость информационных услуг в виде конечного набора типовых информационных сервисов. Это позволяет применить стандартизованные и апробированные решения, а также означает готовность организации к оперативной реализации необходимых нововведений. Информационные сервисы предоставляются специалистам через интерфейсы модулей функциональности, декомпозицию которых можно выполнить в рамках стандартного интерфейса внешнего окружения и интерфейса внутренней среды. Повышение уровня стандартизации при разработке спецификации информационных сервисов достигается построением модели операционной среды специалиста на множестве средств реализации информационных сервисов.

Операционная среда специалиста представляется как единое информационно-функциональное пространство модулей системы, внутренней и внешней базовых платформ, специализированных программных приложений и технологий для реализации сервисов, во взаимосвязи обеспечивающих полноту решаемых производственных задач [3, 5]. Операционная среда специалиста интегрируется в ИТ-архитектуру организации, примерная структура которой на уровне взаимодействия интерфейсов показана на рисунке. Принятые на рисунке обозначения: ПО — программное обеспечение,

ИВО — интерфейс внешнего окружения, ИВС — интерфейс внутренней среды, АИС — автоматизированная информационная система, ССОД — средства для сбора и обработки данных. Структура отражает методологические основы типизации, унификации модулей функциональности операционной среды специалиста, определяет типы базовых стандартов для реализации информационных сервисов.

Создание модели операционной среды специалиста в информационно-функциональном пространстве сервис-ориентированной ИТ-архитектуры организации связано с решением комплекса задач, в совокупности составляющих аппарат профилирования. Аппарат профилирования представляет собой механизм агрегирования функциональности элементов информационной технологии посредством определения наиболее эффективных их комбинаций для реализации необходимых сервисов с использованием базовых стандартов, стандартизованных спецификаций и решений, формализованных экспертных знаний [6]. Для построения спецификаций, регламентирующих функциональность модулей, осуществляется выбор опций для каждого из модулей, а также значений параметров, определяющих основные свойства модулей в ИТ-архитектуре.



Структура операционной среды специалиста в ИТ-архитектуре организации

Общесистемные решения рассматриваются как основа для построения концепции сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями с применением аксиоматического метода — в рамках решаемой задачи метода формализации на основе аксиоматических исходных понятий.

### **Аксиоматическое описание концепции сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями**

Построение концепции сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями организации позволяет представить в формализованном виде не только содержание знаний предметной области, но и их интерпретацию в форме определенных понятий и выделенных множеств структурных элементов. Ниже рассматривается вариант построения концепции сервис-ориентированной архитектуры с применением аксиоматического метода, основным структурным элементом которой является модель операционной среды специалиста организации.

Заданы следующие исходные множества:

*A* — множество средств моделирования производственных процессов;

*B* — множество средств программной реализации модулей функциональности;

*C* — множество средств реализации сервисов прикладной платформы базы данных;

*D* — множество средств реализации сервисов прикладной платформы операционной системы;

*E* — множество специализированных программных средств для сбора и обработки данных (ССОД).

Необходимо создать модель операционной среды специалиста в формализованном информационно-функциональном пространстве, обеспечивающей необходимый набор информационных сервисов для выполнения производственных процессов. Модель операционной среды специалиста реализуется на практике в форме профиля, состоящего из одного или большего числа стандартизованных спецификаций, определяющего выбор из этих спецификаций необходимых для реализации конкретной прикладной функции классов сервиса, опций, параметров, тестовых наборов [6]. Профиль задает базовую функциональность операционной среды специалиста, необходимую для выполнения конкретных производственных задач, агрегируя избирательным образом функциональные возможности стандартизованных спецификаций. В процессе построения профиля проводятся отбор необходимых для операционной среды функциональных возможностей (например, выбор опций или функциональных групп), определяемых входящими в состав профиля спецификациями, а также параметрическая настройка модулей

функциональности с учетом исполняемых ими информационных сервисов.

Спецификация информационных сервисов  $S_i$  операционной среды специалиста, предоставляемых через интерфейсы модулей функциональности, и средства их реализации представляются в виде

$$S_i(M_i) \rightarrow [K_i, R_i(A, B, C, D, E), T_i], \quad (1)$$

где  $M_i$  — модули функциональности операционной среды специалиста;  $K_i$  — критерии профилирования модулей функциональности;  $R_i$  — виды средств и способы реализации сервисов операционной среды специалистов;  $T_i$  — базовые стандарты, рекомендации по способам реализации сервисов.

Выражение (1) отражает общую формулировку задачи построения концепции сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями: формальные спецификации для  $i$ -го информационного сервиса отбираются в соответствии со стандартами, критериями профилирования на множестве конкретных средств и способов реализации сервисов, типовыми стандартизованными решениями.

На уровне концептуальной модели операционная среда специалиста представляется как черный ящик, взаимодействие с которым осуществляется через интерфейсы, под которыми понимаются границы, разделяющие между собой некоторые функциональные сущности (системы, модули, функции). Через эти интерфейсы система может предоставлять сервисы пользователям (приложениям) и использовать сервисы, связанные с сущностями внешнего окружения (набор интерфейсов, сервисов, форматов). Все особенности реализации модулей функциональности скрываются за интерфейсами системы, что дает возможность осуществить принцип независимости разработки от их конкретных реализаций. Согласно эталонной модели открытых систем, между сущностями существует два типа интерфейсов [6]:

- API — интерфейс прикладного программирования (Application programming interfaces);
- EEI — интерфейс внешней среды (External environment interface).

Стандарты интерфейсов разбиваются на две основные категории в соответствии с двумя типами интерфейсов: стандарты прикладных программных интерфейсов (API Standards); стандарты внешнего окружения (EEI Standards). В соответствии с указанными стандартами также реализуются два типа сервисов: API и EEI. В модели операционной среды специалиста это соответствует интерфейсу внутренней среды (ИВС) и интерфейсу внешнего окружения (ИВО). Указанные группы стандартов и сервисов разбиваются на подкатегории. Для каждой подкатегории сервисов разрабатывается ее функциональность в виде определения групп сервисов, которые, в свою очередь, структурируются до элементарных сервисов.

Определение  $r_i$  средств реализации информационных сервисов операционной среды специалиста выражает зависимость от модулей функциональности, критериев профилирования, имеющих видов и способов реализации сервисов, стандартов прикладных программных интерфейсов соответствующего уровня декомпозиции:

$$r_i(M_i, K_i, R_i, T_i):r_i[(A, B, C, D, E), M_i, K_i, T_{ij}],$$

где  $T_{ij}$  — стандарты прикладных программных интерфейсов  $j$ -го уровня декомпозиции, рекомендуемые для  $i$ -го сервиса.

Для снижения размерности задачи все множество критериев представляется в виде трех различных по своей роли групп или подмножеств критериев. К первой группе относятся так называемые критерии требования  $K_T$ , т.е. такие критерии, при несоответствии которым вариант решения автоматически отклоняется. Вторая группа включает оценочные критерии  $K_O$ , по которым выполняется сопоставление вариантов решения. Третья группа включает учитываемые условия  $K_Y$ , которые могут быть ранжированы по предпочтительности. Критерии  $K_T$  используются для построения матрицы соответствия средств реализации сервисов; для критериев  $K_O$  определяются весовые коэффициенты  $w_j$ , которые устанавливают степень важности каждого критерия; для критериев  $K_Y$  учитываемые условия могут быть ранжированы в порядке следования приоритетов.

Чтобы установить взаимосвязи между элементами множеств  $A, B, C, D, E$  в целях обеспечения их совместимости и сокращения избыточности средств реализации сервисов, а также для повышения степени интегрируемости модулей функциональности, создается матрица соответствия средств реализации сервисов. Элементы этой матрицы принимают значения 0 или 1, ее структура показана в виде табл. 1. Обозначения исследуемых объектов множеств  $A, B, C, D, E$  по строкам и столбцам образуют квадратную матрицу.

Определение совместимости средств реализации сервисов по критериям — требованиям и учитываемым критериям представляется в виде

$$r_i(M_i, K_i, R_i, T_i):r_i[(A, B, C, D, E), M_i, T_{ij}, K_T, K_Y].$$

Качественная оценка средств реализации сервисов, составляющих альтернативы на множествах  $A, B, C, D, E$ :

$$r_i[(A, B, C, D, E), M_i, T_{ij}, K_T, K_Y] \rightarrow O_i(K_{lo}, H_{qo}),$$

где  $O_i$  — оценки альтернатив по  $l$ -м критериям;  $K_{lo}$  — оценочные критерии для множеств  $A, B, C, D, E$ ;  $H_{qo}$  — порядковая шкала оценок.

Определение функции полезности  $P_i$  многокритериальных альтернатив:

$$P_i(O_i(K_{lo}, H_{qo}), r_i):(P_i^A, P_i^B, P_i^C, P_i^D, P_i^E),$$

где

$$P_i^A = \sum_{j=1}^l w_j^A O_{ij}^A, P_i^B = \sum_{j=1}^l w_j^B O_{ij}^B,$$

$$P_i^C = \sum_{j=1}^l w_j^C O_{ij}^C, P_i^D = \sum_{j=1}^l w_j^D O_{ij}^D,$$

$$P_i^E = \sum_{j=1}^l w_j^E O_{ij}^E,$$

$w_j^A, w_j^B, w_j^C, w_j^D, w_j^E$  — значение весовой функции  $j$ -го критерия множеств  $A, B, C, D, E$ ;  $O_{ij}^A, O_{ij}^B, O_{ij}^C, O_{ij}^D, O_{ij}^E$  — значение экспертной оценки  $i$ -й альтернативы  $j$ -го критерия множеств  $A, B, C, D, E$ .

Построение спецификации элементов операционной среды с учетом ранжирования альтернатив по значениям функции полезности:

$$M_i(r_i) \rightarrow \{P_i^A, P_i^B, P_i^C, P_i^D, P_i^E\}.$$

Построение спецификации альтернативных вариантов операционной среды с учетом отбора функциональных элементов по заданным критериям:

$$S_p = (M_i \times r_i) \times \{P_i^A, P_i^B, P_i^C, P_i^D, P_i^E\}.$$

Выбор рабочего варианта  $S_p$  операционной среды специалиста, который соответствует максимальной результирующей функции полезности по

Таблица 1

Структура матрицы соответствия средств реализации сервисов

$A_1$	$A_2$	...	$A_{na}$	$B_1$	$B_2$	...	$B_{nb}$	$C_1$	$C_2$	...	$C_{nc}$	$D_1$	$D_2$	...	$D_{nd}$	$E_1$	$E_2$	...	$E_{ne}$
$A_2$																			
...																			
$A_{na}$																			
$E_{ne}$																			



обобщенным критериям стоимости и эффективности с учетом принятых ограничений:

$$S_p \rightarrow S_p | \max\{P_i^A, P_i^B, P_i^C, P_i^D, P_i^E\}.$$

Построение альтернативных вариантов операционной среды специалиста базируется на применении подхода аналитической иерархии в оценке многокритериальных альтернатив. Выбор рабочего варианта операционной среды специалиста осуществляется в соответствии с разработанной структурой решающего правила. Полученное решающее правило отображает максимальную результирующую функцию полезности альтернатив по обобщенным критериям стоимости и эффективности.

Построение модели операционной среды специалиста обеспечивает целостное представление о составе применяемых стандартов, повышение степени унификации модулей функциональности, повышение степени соответствия интерфейсов взаимодействия модулей стандартизованным решениям. Формализованное представление концепции сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями организации позволяет построить решающие правила для выбора наилучшей альтернативы средств реализации сервисов по заданным критериям.

### Практическая реализация концепции сервис-ориентированного подхода

Формальные спецификации на требуемые функции, реализуемые с использованием информационных технологий в виде некоторого набора сервисов, можно разработать с применением различных CASE-средств. На практике спецификации

информационных сервисов операционной среды специалистов организации часто представляются в нотации IDEF0. Ниже приводится пример исходных данных для разработки формальной спецификации сервисов системы поддержки принятия решений квазиреального времени. Рассматриваемая система входит в структуру операционной среды специалиста по управлению производственным процессом организации. Ввиду ограниченности объема статьи пример в табличной форме (табл. 2) включает фрагмент данных только на уровне системы без ее декомпозиции на модули функциональности.

Одним из примеров реализации сервис-ориентированного подхода на основе типовых решений является технология 1cFresh разработки фирмы "1С" (<https://1cfresh.com/>). Данная технология позволяет, в частности, создавать собственный сервис, использующий апробированные модули функциональности. В рамках реализации сервиса 1cFresh имеется возможность работы по Интернет с приложениями системы "1С:Предприятие 8". Так, государственные учреждения могут вести бухгалтерский учет и расчет заработной платы, а также передавать отчетные формы. Результирующим аналогом выбора согласованного способа обработки информации для технологии 1cFresh является продукт "1С:Технология разработки решений 1cFresh". Данный продукт регламентирует систему правил использования или создания модулей функциональности. Взаимодействие модулей функциональности между собой и компонентами технологии 1cFresh реализовано на основе использования совокупности типовых инструментов: библиотеки "1С:Библиотека технологий сервиса".

Таблица 2

Спецификация сервисов системы поддержки принятия решений квазиреального времени

Модули функциональности	Критерии профилирования	Виды сервисов	Виды средств и способы реализации сервисов	Базовые стандарты и рекомендации по реализации сервисов
Система поддержки принятия решений квазиреального времени	Масштабируемость, переносимость, интероперабельность, адаптация, безопасность	Формирование управленческих решений в режиме реального времени	Средства моделирования процессов автоматизации: CASE-технологии, UML-технологии	ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207 — Процессы жизненного цикла программных средств; ANSI/IEEE 1348 — Recommended Practice for the Adoption of CASE; ITU-T Z.142, ITU-T Z.161 ITU-T Recom Mendations; UML Specification
СУБД клиентского и серверного приложений	Масштабируемость, переносимость, интероперабельность, адаптация, безопасность, администрирование	Коммуникационные сервисы. Информационные сервисы. Сервисы безопасности. Административное управление	Платформы баз данных	ISO/IEC 9579 — Remote database access for SQL with security enhancement; ISO/IEC 9075 — Database languages
Операционная система клиентского и серверного приложений	Масштабируемость, переносимость, интероперабельность, адаптация, безопасность, администрирование	Коммуникационные сервисы. Информационные сервисы. Сервисы безопасности. Административное управление. Системные сервисы. Человеко-машинные сервисы	Платформы операционных систем	ГОСТ Р ИСО/МЭК 10040 — Взаимосвязь открытых систем; ISO/IEC TR 14252- Guide to the POSIX Open System Environment; IEEE Std 1003.23 IEEE Guide for Developing User Organisation Open System Environment (OSE) Profile

## Заклучение

Предложенная концепция сервис-ориентированного подхода к управлению информационными технологиями с применением аксиоматического подхода позволяет представить в формализованном виде не только содержание знаний предметной области, но и их интерпретацию в форме определенных понятий и выделенных множеств структурных элементов. Рассмотренные выше модели определяют правила построения множества вариантов профиля операционной среды специалиста организации, обеспечивающего реализацию необходимого набора информационных сервисов на основе базовых множеств программных средств, стандартов и стандартизованных решений при заданных ограничениях. Предложенный подход реализует на практике особенности формализации правил построения функции полезности элементов профиля операционной среды специалиста и решающих правил для интегральной оценки исследуемых альтернатив.

Использование аксиоматического метода для формализации знаний применительно к содержанию предметной области конкретных сервис-ориентированных ИТ-архитектур позволяет:

- представить знания в систематизированном виде в качестве структурных и математических моделей и концептуальных систем;

- обеспечить научное обоснование доказательной базы, исключая тем самым применение неявных предположений;
- уточнить объем знаний применительно к содержанию предметной области конкретных сервис-ориентированных ИТ-архитектур организации в соответствии с заданными требованиями и ограничениями.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-06-00486).*

## Список литературы

1. Биберштейн Н., Боуз С., Фиаммант М., Джонс К., Ша Р. Компас в мире сервис-ориентированной архитектуры (SOA). М.: КУДИЦ-Пресс, 2007. 256 с.
2. Затеса А. В., Дик В. В. Выбор ИТ-сервисов на предприятии. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 160 с.
3. Парфенов И. И., Парфенова М. Я. Трансформация информации в системном анализе эргатических структур управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 1. С. 37–45, № 2. С. 47–52.
4. Кузьмина О. Н., Корнеева Т. А., Шатунова Г. А. Функционально-стоимостный анализ в решении организационно-управленческих задач. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. 168 с.
5. Парфенова М. Я. Методологические аспекты интегративного подхода к управлению на основе конвергенции механизмов классических подходов // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2013, № 4. С. 325–328.
6. Сухомлин В. А. Введение в анализ информационных технологий. М.: Горячая Линия — Телеком. 2003. 432 с.

S. N. Malikov, Deputy Director General for Research and design work, e-mail: sergej.malikov@bk.ru,  
JSC Scientific Research Institute of the Supercomputer

## Construction of the Concept of Service-Oriented Approach to Management of Information Technologies, Based on the Axiomatic Method

*The paper formulates scientific and methodological foundations of the transition of information technology organization to a service-oriented IT architecture. The concept which defines a signature of an operational environment of the specialist providing realization of a necessary set of information services based on the basic sets of software tools, standards and the standardized decisions is provided in the formalized look. The proposed concept is based on the axiomatic method allows you to create rules for constructing the utility function of the operating environment specialist elements and decision rules for an integrated assessment study of alternatives to the operating environment.*

**Keywords:** service-oriented approach, IT management strategy, enterprise architecture, profile operating environment of the specialist, the axiomatic method

## References

1. Bieberstein N., Bose S., Fiammante M., Jones K., Shah R. *Service-Oriented Architecture (SOA) Compass*, KUDIC-Press, 2007. 256 p.
2. Zatesa A. V., Dik V. V. *Vybor IT-servisov na predpriyatii* (The choice of IT services in the enterprise), LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 160 p. (in Russian).
3. Parfenov I. I., Parfenova M. Ja. *Transformacija informacii v sistemnom analize jergaticheskikh struktur upravlenija*. (The transformation of information into the system analysis ergatic management structures), *Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie*, 2006, no. 1, pp. 37–45; no. 2, pp. 47–52 (in Russian)
4. Kuz'mina O. N., Korneeva T. A., Shatunova G. A. *Funkcional'no-stoimostnyj analiz v reshenii organizacionno-upravlencheskikh zadach* (Functional-cost analysis in solving organizational and management tasks), Moscow, NIC INFRA-M, 2015. 168 p. (in Russian)
5. Parfenova M. Ja. *Metodologicheskie aspekty integrativnogo podhoda k upravleniju na osnove konvergencii mehanizmov klassicheskikh podhodov*. (Methodological aspects of integrative approach to management on the basis of convergence of mechanisms of classical approaches), *Gumanitarnye, social'no-jekonomicheskie i obshchestvennye nauki*, 2013, no. 4, pp. 325–328 (in Russian)
6. Suhomlin V. A. *Vvedenie v analiz informacionnyh tehnologij*. (Introduction to the analysis of information technology), Moscow, Gorjachaja Linija — Telekom, 2003. 432 p. (in Russian)

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

## INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ORGANIZATIONAL AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

УДК 004.051

**М. Я. Парфенова**, д-р техн. наук, проф., руководитель научно-исследовательского центра,  
e-mail: mparfenova@muiiv.ru

Московский университет имени С. Ю. Витте, г. Москва

### Интегративный подход к оценке технологической эффективности стратегического профиля информационных технологий организации

*Исследуется интегративный подход к оценке стратегического профиля информационных технологий организации, который основан на построении системной модели эволюционного развития ИТ и оценочных моделей на множестве унифицированных показателей, взаимосвязанных и разнородных по своим свойствам компонентов профиля. В структуре информационных технологий организации выделяются статическая и динамическая части, соответственно определяющие надежность информационного обеспечения производственных процессов и направления развития ИТ-архитектуры. Приводится модель для нахождения точки подвижного равновесия потенциалов статической и динамической частей формируемой ИТ-архитектуры, в которой достигается наибольшая технологическая эффективность информационных сервисов, и модель оценки альтернативы профиля относительно границы его технологических возможностей.*

**Ключевые слова:** информационные технологии, стратегический профиль, уровень системности, эволюционная модель, информационные сервисы, непроектируемые затраты

#### Введение

Информационные технологии воплощают научные достижения в практику в форме конкретных видов информационного обслуживания и информационных сервисов, их развитие основано на достижениях фундаментальных и прикладных наук. В настоящее время наиболее динамичным сегментом мирового рынка ИТ является программное обеспечение (ПО) [1]. Свыше половины совокупного объема сегмента формируют различные категории приложений, остальное приходится на системное ПО и средства разработки. Быстрее всего развивается категория приложений для организации совместной работы, в особенности решений для внутрифирменных сетей и совместного доступа к информационным ресурсам. Также динамично развивается категория решений для управления базами данных, анализа данных, обеспечения безопасности. Среди стратегических направлений развития ИТ сегодня особое место занимают облачные технологии, аналитика больших объемов данных, интеграция мобильных устройств и технологий социальных сетей в корпоративную среду. Совокуп-

ность этих технологий и процессов, по мнению ученых и специалистов, в ближайшие несколько лет приведет к трансформации бизнес-моделей в большинстве отраслей [1]. Соответственно, это связано с переходом ИТ-организации на новый уровень системности. Для организаций, имеющих сложную ИТ-архитектуру, с учетом экспоненциального роста объема данных такой переход связан со значительными затратами, в том числе непроектируемыми [2]. Снижение непроектируемых технологических затрат при переходе ИТ на новый уровень системности достигается путем создания и оценки стратегического профиля (ИТ-профиля) на множестве формируемых альтернатив и выбора наилучшей альтернативы с учетом заданных требований и ограничений.

Стратегический ИТ-профиль организации создается на множестве программных и аппаратных компонентов, в функциональной взаимосвязи обеспечивающих сбор, передачу, хранение, обработку и отображение данных в информационном обеспечении производственных процессов. Разработка стратегического ИТ-профиля организации заключается в конструировании спецификации инфор-

мационной технологии, представленной множеством модулей функциональности информационных систем и их окружения, обеспечивающих в совокупности необходимые сервисы, посредством комбинирования стандартизованных спецификаций и решений [3, 4]. Оценка технологической эффективности стратегического профиля ИТ-организации представляет сложную слабоструктурированную задачу, что требует соответствующей научной проработки. С учетом изложенного актуальным является разработка комплексного подхода к оценке технологической эффективности стратегического профиля ИТ-организации, обеспечивающего на формальной основе анализ взаимосвязанных и разнородных по своим свойствам компонентов и выбор наилучшей альтернативы с учетом заданных требований и ограничений.

### 1. Структурная модель эволюционного развития информационных технологий

Совокупность функционально взаимосвязанных компонентов по мере их совершенствования приводит к появлению новых ИТ, переходу на новый технологический уклад, что может быть представлено в виде эволюционного процесса. Эволюционное развитие информационных технологий как

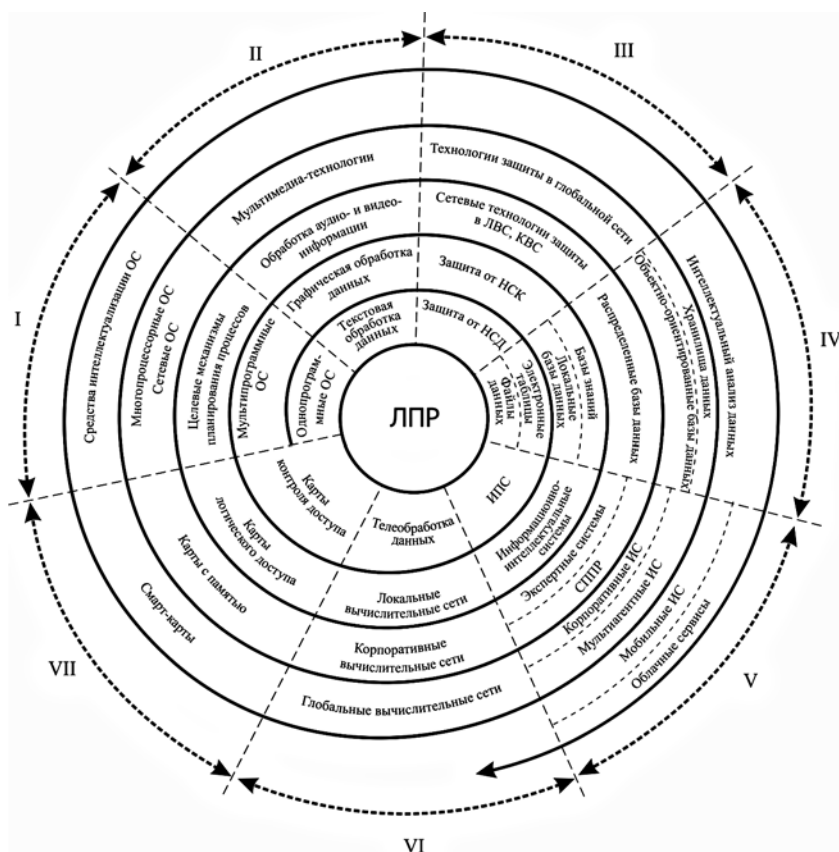
средства управления основывается на законах науки об управлении — кибернетики. Автором статьи на основе опыта создания и внедрения в организациях автоматизированных информационных систем разных поколений была разработана структурная модель эволюционного развития ИТ [5], которая с течением времени уточняется и наращивается. Приведенная на рисунке структурная модель систематизирует эволюционное развитие ИТ по секторам, определяющим отдельные направления, и по циклам, которые формируются путем включения компонентов существующих и новых секторов по мере их формирования. Цикл, пройденный по спирали, отражает новый уровень развития ИТ. В каждом секторе отражается развитие определенного направления ИТ, в совокупности определяющих операционную среду для лица, принимающего решения (ЛПР). Структура приведенной модели состоит из семи секторов и включает: I — системное программное обеспечение; II — электронную обработку данных; III — защиту данных и программного обеспечения; IV — технологии управления данными; V — автоматизацию функций управления; VI — сетевые технологии; VII — технологии доступа в открытых системах.

Анализ эволюционного развития ИТ приводит к следующим выводам: чем выше уровень развития информационных технологий, тем больше объем получаемой информации, выше быстродействие ее обработки и степень формализации интеллектуальной деятельности ЛПР и автоматизации функций управления. Исходя из этого, формулируются общесистемные критерии эффективности стратегического ИТ-профиля организации:

- максимальный уровень автоматизации поддержки принятия решений (число автоматически выполняемых функций сбора, хранения, обработки, отображения данных);
- максимальный объем получаемой информации, необходимой для принятия решений;
- максимальное быстродействие обработки информации при минимизации непроизводительных затрат.

### 2. Система унифицированных показателей статической и динамической частей информационных технологий

Любая новая технология должна быть встроена в существующую инфраструктуру при целевой установке сохранения баз данных и знаний, что требует выполнения дополнительных



Структурная модель эволюционного развития информационных технологий организации

интеграционных задач. В данной работе рассматриваются вопросы оценки эффективности стратегического ИТ-профиля организации в части программного обеспечения и информационных ресурсов. Исходя из структурной модели эволюционного развития информационных технологий, стратегический ИТ-профиль организации включает различные компоненты, которые характеризует определенный набор показателей. Для оценки эффективности ИТ-профиля необходимо создать систему унифицированных показателей, которая является основой для построения критериального пространства и реализации вычислительных алгоритмов. Система унифицированных показателей направлена на достижение: надежности функционирования информационных систем и реализации сервисов по информационному сопровождению производственных процессов; совместимости программного обеспечения на уровне функциональных приложений и данных; необходимого уровня конформности отдельных компонентов и ИТ в целом; необходимого уровня защиты информационных ресурсов организации.

В целях построения системы унифицированных показателей в структуре ИТ-организации выделяют статическую и динамическую части, определяющие соответственно надежность информационного обеспечения производственных процессов и направления развития ИТ. В рамках решения поставленной задачи к статической части целесообразно отнести базы данных и знаний, к динамической части — программное обеспечение. На этапе формирования стратегического ИТ-профиля организации накопленные данные и знания рассматриваются как неизменная часть. Программное обеспечение формируют на множестве средств реализации информационных сервисов в различных их комбинациях и рассматривают как изменяемую часть стратегического ИТ-профиля.

Примерный набор унифицированных показателей, определяющих свойства баз данных и знаний, включает:

- тип структуры;
- объем базы данных (число записей);
- частоту обновления данных;
- уровень требований к надежности;
- число обслуживаемых бизнес-процессов;
- уровень секретности данных;
- допустимое время восстановления в аварийных ситуациях;
- классы решаемых задач;
- требования к уровню поддержки стандартов.

Элементы стратегического профиля, соответствующие статической части, выбирают в целях обеспечения интеграции баз данных и знаний в новой информационной среде без потери и искажения данных.

Программное обеспечение в ИТ-архитектуре организации имеет многоуровневую функциональную структуру, и в рамках решения поставленной задачи его классифицируют на следующие типы: системное ПО; системы управления базами данных; приложения общего назначения; приложения специального назначения. Указанные типы ПО характеризует определенный набор показателей, которые при общих названиях имеют разное содержание в соответствии с уровнем в функциональной структуре и назначением программных компонентов. Выделяют следующие унифицированные показатели, определяющие свойства динамической части:

- функциональность как опциональное расширение;
- надежность работы (число сбоев в единицу времени);
- степень соответствия стандартам;
- степень обеспечения безопасности;
- уровень лицензии;
- масштабируемость;
- производительность (число операций в единицу времени);
- переносимость;
- степень сложности администрирования;
- стоимостная категория.

Элементы стратегического профиля, соответствующие динамической части, выбирают в целях достижения общесистемных критериев и бесшовной интеграции программных компонентов на всех уровнях реализации информационного процесса.

Унифицированные показатели, определяющие свойства статической и динамической частей, используют для построения критериального пространства стратегического ИТ-профиля, на базе которого проводится оценка потенциалов составляющих частей и эффективность исследуемых вариантов стратегического ИТ-профиля. Статическая и динамическая части находятся в функциональной взаимосвязи в ходе реализации информационных процессов. Как показывают результаты исследования, наибольшая технологическая эффективность достигается в точке подвижного равновесия их потенциалов. Это означает, что технологические возможности ПО соответствуют техническим требованиям к информационному обеспечению производственных процессов организации.

### **3. Интегративный подход к оценке технологической эффективности стратегического ИТ-профиля**

Взаимодействие находящихся в диалектическом единстве статической и динамической частей ИТ с точки зрения конкретной организации определяет содержание соответствующего ей понятия технологической эффективности стратегического ИТ-профиля. В качестве критериев формирования ИТ-профиля можно использовать следующие: степень защиты данных; объем обрабатываемых данных; быстродействие; режим работы; функциональ-

ность; надежность и другие. Таким образом, содержание эффективности стратегического ИТ-профиля всегда контекстуально относительно рассматриваемой цели и модели оценивания. В качестве общесистемного принципа формирования стратегического ИТ-профиля организации рассматривают максимум объема получаемой информации и быстродействия ее обработки при минимизации непроизводительных затрат в ходе реализации информационных сервисов. При этом рассматриваемые компоненты ИТ представлены некоторым набором характеристик, интерпретируемых в качестве количественных и качественных показателей.

Математически общим описанием стратегического ИТ-профиля служит множество его технологических возможностей или технологическое множество. Технологическое множество  $T$  зависит от уровня развития современных ИТ и меняется со временем. Элементами этого множества являются упорядоченные пары  $(x, y)$  достижимых сочетаний векторов статической части  $x$  и динамической части  $y$ . Достижимость или реализуемость информационных сервисов или вектора  $(x, y)$  означает, что если статическая часть задана вектором параметров  $x$ , то ей будет соответствовать динамическая часть, представленная вектором  $y$ . И наоборот, если задан вектор динамической части  $y$ , то рассматриваемый вариант профиля может обеспечить реализацию сервисов, определяемых вектором  $x$ . Таким образом, если ИТ-профиль включает  $k$  видов компонент для создания  $m$  видов информационных сервисов, то его технологическое множество является подмножеством множества  $R_+^{k+m}$  неотрицательных векторов "входа" и "выхода" ( $R_+^{k+m} \subset R_+$ , где  $R_+$  — множество положительных действительных чисел), а именно:

$$T = \{ (x, y) \in R_+^{k+m} : x \in R_+^k, y \in R_+^m \}.$$

Модель стратегического ИТ-профиля, заданная множеством  $T$ , может быть описана либо отображением характеристик динамической части, либо отображением характеристик статической части. Отображение характеристик динамической части для заданного вектора характеристик статической части  $x$  имеет своим значением множество  $P(x)$  всех векторов  $y$ , которые позволяют реализовать сервисы в соответствии с заданным вектором  $x$ , т.е. множество достижимых результатов для вектора  $x$  выглядит следующим образом:  $P(x) = \{ y \in R_+^m : (x, y) \in T \}$ . При описании модели стратегического ИТ-профиля организации, заданной множеством  $T$ , отображение характеристик статической части каждому вектору динамической части  $y$  ставит в соответствие множество его достижимости  $L(y)$ , включающее все векторы  $x$ , в соответствии с которыми может быть обеспечено достижение заданного вектора  $y$ , т.е. множество достижимости вектора динамической части  $y \in R_+^m$  выглядит следующим образом:  $L(y) = \{ x \in R_+^k : (x, y) \in T \}$ .

Для стратегического ИТ-профиля, реализующего взаимосвязь статической части, задающей входной набор параметров для информационных сервисов  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k) \in R_+^k$ ,  $k > 1$ , и динамической части в виде набора альтернатив реализации сервисов, представленных вектором  $y = (y_1, y_2, \dots, y_m) \in R_+^m$ ,  $m > 1$ , в качестве меры технологической эффективности рассматривается отношение интегральной оценки показателей  $D(y_1, y_2, \dots, y_m)$  динамической части к интегральной оценке показателей  $S(x_1, x_2, \dots, x_k)$  статической части:

$$\vartheta = \frac{D(y_1, y_2, \dots, y_m)}{S(x_1, x_2, \dots, x_k)}.$$

Мера технологической эффективности ИТ-профиля показывает, насколько технологические возможности ИТ-профиля соответствуют техническим требованиям к ПО для решения производственных задач. Необходимым условием для применения данной меры является возможность отображения множества параметров, составляющих вектор  $x$ , во множество параметров, составляющих вектор  $y$ , т.е.  $x \xrightarrow{f} y$ . При построении конкретного варианта ИТ-профиля устанавливается соответствие между показателями векторов  $x$  и  $y$ .

Сравнение по эффективности некоторого числа  $n$  альтернатив реализации информационных сервисов связано с построением для каждой из них числовых интегральных оценок показателей вектора  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  и вектора  $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ . Наиболее распространенным подходом к построению интегрального показателя является использование линейных функций как линейных комбинаций отдельных показателей, взятых с определенными весовыми коэффициентами [6]. Мера технологической эффективности будет определяться как отношение взвешенной суммы выходных показателей к взвешенной сумме входных показателей, т.е. мерой технологической эффективности  $j$ -й альтернативы,  $j = 1, \dots, n$ , служит значение

$$\vartheta_j = \frac{\sum_{z=1}^m u_z y_z^j}{\sum_{h=1}^k w_h x_h^j},$$

где векторы  $y^j = (y_1^j, y_2^j, \dots, y_m^j)$  и  $x^j = (x_1^j, x_2^j, \dots, x_k^j)$  описывают соответственно "выход" и "вход" альтернативы  $j$ , компоненты векторов  $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  и  $w = (w_1, w_2, \dots, w_k)$  — неотрицательные весовые коэффициенты, характеризующие важность показателей. Таким образом, для сравнения рассматриваемых  $n$  альтернатив по технологической эффективности реализации информационных сервисов требуется

установить значения векторов  $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$  и  $w = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ .

Наибольшая технологическая эффективность стратегического ИТ-профиля достигается в точке подвижного равновесия потенциалов статической и динамической частей. Под точкой подвижного равновесия потенциалов рассматривается такое значение  $\mathcal{E}$ , при котором достигается соответствие технологических возможностей ПО для реализации заданных требований к информационным сервисам. В данной точке ПО характеризуется рациональной избыточностью, которая может быть востребована и не приводит к непроизводительным затратам. Превышение потенциала динамической части указывает на недостаточную эффективность использования ПО (повышение технологических непроизводительных затрат) и возможность повышения требований к информационному обеспечению производственных процессов. В случае превышения потенциала статической части повышается вероятность неустойчивого информационного обеспечения производственных процессов, возникает необходимость модернизации и развития ПО. Достижение уровня подвижного равновесия рассматривается как необходимое условие надежности информационного обеспечения производственных процессов при минимизации непроизводительных технологических затрат.

При построении стратегического ИТ-профиля проводится оценка степени рассогласования потенциалов статической и динамической частей. Под рассогласованием уровней потенциалов рассматривается отклонение значений эффективности ИТ-профиля от верхнего и нижнего допустимых значений, т.е.  $\mathcal{E} - \mathcal{E}^B > 0$  или  $\mathcal{E} - \mathcal{E}^H < 0$ . В этих случаях технологические возможности ПО не соответствуют заданным требованиям к информационным сервисам: избыточны при  $\mathcal{E} - \mathcal{E}^B > 0$ , недостаточны при  $\mathcal{E} - \mathcal{E}^H < 0$ . В зависимости от степени рассогласования корректируется структура ИТ-профиля.

Интегративный подход к оценке технологической эффективности стратегического ИТ-профиля позволяет также оценивать формируемые альтернативы относительно лучших возможных показателей ИТ-профиля с учетом современного уровня развития ИТ. Ключевым моментом в этой модели выступает построение границы технологических возможностей ИТ-профиля, относительно которой оценивается эффективность альтернатив. На данном этапе для оценки эффективности альтернатив рассматривается метод DEA (*Data Envelopment Analysis*) [7, 8].

В зависимости от используемого отображения измерение эффективности будет происходить либо в пространстве динамической части ИТ относительно границы множества достижимых реализаций  $P(x)$  при заданном уровне показателей статической части, либо в пространстве статической

части относительно границы множества достижимости  $L(y)$  для заданного вектора динамической части. Эффективность, определяемая в рамках отображения динамической части при заданном векторе "входов"  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ , — это граница множества  $P(x)$ , представляющая собой подмножество его Парето-эффективных точек. То есть при оценке альтернативы ИТ-профиля с помощью отображения динамической части условие ее эффективности заключается в том, что повышение показателя любого элемента динамической части сопряжено либо со снижением ценности хотя бы одного из остальных элементов, либо с увеличением потенциала статической части (повышения одного или более показателей). Аналогично, эффективность в рамках отображения статической части при заданном векторе "выходов"  $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  — это граница множества  $L(y)$ , представляющая собой подмножество его Парето-эффективных точек. Соответственно, в пространстве статической части критерий эффективности выглядит аналогичным образом — альтернатива будет эффективна только в том случае, если уменьшение в уровне потенциала статической части (любого из ее показателей) требует увеличения остальных показателей (или одного из них) либо снижения потенциала динамической части (снижения одного или нескольких показателей).

Подмножества эффективных точек в множествах  $P(x)$  и  $L(y)$  формируют границы технологических возможностей ИТ-профиля в соответствующем пространстве, и в дальнейшем относительно этих границ определяется положение альтернативы, которая идентифицирована вектором фактических значений динамической или статической части. Мера эффективности характеризует рассматриваемую альтернативу относительно границы технологических возможностей ИТ-профиля и определяется вектором фактических показателей статической части в случае, когда измерение эффективности осуществляется в пространстве статической части, и вектором фактических показателей динамической части, когда измерение проводится в пространстве динамической части.

Мера эффективности как отношение модулей вектора "входа" и вектора "выхода" используется для выбора наилучшей альтернативы из множества исследуемых альтернатив. Разность модулей вектора, характеризующего технологические возможности рассматриваемой альтернативы, и вектора, определяющего наилучшие возможные значения, показывает, насколько данная альтернатива далеко отстоит от наилучших возможных значений ИТ-профиля. Мера эффективности в пространстве статической части показывает, какие минимальные показатели по информационному обеспечению производственных процессов может обеспечить данная альтернатива ИТ-профиля. При измерении эффективности

в пространстве динамической части мера представляет собой максимальное равнопропорциональное увеличение вектора динамической части, которое рационально при заданном векторе статической части.

Интегральная оценка технологической эффективности стратегического ИТ-профиля определяется последовательно путем оценки составляющих компонентов и выбора наилучшего варианта из множества исследуемых альтернатив. Мера технологической эффективности определяется относительно границы технологических возможностей ИТ-профиля в зависимости от используемого отображения.

#### 4. Пример применения интегративного подхода на этапе формирования платформы базы данных стратегического ИТ-профиля

В данном исследовании технологическую эффективность для каждого рассматриваемого объекта будем находить из решения оптимизационной задачи и весовые коэффициенты будут определены как оптимальные значения переменных в этой задаче [9]. Нелинейная задача математического программирования имеет следующий вид:

$$\max \mathcal{D}_0 = \frac{\sum_{z=1}^m u_z y_z^0}{\sum_{h=1}^k w_h x_h^0}, \quad (1)$$

при ограничениях  $\sum_{z=1}^m u_z y_z^j / \sum_{h=1}^k w_h x_h^j \leq 1, j = 1, \dots, n;$   
 $u_z \geq \varepsilon, z = 1, \dots, m; w_h \geq \varepsilon, h = 1, \dots, k.$

Индекс 0 соответствует одному из рассматриваемых объектов  $j = 1, \dots, n$ , который на данном шаге оценивается. Переменные  $u_z$  и  $w_h$  являются весовыми коэффициентами показателей "выхода" и "входа". Задача состоит в максимизации эффективности объекта (варианта) с индексом 0 при условии, что аналогичные отношения для других рассматриваемых объектов не превышают заданной нормы. Параметр  $\varepsilon$  в задаче является бесконечно малой величиной и введен для исключения особых точек в нелинейной задаче.

Решение невыпуклой и нелинейной оптимизационной задачи (1) сводится к решению линейной задачи оптимизации с помощью преобразования Чарнеса и Купера [9]. Для этого вводим новую переменную  $t > 0$ , такую, что

$$t \sum_{h=1}^k w_h x_h^0 = 1.$$

После умножения числителя и знаменателя на  $t$  в задаче (1) выполняется замена переменных  $d_z = tu_z,$

$z = 1, \dots, m, v_h = tw_h, h = 1, \dots, k.$  В результате получается линейная задача оптимизации в виде

$$\max_{d, v} \mathcal{D}_0 = \sum_{z=1}^m d_z y_z^0 \quad (2)$$

при ограничениях

$$\sum_{h=1}^k v_h x_h^0 = 1,$$

$$- \sum_{h=1}^k v_h x_h^j + \sum_{z=1}^m d_z y_z^j \leq 1, j = 1, \dots, n,$$

$$d_z \geq \varepsilon, z = 1, \dots, m, v_h \geq \varepsilon, h = 1, \dots, k.$$

Задача (2) решается последовательно для всех исследуемых объектов. Оптимальное значение функционала и мера эффективности не зависят от выбора единиц измерения показателей при условии, что эти единицы измерения совпадают для всех исследуемых объектов  $j = 1, \dots, n$  [9].

Применение предлагаемого подхода демонстрируется ниже на примере формирования платформы базы данных в соответствии с заданными требованиями к информационным сервисам организации. В рамках стратегического ИТ-профиля выбор платформы базы данных — это один из этапов, аналогично данный подход применим и на других этапах: выбора платформы операционной системы, специализированных программных приложений, средств моделирования, средств создания функциональных модулей операционной среды специалиста, на заключительном этапе для оценки эффективности рассматриваемых вариантов ИТ-профиля.

Пусть имеются множество  $A$  требований к информационным сервисам организации, определяющее характеристики статической части ИТ-профиля, множество  $B$  показателей, характеризующих системы управления базами данных (СУБД) с точки зрения выполнения заданных требований, и расширенное множество  $C = B \cup (C \setminus B)$  рассматриваемых показателей СУБД (элементы динамической части ИТ-профиля). Множество  $A$  через отображение во множестве  $B$  представляет вектор "входов",  $C \setminus B$  (дополнение множества  $B$  до множества  $C$ ) — вектор "выходов". В табл. 1, 2 приведены исходные данные для расчетов. В табл. 1 даны значения показателей, определяющие требования к информационным сервисам организации (множество  $A$ ). Ниже приведены показатели СУБД (множество  $C$ ).

1. Поддерживаемая модель данных.
2. Допустимый объем обрабатываемых данных.
3. Допустимая частота обновления данных.
4. Обеспечиваемый уровень надежности.
5. Производительность по числу транзакций в секунду.



6. Обеспечиваемый класс информационной безопасности.

7. Эффективность средств поддержки высокой готовности.

8. Функциональные возможности.

9. Степень соответствия стандартам SQL.

10. Стоимостная категория.

Таблица 1

**Показатели информационных сервисов организации**

№ п.п.	Название показателя	Значение показателя
1	Модель данных	Реляционная
2	Объем базы данных	20 Гбайт
3	Частота обновления данных	Низкая
4	Уровень требований к надежности	Средний
5	Максимальное число транзакций в секунду	20
6	Уровень секретности данных	Низкий
7	Допустимое время восстановления данных в аварийных ситуациях	48 часов
8	Услуги по управлению данными	Традиционные
9	Уровень соответствия стандарту SQL	Средний

Таблица 2

**Значения показателей "входа" и "выхода" по экспертным оценкам**

№ п.п.	Исследуемые объекты, СУБД	Значения показателей "входа"									Значения показателя "выхода"
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Oracle	1	9	9	7	9	9	7	9	9	1
2	IBM DB/2	1	7	9	7	7	7	7	9	9	0,9
3	PostgreSQL	1	7	9	7	5	7	5	7	7	0,6
4	Microsoft SQL	1	7	7	7	5	7	7	7	7	0,8
5	MySQL	1	5	5	3	5	5	3	3	5	0,5
6	FoxPro	1	5	5	3	3	5	3	3	5	0,6
7	Interbase/Firebird	1	3	5	3	3	3	3	3	3	0,1
8	Informix	1	7	9	5	5	5	5	3	3	0,3
9	Ingres	1	5	5	3	3	3	3	3	3	0,5
10	Access	1	1	1	1	1	1	1	1	3	0,2

Таблица 3

**Результаты решения задачи**

№ п.п.	Исследуемые объекты, СУБД	Значение функционала	Вес выходного показателя	Оценка эффективности	Отклонение от технологической границы
1	Oracle	1,00	1,000	0,041	14,753
2	IBM DB/2	0,81	0,900	0,041	12,679
3	PostgreSQL	0,45	0,750	0,031	9,982
4	Microsoft SQL	0,64	0,800	0,042	9,775
5	MySQL	0,30	0,600	0,040	2,935
6	FoxPro	0,36	0,600	0,051	2,271
7	Interbase/Firebird	0,04	0,360	0,011	0
8	Informix	0,15	0,500	0,019	6,346
9	Ingres	0,25	0,500	0,049	0,813
10	Access	0,04	0,200	0,049	-5,311

В табл. 2 приведены экспертные оценки показателей исследуемых СУБД по шкале предпочтений относительно заданных требований к информационным сервисам организации, составляющих вектор "входа", и экспертные оценки показателей исследуемых СУБД в терминах нечетких множеств, составляющих вектор "выхода". С учетом исходных данных вектора "входов" строится целевая функция, подлежащая минимизации. Результаты решения задачи дробно-линейного программирования с применением симплекс-метода представлены в табл. 3.

Наилучшей альтернативой на этапе формирования платформы базы данных по результатам расчетов является вариант под номером 7. СУБД Interbase/Firebird по оценке технологических возможностей позволяет реализовать заданные требования к информационным сервисам организации, при этом имеет рациональную избыточность и в большей степени подходит по стоимостной категории.

**Заключение**

Предложенный интегративный подход к оценке стратегического профиля информационных технологий организации сочетает результаты системного анализа в форме структурной модели эволюционного развития ИТ и системы унифицированных показателей для выделенных в ИТ-архитектуре статической и динамической частей, а также оценочные модели отдельных компонентов и структур и варианта профиля в целом. Эволюционная модель развития ИТ на практике определяет информационные границы стратегического ИТ-профиля организации в современных условиях. Выделение статической и динамической частей позволяет ставить и решать задачу о нахождении рационального соотношения требований к информационному обеспечению производственных процессов и технологических возможностей формируемой ИТ-архитектуры. Предложенный интегративный подход к оценке технологической эффективности стратегического ИТ-профиля организации создает научно-методический базис для реализации информационных сервисов по критериям максимума получаемой необходимой информации для принятия решений и быстрого действия ее обработки при минимальных непроизводительных затратах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-06-00486).*

**Список литературы**

1. **Обзор** и оценка перспектив развития мирового и российского рынков ИТ // Московская биржа: сайт. — URL: <https://habrahabr.ru/company/moex/blog/250463/> (дата обращения 13.06.2016)
2. **Парфенова М. Я.** Методологические проблемы построения стратегического профиля инновационного развития информационных технологий организации // XI Всероссийская конференция "Методологические проблемы управления макросистемами". Апатиты, 26 марта — 3 апреля 2016 года. Материалы докладов. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. С. 57—59.

3. **Сухомлин В. А.** Введение в анализ информационных технологий. М.: Горячая Линия — Телеком, 2003. 432 с.
4. **Майоров А. А.** Информационные объекты в информационном поле // Образовательные ресурсы и технологии. 2015. № 1 (9). URL: [http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot\\_2015\\_1\\_66-73.pdf](http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2015_1_66-73.pdf) (дата обращения: 10.06.2016).
5. **Парфенова М. Я.** Информационное обеспечение процедур принятия решений: учеб. пособие. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2004. 194 с.
6. **Таха Х. А.** Введение в исследование операций. 6-е изд.: пер. с англ. М.: Вильямс, 2001. 912 с.

7. **Буссофиане А., Дайсон Р. Дж., Танасулис Э.** Прикладной анализ свертки данных // Российский журнал менеджмента. 2012. Т. 10, № 2. С. 63—88.
8. **Cooper W. W., Seiford L. M., Tone K.** Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver Software. 2nd ed. N. Y.: Springer, 2007.
9. **Кривоножко В. Е., Лычев А. В.** Анализ деятельности сложных социально-экономических систем. М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ имени М. В. Ломоносова; МАКС Пресс, 2010. 208 с.

**M. Ya. Parfenova, D.Sc.,** Professor, Head of the Scientific Center, e-mail: mparfenova@muiv.ru,  
S. Yu. Witte Moscow University

## Integrative Approach to Assessing the Effectiveness of the Strategic Profile of the Organization of Information Technology

*The integrative approach to evaluation of the strategic profile of organization information technology (IT) is studied in the article. The approach is based on building of a system model of IT evolutionary development and of valuation models on the basis of a set of unified indicators interconnected and diverse in their properties profile components. The static and dynamic parts are distinguished in the structure of organization information technology, they respectively determine the reliability of information support of production processes and directions of IT architecture development. A model for finding the point of mobile equilibrium potentials of static and dynamic parts of formed IT architecture is submitted, it achieves the greatest efficiency of information services, and assessment model of profile alternatives according to the limits of its technological capabilities.*

**Keywords:** information technology, strategic profile, the level of systemization, evolutionary model, information services, non-production costs

### References

1. **Obzor i ocenka perspektiv razvitiya mirovogo i rossijskogo rynkov IT** (Review and assessment of the prospects of development of the Russian and global IT market), *Moskovskaja birzha*: URL: <https://habrhabr.ru/company/moex/blog/250463/> (date of access 13.06.2016)
2. **Parfenova M.** Metodologicheskie problemy postroeniya strategicheskogo profilja innovacionnogo razvitiya informacionnyh tehnologij organizacii (Methodological problems in the construction of the strategic profile of innovative information technology development organization), *XI Vserossijskaja konferencija "Metodologicheskie problemy upravlenija makrosistemami"*, Apatity, 26 March — 3 April 2016, Materialy dokladov. Apatity: KNC RAN, 2016, pp. 57—59.
3. **Suhomlin V. A.** *Vvedenie v analiz informacionnyh tehnologij* (Introduction to Information Technology Analysis), Moscow, Gorjachaja Linija — Telekom, 2003, 432 p.
4. **Majorov A. A.** Informacionnye objekty v informacionnom pole (Information objects in the information field), *Obrazovatel'nye*

- resury i tehnologii, 2015, no. 1 (9), URL: [http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot\\_2015\\_1\\_66-73.pdf](http://www.muiv.ru/vestnik/pdf/pp/ot_2015_1_66-73.pdf) (date of access 10.06.2016).
5. **Parfenova M.** *Informacionnoe obespechenie procedur prinjatija reshenij* (Information support of decision-making procedures), *ucheb. posobie*, Ufimsk. Gos. Aviac. Tehn. un-t, Ufa, 2004, 194 p.
6. **Taha H. A.** *Vvedenie v issledovanie operacij* (Introduction to operations research). 6-e izd.: per. s angl. Moscow, Willams, 2001, 912 p.
7. **Bussofiiane A., Dajson R. Dzh., Tanasulis E.** *Prikladnoj analiz svertki dannyh* (Applied analysis of data convolution), *Rossijskij zhurnal menedzhmenta*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 63—88.
8. **Cooper W. W., Seiford L. M., Tone K.** *Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software*, 2nd ed. N. Y. Springer: 2007.
9. **Krivonozsko V. E., Lychev A. V.** *Analiz dejatel'nosti slozhnyh social'no-jekonomicheskij system* (Analysis of the activity of complex socio-economic systems). Moscow, Izdatel'skij otdel fakul'teta VMiK MGU imeni M. V. Lomonosova; MAKS Press, 2010. 208 p.

ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



# НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

№ 3

МАРТ

2017

**Главный редактор:**

**ГАЛУШКИН А. И.**

**Редакционная коллегия:**

АВЕДЬЯН Э. Д.  
БАЗИЯН Б. Х.  
БЕНЕВОЛЕНСКИЙ С. Б.  
БОРИСОВ В. В.  
ГОРБАЧЕНКО В. И.  
ЖДАНОВ А. А.  
ЗЕФИРОВ Н. С.  
ЗОЗУЛЯ Ю. И.  
КРИЖИЖАНОВСКИЙ Б. В.  
КУДРЯВЦЕВ В. Б.  
КУЛИК С. Д.  
КУРАВСКИЙ Л. С.  
РЕДЬКО В. Г.  
РУДИНСКИЙ А. В.  
СИМОРОВ С. Н.  
ФЕДУЛОВ А. С.  
ЧЕРВЯКОВ Н. И.

**Иностранные  
члены редколлегии:**

БОЯНОВ К.  
ВЕЛИЧКОВСКИЙ Б. М.  
ГРАБАРЧУК В.  
РУТКОВСКИЙ Л.

**Редакция:**

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

**Каширина И. Л., Львович Я. Е., Сорокин С. О.**

Нейросетевое моделирование формирования кластерной структуры на основе сетей ART . . . . . 228

**Михайлюк Т. Е., Жернаков С. В.**

Об одном подходе к выбору оптимальной архитектуры ПЛИС в нейросетевом логическом базисе . . . . . 233

**И. Л. Каширина**, д-р техн. наук, доц., e-mail: kash.irina@mail.ru,  
Воронежский государственный университет,  
**Я. Е. Львович**, д-р техн. наук, проф., e-mail: office@vivt.ru,  
Воронежский институт высоких технологий,  
**С. О. Сорокин**, зам. директора, e-mail: sorokin-so@mon.gov.ru,  
Министерство образования и науки Российской Федерации, Москва

## Нейросетевое моделирование формирования кластерной структуры на основе сетей ART

*Рассмотрены особенности кластеризации непрерывного потока данных с помощью нейронных сетей семейства ART. Предложена обобщенная модель работы произвольной сети семейства ART. Подробно рассмотрена реализация этапов модели для двух различных сетей семейства ART. Предложен общий подход к решению задач кластеризации данных с помощью сетей ART.*

**Ключевые слова:** нейронная сеть, дилемма стабильности-пластичности, теория адаптивного резонанса, кластеризация потока данных

### Введение

Как известно, человеческий мозг способен без труда решать сложнейшую задачу обработки бесконечного потока сенсорной информации, поступающей из окружающего его мира. Из весьма большого объема комплексных данных постоянно извлекается наиболее важная и ценная информация, обрабатывается и регистрируется в памяти для последующего использования. Причем память человека устроена так, что новые образы запоминаются, не повреждая при этом старые, а старые в то же время сохраняют способность к модификации и адаптации. В этом заключается так называемая дилемма стабильности-пластичности, т. е. проблема создания механизма, способного как к адаптации к новым образам, так и к сохранению существующих образов в процессе функционирования.

В классических нейронных сетях (многослойных перцептронах и пр.) эта проблема не решена. Как правило, обучение новому образу частично разрушает результаты предыдущего обучения. Традиционные сети требуют обучения на фиксированных наборах данных, каждый экземпляр которых должен предъявляться нейросети несколько раз последовательно, пока сеть не будет обучена всему набору. Более того, запоминание нового обучающего вектора весьма часто требует полного переобучения сети. Одним из подходов, разработанных в попытке решить данную проблему, является создание *Adaptive Resonance Theory (ART)* — теории, описывающей семейство нейронных сетей, способных генерировать устойчивые кластеры путем самоорганизации в ответ на произвольные последовательности входных образов [1, 2]. Создавая кластеры динамически при обработке различных входных сигналов, сеть семейства ART способна

регулировать их размер (количество) в зависимости от сложности и комплексности поступающего набора данных. Сети ART сохраняют пластичность, необходимую для изучения новых образов, в то же время предотвращают забывание ранее запомненных образов. Таким образом, сети семейства ART на сегодняшний день являются алгоритмом предпочтительного выбора для кластеризации непрерывного потока данных.

Алгоритмы кластеризации, используемые в сетях ART, достаточно просты, не порождают сложных громоздких вычислений, что позволяет использовать различные способы наглядной визуализации полученных результатов исследований. Подача новых данных не требует полного переобучения сети, что также положительно сказывается на ресурсоемкости. Сети ART удобно использовать для первичного анализа данных, привлекая их как средство базовой кластеризации. Визуальное представление результатов кластеризации позволяет исследователю изучать проекции кластеров, сформированных сетью, намечая направления дальнейших исследований [3, 4].

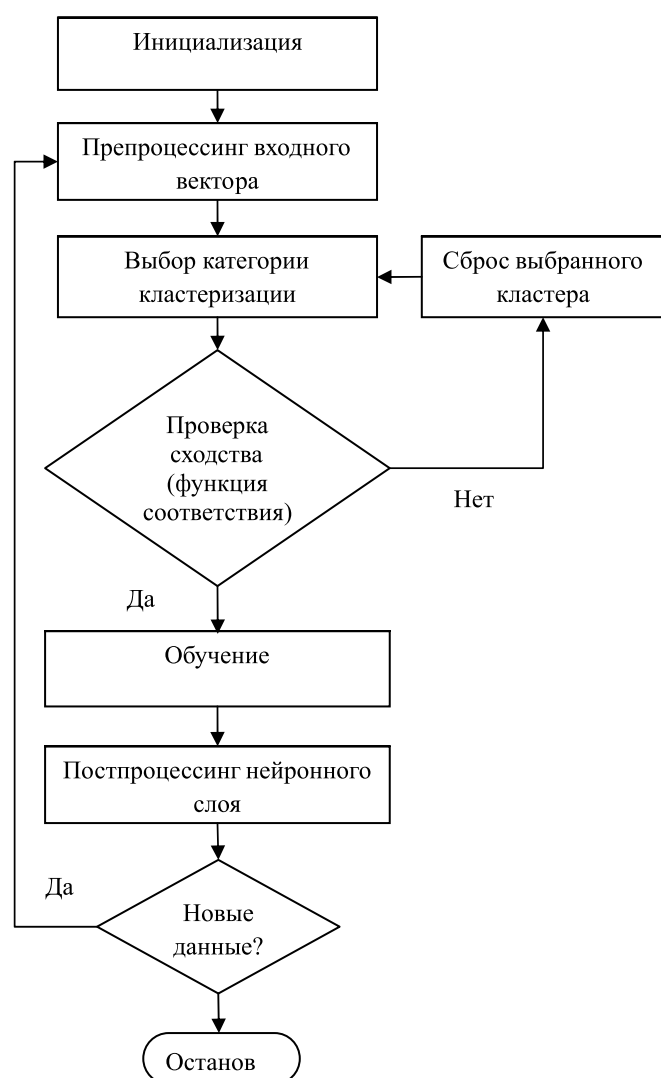
### Общие принципы функционирования сетей ART

Сформулируем общие принципы функционирования сетей ART и выделим общие этапы и принципы их функционирования. Сеть семейства ART фактически состоит из одного слоя нейронов, каждый из которых в процессе работы сети превращается в прототип соответствующего ему кластера. Свое классификационное решение сеть ART выражает в форме возбуждения одного из нейронов этого слоя. Если входной вектор не соответствует ни одному из запомненных образов, создается новый кластер посредством запоминания образа, иден-

точного новому входному вектору. Если определено, что входной вектор похож на один из ранее запомненных прототипов с точки зрения определенного критерия сходства, этот прототип будет изменяться ("обучаться") под воздействием нового входного вектора таким образом, чтобы стать похожим на этот входной вектор. Запомненный образ не будет изменяться, если текущий входной вектор окажется недостаточно похожим на него. Таким образом решается дилемма стабильности-пластичности. Новый образ может создавать дополнительные кластеры, однако не может разрушить существующую память.

Результаты системного анализа существующих алгоритмов обучения сетей ART позволяют представить в общем виде работу сети следующей блок-схемой (см. рисунок). Рассмотрим подробно все указанные в блок-схеме этапы.

**Этап 1. Инициализация сети и ее параметров.** На этом этапе создается один рабочий нейронный слой, который будет хранить результирующие ней-



Обобщенная модель работы сети семейства ART

роны, представляющие прототипы кластеров. Сеть имеет обычный слой входных нейронов, связанных со всеми нейронами слоя прототипов весами  $w_{ij}$ . Также на этом этапе задаются параметры, определяющие работу сети, такие как скорость обучения или критерий сходства. С помощью этих параметров происходит подстройка работы сети в соответствии с желаемым результатом.

**Этап 2. Препроцессинг входных векторов.** Перед тем, как вектор будет подан на слой входных нейронов, происходит его обработка исходя из конкретного типа сети и базовых знаний о характере входных данных. Это может быть нормировка, очистка от шумов, комплементация и прочие преобразования, необходимые для функционирования соответствующего подвида сетей.

**Этап 3. Выбор категории кластеризации** (с использованием так называемой функции выбора). На этом этапе сеть делает первичную оценку входного вектора с помощью некой функции сходства. Эта функция, как правило, основана на одной из существующих метрик расстояния между векторами.

**Этап 4.** Далее активируется какой-то нейрон из слоя прототипов, и его веса вместе с входным вектором подаются на вход так называемой *функции соответствия* — элемента сети, который придает процессу нелинейность и в определенном смысле соответствует той части процесса распознавания, которая отвечает за существующие жесткие критерии схожести. То есть, например, классифицируя объект, мы можем сначала предположить, что он относится к классу А, но по наличию отдельных признаков затем рассудить, что этому классу он принадлежать не может и нам следует искать другой вариант. В этом случае сеть деактивирует среагировавший на функцию выбора нейрон (удаляет его из перебора на следующей итерации) и запускает процесс выбора заново. Если же прототип и вектор успешно проходят проверку функцией соответствия, наступает следующий этап — обучение прототипа.

**Этап 5. Обучение.** На этом этапе происходит подстройка весов прототипа кластера, вызвавшего реакцию функции выбора с помощью соответствующей функции обучения. Если же ни один из существующих прототипов не прошел проверку функцией соответствия, то создается новый кластер на базе нераспознанного вектора. Активируется новый нейрон, вектору весов которого присваивается входящий вектор.

**Этап 6.** После окончания процесса обучения в сети может быть предусмотрена *постобработка всего слоя нейронов* — например, если для сети задано ограничение на общее число кластеров. Кластеры могут быть объединены или разъединены в соответствии с требуемыми условиями.

Таким образом, при решении конкретной задачи кластеризации необходимо определиться с выбором вариации модели сети семейства ART (что за-

висит от выбранной структуры данных) и провести наполнение представленных алгоритмических этапов. В качестве примера рассмотрим реализацию описанных в схеме этапов для двух различных сетей ART.

### Реализация этапов модели для сети ART-2а

Параметрами сети ART-2а являются  $\beta$  — скорость обучения,  $\theta$  — параметр нормализации и  $\rho$  — критерий схождения [5]. Сеть использует в качестве входных векторы произвольной размерности с вещественными компонентами. Исходные векторы  $Y^i$  ( $i = \overline{1, I}$ ) нормализуются к единичной длине, после чего координаты, меньшие параметра  $\theta$ , приравниваются к 0 и векторы еще раз нормализуются. Таким образом подавляются случайные малые возмущения в исходных данных, снижающие качество кластеризации. В качестве функции схождения используется функция косинуса угла между соответствующими векторами, которая в случае нормализованных векторов равна их скалярному произведению:

$$T_k = M_k = (Y^i, w^k) = \sum_{j=1}^J y_{ij} w_j^k, \quad (1)$$

где  $T_k$  — значение функции выбора для  $k$ -го кластера;  $M_k$  — соответствующее значение функции соответствия;  $w^k$  — текущий вектор-прототип  $k$ -го кластера;  $J$  — размерность входного вектора. Таким образом, на этапе 3 выбирается кластер с номером  $s = \arg \max_k T_k$ , а на этапе 4 для него проверяется условие  $M_s > \rho$ , где  $\rho$  — так называемый критерий схождения, представляющий собой условную оценку требуемой однородности векторов в кластере. Отметим, что при заданных таким образом функция отпадает потребность в механизме сброса (временной деактивации) нейронов, для которых не выполнено условие соответствия. Это упрощает структуру алгоритма и ускоряет его функционирование.

Если прототип кластера удовлетворяет условию схождения, проводится обучение этого прототипа путем изменения его весов с целью сделать его более похожим на входной вектор:

$$w^{k+1} = \frac{(1-\beta)w^k + \beta Y^i}{\|(1-\beta)w^k + \beta Y^i\|}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — параметр, обозначающий скорость обучения. После этого новый вектор весов прототипа нормализуется. Параметр  $\beta$  выбирается в зависимости от того, требуется ли проводить выявление долговременных закономерностей (малые значения параметра) или следить за тенденциями в изменении данных (высокие значения). Выбор уровня схождения  $\rho$  более сложен, так как в общем случае общее представление о структуре исходных данных может отсутствовать. Отсюда вытекает главный не-

достаток сети ART-2а — бесконтрольное увеличение числа кластеров в процессе работы при больших значениях параметра и слияние данных в один большой кластер при малых. Поэтому при использовании этой сети необходимо постепенное снижение параметра скорости обучения в целях стабилизации числа кластеров.

### Реализация этапов модели для сети Fuzzy ART

Другой способ работы с вещественными входными векторами предлагает сеть Fuzzy ART, требующая масштабирования данных в пределах [0, 1]. Работа сети регулируется параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ , где  $\beta$  и  $\rho$  используются по аналогии с сетью ART-2а, а  $\alpha$  — сверхмалое число (порядка  $10^{-6}$ ), препятствующее окончательному вырождению прототипов. В качестве функции выбора используется один из возможных вариантов реализации нечеткого И:

$$T_k = \frac{|Y^i \wedge w^k|}{\alpha + |w^k|}, \quad (3)$$

где оператор  $\wedge$  определяется как  $(p \wedge q)_j = \min(p_j, q_j)$ ,  $j = \overline{1, J}$ , а норма  $|p| = \sum_i p_i$ .

В отличие от ART-2а, в этой сети используется механизм сброса — временная деактивация кластера при невыполнении условия схождения. Поэтому выбор кластера на этапе выбора категории кластеризации определяется как  $s = \arg \max_k T_k$ ,  $k \in Q$ , где  $Q$  — множество активных (не деактивированных) на данном этапе узлов, после чего выбранный прототип сверяется с входным вектором с помощью функции соответствия.

Функция соответствия определяется следующим образом:

$$M_s = \frac{|Y^i \wedge w^s|}{|Y^i|}. \quad (4)$$

Выбор кластера осуществляется при выполнении условия  $M_s \geq \rho$ , где  $\rho$  — критерий схождения. В случае нарушения условия кластер помечается как неактивный и снова вызывается функция выбора. Если активных кластеров не осталось, создается новый с весами, эквивалентными входному вектору. Функция обучения: веса прошедшего проverka прототипа модифицируются как

$$w^{t+1} = (1-\beta)w^t + \beta(Y^i \wedge w^t). \quad (5)$$

Поскольку в данном варианте после обучения веса прототипов не нормализуются, то возникает проблема, связанная с функцией обучения. Используемый оператор "нечеткого И" приводит к постоянной тенденции уменьшения значений координат векторов. Это уменьшение при определенных условиях может приводить к вырождению прототипов кластеров. Для решения проблемы вырождения векторов на этапе препроцессинга предлагает-

ся применять к входным векторам так называемое комплементарное кодирование —  $J$ -мерный вектор превращается в  $2J$ -мерный путем дополнения его  $J$  компонентами:  $y_{i(J+j)} = 1 - y_{ij}$ , что сохраняет его амплитудную информацию и в то же время отражает минимумы и максимумы равномерно.

### Решение задач кластеризации данных с помощью сетей семейства ART

Общая схема подхода к решению задач кластеризации данных с помощью рассмотренных сетей семейства ART имеет следующий вид.

**Этап 1. Выбор методики препроцессинга.** На этом этапе осуществляется предварительная обработка входных данных с помощью одного или нескольких методов.

1. **Ранжирование координат.** Имея данные о важности или приоритетности отдельных входных признаков, можно проранжировать порядок следования координат каким-либо образом, после чего масштабировать исходные векторы соответственно этим приоритетам (например, первая координата масштабируется в отрезок  $[0, 1]$ , вторая — в отрезок  $[0, 95]$  и т. д. Это очевидным образом изменит логику кластеризации в соответствии с нашими пожеланиями.

2. **Нормализация.** В сети ART-2а желательно иметь дело с нормированными входными векторами. В работе [6] предлагается использовать нормализацию и для сетей Fuzzy ART, дополняя при этом каждый вектор еще одной координатой, равной его длине до нормализации. Методика имеет свои плюсы и минусы, описанные в соответствующей работе.

3. **Очистка от шумов.** Шумы (ошибочные значения) в координатах легко устраняются с помощью введения в логику сети параметра, определяющего предельные границы возможных значений элементов данных, при выходе за которые будет происходить масштабирование соответствующих координат.

4. **Комплементация.** Это процесс, удваивающий размерность входного вектора и позволяющий предотвратить вырождение прототипов при использовании функций выбора и обучения, близких по логике к применяемым в сети Fuzzy ART.

**Этап 2. Определение функций выбора, соответствия и обучения.** После препроцессинга определяется соответствующий набор функций выбора, соответствия и обучения. Обобщенная модель, предложенная выше на рисунке, позволяет с легкостью заменять эти функции в любой момент обработки, поскольку формат и общая логика работы сети принципиально едины для всех случаев.

**Этап 3. Выбор методики постпроцессинга.** Данный этап позволяет компенсировать недостатки конкретной модели семейства ART. Остановимся подробнее на некоторых примерах постпроцессинга. Например, сеть ART-2а устроена так, что для нее существует серьезная зависимость результата от

порядка поступления входных векторов [5]. Поэтому при реальном функционировании системы в качестве анализатора конечного пакета данных необходимо подавать их при каждой итерации на вход в случайном порядке.

Другой пример: одним из общих недостатков семейства является, как уже упоминалось, сложность подбора параметра сходства  $\rho$  или его аналога — некой интегральной оценки похожести векторов. Результатом его неправильного выбора может стать, в крайних случаях, слияние всех данных в один кластер или бесконтрольное увеличение числа категорий. Хорошим средством преодоления этой проблемы является использование методики постпроцессинга, направленной на ограничение числа кластеров.

Так как заранее не всегда очевидно, на сколько кластеров требуется разбить исходные данные, предлагается для определения искомого параметра сходства воспользоваться следующим подходом. Задается верхняя граница допустимого числа кластеров  $K$ . В начале функционирования параметр  $\rho$  задается равным 1 (или близким к 1). Если очередной вектор не удовлетворяет функции соответствия ни для одного из существующих кластеров, а их число уже равно предельному, значение параметра  $\rho$  уменьшается до тех пор, пока не станет возможным либо отнести вектор к одному из кластеров, либо объединить какие-то два кластера в один. Иначе говоря, в случае достижения числом кластеров заданного значения  $K$ :

1) текущий входной вектор добавляется к существующим кластерам как еще один новый кластер;

2) ищется  $R_{ml} = \max\{R_{ij}\}$ ,  $\forall i, j = \overline{1 \dots K}$ ,  $i \neq j$ , где пара индексов  $(m, l)$  является номерами кластеров, чьи прототипы наиболее близки в смысле функции соответствия,  $R_{ij}$  — расстояние между прототипами кластеров  $i$  и  $j$ . Далее объекты кластера  $l$  обучаются прототипом кластера  $i$  в соответствии с заданной функцией обучения;

3) кластер  $m$  удаляется;

4) если найденное  $R_{ml} < \rho$ , то устанавливается  $\rho = R_{ml}$ .

Описанный подход достаточно универсален, его очевидным образом можно применить для модификации как сети ART-2а, так и Fuzzy ART.

### Заключение

Как уже отмечалось, основное преимущество сетей ART заключается в том, что они не "забывают" редко появляющихся образов. Один раз сформировавшись, достаточно изолированный кластер в дальнейшем не исчезнет, что обеспечивает стабильность накопленной аналитической информации. Если в поступающих данных снова возникнет близкий образ, он будет успешно распознан и отнесен к этому изолированному кластеру. В то же время сеть гибко модифицирует кластеры, прото-

типы которых отражают часто встречающиеся элементы. Это позволяет ей реагировать на изменение ситуации, сохраняя накопленные "редкие" знания и образуя новые, что весьма актуально для современных методов интеллектуального анализа данных [7]. Таким образом, с помощью сетей семейства ART можно формировать кластерную структуру непрерывного потока данных. В настоящей работе предложен обобщенный алгоритм формирования подобной структуры и описаны методы повышения качества функционирования сетей.

#### Список литературы

1. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир, 1992. 184 с.

2. Carpenter G., Grossberg S. Adaptive Resonance Theory. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2003. P. 87–90.

3. Каширина И. Л., Львович Я. Е., Сорокин С. О. Модели и численные методы оптимизации формирования эффективной сетевой системы с кластерной структурой // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 9. С. 657–662.

4. Каширина И. Л., Львович Я. Е., Сорокин С. О. Оптимизационное моделирование редукции сетевых систем с кластерной структурой // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2015. № 3. С. 62–67.

5. Grossberg S. Adaptive Resonance Theory: How a brain learns to consciously attend, learn, and recognize a changing world // Neural Networks, 2013. N. 37. P. 1–47.

6. Carpenter G. A., Grossberg S., Rosen D. B. Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system // Neural Networks, 1991. N. 4. P. 759–771.

7. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Холод И. И., Тесс М. Д., Елизаров С. И. Анализ данных и процессов. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.

I. L. Kashirina, D.Sc., Associate Professor, e-mail: kash.irina@mail.ru,  
Voronezh State University,

Ya. E. Lvovich, D.Sc., Professor, e-mail: office@vvt.ru,  
Voronezh Institute of High Technologies,

S. O. Sorokin, Deputy Director of the Department, e-mail: sorokin-so@mon.gov.ru  
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

## Neural Network Modeling of the Formation of Cluster Structures on the Basis of the Networks Art

*In the article the peculiarities of clustering continuous data stream using neural networks the family of Adaptive Resonance Theory (ART). These neural networks are able to generate stable clusters by self-organization in response to arbitrary sequences of input patterns. ART neural network creates clusters dynamically in processing different input signals. It is able to adjust their size (number) depending on the complexity of the incoming data set.*

*ART Networks retain plasticity necessary to explore new images at the same time prevent forgetting previously stored images. To date, developed several kinds of neural networks based on adaptive resonance theory, in particular, the network ART-1 and ART-2, ART2-A, Fuzzy ART, etc. However, despite the similarity of the basic principles of operation of these networks, in the literature there is no unified approach to the description of their operation and training.*

*The aim of the study is to construct a universal generalized model of work of an arbitrary network ART family. In addressing the specific problems of clustering using this model, you need to choose the type of ART network (depending on the selected data structures) and generate content presented algorithmic steps. The article details the implementation of the steps discussed in the model for two different networks ART: ART-2a and Fuzzy ART using continuous input vectors. Each of these methods is largely parameterized, so the authors also proposed algorithms adjust the values of each of the parameters of these networks.*

**Keywords:** neural network, stability-plasticity dilemma, adaptive resonance theory, clustering data stream

#### References

1. Wasserman F. *Nejrokomputernaja tehnika: Teorija i praktika* (Neurocomputer technique: Theory and practice). M.: Mir. 1992. 184 p. (in Russian)

2. Carpenter G., Grossberg S. *Adaptive Resonance Theory*. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. Second Ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2003, pp. 87–90.

3. Kashirina I. L., Lvovich Ja. E., Sorokin S. O. Модели и численные методы оптимизации формирования эффективной сетевой системы с кластерной структурой (Models and numerical optimization methods form an effective marketing system with a cluster structure), *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 9, pp. 657–662 (in Russian).

4. Kashirina I. L., Lvovich Ja. E., Sorokin S. O. Оптимизационное моделирование редукции сетевых систем с кластерной структурой (Optimization modeling the reduction of network systems with cluster structure), *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii*, 2015, no. 3, pp. 62–67. (in Russian).

5. Grossberg S. Adaptive Resonance Theory: How a brain learns to consciously attend, learn, and recognize a changing world, *Neural Networks*, 2013, no. 37, pp. 1–47.

6. Carpenter G. A., Grossberg S., Rosen D. B. Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system, *Neural Networks*, 1991, no. 4, pp. 759–771.

7. Barsегян А. А., Куприянов М. С., Холод И. И., Тесс М. Д., Елизаров С. И. *Анализ данных и процессов* (Analysis of the data and processes). SPb.: BHV-Peterburg. 2009. 512 p. (in Russian)



**Т. Е. Михайлюк**, аспирант, e-mail: realotoim@mail.ru,  
**С. В. Жернаков**, д-р техн. наук, проф., e-mail: zhsviit@mail.ru,  
Уфимский государственный авиационный технический университет

## Об одном подходе к выбору оптимальной архитектуры ПЛИС в нейросетевом логическом базисе

*Рассматриваются подходы к реализации аппаратных нейронных сетей на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Показаны особенности и ограничения классической реализации нейросетей. Предлагается модель аппаратно-ориентированной нейронной сети. Показаны преимущества реализации предложенного метода в нейросетевом базисе на основе ПЛИС по сравнению с существующими подходами.*

**Ключевые слова:** ПЛИС, ППВМ, булева нейронная сеть, сигма-пи нейронная сеть, проблема исключающего ИЛИ

### Введение

В настоящее время все большую популярность приобретают альтернативные методы обработки информации, отличающиеся от "классических" программных реализаций. Одним из таких альтернативных направлений является создание алгоритмов и математического обеспечения на основе нейронных сетей. Универсальные свойства распределенного процесса обработки и высокая надежность таких архитектур в перспективе позволят разрабатывать унифицированные вычислительные узлы, обладающие не только способностями обучения, дообучения и обобщения в рамках одной задачи, но также возможностью самостоятельно наращивать вычислительные мощности и адаптироваться к большинству задач.

Следует отметить, что большинство современных реализаций нейросетевого базиса является не чем иным, как имитационным моделированием нейронной сети на основе последовательного алгоритма [1–4]. Однако, несмотря на то что такой алгоритм, реализованный на распределенной процессорной системе, имеет высокое быстродействие, ее возможности (системы) ограничиваются не только последовательной эмуляцией нейронов каждым из процессорных элементов, но и дополнительными ограничениями, связанными с размерами сети. Производительность такой нейронной сети уменьшается с ростом числа связей и числа слоев. Как правило, вычислительная платформа, использующая процессорную архитектуру, является избыточной при решении многих задач. Это особенно актуально для приложений, использующих максимальное распараллеливание арифметических операций, а также отличающихся "характером" вычислительного процесса.

Существующие аппаратные реализации нейронных сетей на микросхемах ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы) отличаются неэффективным использованием собствен-

ных ресурсов микросхемы за счет "отображения" математической составляющей формального нейрона в стандартные элементы вычислительной техники, такие как сумматоры и умножители, поэтому на практике полностью аппаратная реализация сложной нейросети приводит к резкому увеличению занимаемой площади кристалла [5]. Таким образом, использование вместо традиционных процессоров и микроконтроллеров, специализированных вычислителей, нейровычислителей, ПЛИС и других аналогичных вычислительных платформ показывает необходимость разработки собственного математического, методологического, алгоритмического и программного обеспечения, специально предназначенного для автоматического синтеза оптимальной конфигурации вычислительной платформы под каждую конкретную решаемую задачу.

### Постановка задачи

Нейронные сети представляют собой высокопараллельные вычислительные устройства, позволяющие решать широкий спектр задач, однако существующие методы их программной и аппаратной реализации не в полной мере раскрывают потенциал, заложенный в них. Программные модели сетей имеют большую вычислительную мощность, но в то же время при их практической реализации — невысокое быстродействие. Аппаратно-ориентированные архитектуры параллельны, имеют большую скорость обработки, но достаточно "требовательны" к существующей элементной базе. Аппаратная реализация нейронной сети представляет собой многопроцессорную систему, в которой каждый нейрон представлен процессорным элементом, т. е. моделирует работу машины Тьюринга (обработка информации отдельным слоем осуществляется последовательно) [1, 3, 5], что приводит к снижению эффективности использования аппаратных ресурсов и избыточности сети в целом. Таким образом, необходима разработка новых подходов к более

оптимальному использованию имеющихся аппаратных средств при построении высокопроизводительных нейронных сетей. Современное состояние решения данной задачи требует обоснования и разработки математического аппарата, а также адаптации его для реализации широкого спектра задач в различных прикладных областях (робототехника, авиация, медицина, информационная безопасность и т.д.).

### Основные понятия из теории нейронных сетей

Рассмотрим классический бинарный нейрон ступенчатой функцией активации:

$$y = f(w_0x_0 + w_1x_1 + b),$$

где  $x_0, x_1$  — логические переменные  $\{0, 1\}$ ,  $w_0, w_1$  — вещественные числа.

Формула функции активации:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases}$$

Смещение  $b$  примем равным нулю. Нетрудно рассчитать число возможных функций, реализуемых данным нейроном (табл. 1).

В табл. 1  $\bar{0}$  — параметр не равен нулю,  $\bar{x}_0 \bar{x}_1, \bar{x}_0 x_1, x_0 \bar{x}_1, x_0 x_1$  — комбинации входов, соответствующие значениям  $\{0, 0\}, \{0, 1\}, \{1, 0\}, \{1, 1\}$ .

Объясним полученные закономерности.

1. Строка 2 табл. 1. Вариант, при котором  $w_0 = w_1 = 0$ , т. е. нейрон не активирован  $f(0) = 0$ .

2. Строки 3 и 4 табл. 1. Вариант, при котором нейрон имеет всего один вход и может быть либо инвертором, либо повторителем.

3. Строка 5 табл. 1. Вариант, при котором  $w_0 \neq 0, w_1 \neq 0$ .

Таблица 1

Определение возможных функций, реализуемых бинарным нейроном

$w_0$	$w_1$	$\bar{x}_0 \bar{x}_1$	$\bar{x}_0 x_1$	$x_0 \bar{x}_1$	$x_0 x_1$	$y$
0	0	0	0	0	0	$f(0) = 0$
0	$\bar{0}$	0	$w_1$	0	$w_1$	$f(0) = 0, f(w_1)$
$\bar{0}$	0	0	0	$w_0$	$w_0$	$f(0) = 0, f(w_0)$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	0	$w_1$	$w_0$	$w_0 + w_1$	$f(0) = 0, f(w_0), f(w_1), f(w_0 + w_1)$

Таблица 2

Функции, реализуемые бинарным нейроном при нулевом смещении

$f(0)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$f(w_0)$	0	0	0	0	1	1	1	1
$f(w_1)$	0	0	1	1	0	0	1	1
$f(w_0 + w_1)$	0	1	0	1	0	1	0	1

Составим таблицу возможных значений функции активации (табл. 2). Анализ табл. 2 показывает, что число возможных комбинаций функции  $f$  равно 8. Однако действительно возможны только шесть вариантов. Комбинации 0110 ( $w_0 > 0$  и  $w_1 > 0$ ) и 0001 ( $w_0 < 0$  и  $w_1 < 0$ ) не имеют смысла ввиду противоречия.

В табл. 2  $f(0), f(w_0), f(w_1), f(w_0 + w_1)$  — выходные значения нейрона, соответствующие входным значениям  $\{0, 0\}, \{0, 1\}, \{1, 0\}, \{1, 1\}$ .

Из табл. 2 видно следующее.

1. Нейрон реализует ограниченное число функций, так как известно, что максимальное число возможных функций двух логических переменных равно 16. Отсюда возникает проблема классификации нелинейно разделимых образов (задача XOR).

2. При реализации такого нейрона на элементах вычислительной техники вещественные веса целесообразно заменить на логические эквиваленты так, чтобы выполнялась функция нейрона.

3. Операции сложения и умножения вырождаются в операции "ИЛИ" и "И" соответственно. Операция вычисления функции активации не требует дополнительных вычислительных ресурсов.

Ситуация существенно изменяется при введении смещения  $b$ . Нетрудно проверить, что при  $b \leq 0$  появляется возможность вычисления операции "И", а при  $b > 0$  нейрон реализует дополнительные функции из числа возможных, за исключением "исключающего ИЛИ-НЕ". Таким образом, максимальное число реализуемых функций нейрона составляет 14 из 16 возможных.

Реализация нейрона, имеющего непрерывные значения свободных параметров в виде цифровых узлов, не представляется возможной, поэтому определение разрядности этих векторов является актуальной задачей цифровой нейронной сети. Поскольку нейронная сеть является предметно-ориентированным вычислителем, разрядность свободных параметров также можно адаптировать к решаемой задаче. В этом случае сеть может иметь дополнительный параметр, характеризующий оптимальность ее реализации на кристалле. Определим минимальную длину соответствующих векторов, при которой нейрон полностью реализует все множество функций. В аппаратной реализации нейрон будет иметь оптимальную разрядность всех вычислительных элементов. Понятно, что целесообразно рассматривать свободные параметры  $b, w_1, w_2$  как целые числа. Соответствующая таблица отображения вектора выходных функций в значения свободных параметров приведена ниже (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что область определения свободных параметров  $b \in [-1; 2], w_1 \in [-1; 1], w_2 \in [-1; 1]$ , где  $b, w_1, w_2 \in \mathbb{Z}$ . После процесса преобразования в двоичный код общая длина вектора составит семь разрядов, а общее число возможных состояний свободных параметров превысит макси-

Таблица 3

Соответствие логических функций двух переменных свободным параметрам бинарного нейрона

Тип функции $y$	$x_1x_0$				Свободные параметры		
	00	01	10	11	$\beta$	$w_1$	$w_2$
Постоянный ноль	0	0	0	0	0	0	0
"И"	0	0	0	1	-1	1	1
Запрет $x_0$	0	0	1	0	0	-1	1
$x_1$	0	0	1	1	0	0	1
Запрет $x_1$	0	1	0	0	0	1	-1
$x_0$	0	1	0	1	0	1	0
Исключающее "ИЛИ"	0	1	1	0	-	-	-
"ИЛИ"	0	1	1	1	0	1	1
Стрелка Пирса	1	0	0	0	1	-1	-1
Исключающее "ИЛИ-НЕ"	1	0	0	1	-	-	-
$\bar{x}_0$	1	0	1	0	1	-1	0
Импликация $x_0 \rightarrow x_1$	1	0	1	1	1	-1	1
$\bar{x}_1$	1	1	0	0	1	0	-1
Импликация $x_1 \rightarrow x_0$	1	1	0	1	1	1	-1
Штрих Шеффера	1	1	1	0	2	-1	-1
Постоянная единица	1	1	1	1	1	0	0

мальное число функций в 8 раз. Из этого следует, что для обучения такого нейрона или подобной нейронной сети на основе метода полного перебора потребуется значительно больше итераций, чем минимально необходимое время обучения. Это происходит в том случае, когда сеть имеет нулевую ошибку на выходе, т. е. умеет распознать все возможные предъявляемые ей образы. В то же время это свидетельствует о том, что вероятность попадания в область локального минимума у такой сети существенно выше, что может привести к увеличению скорости обучения или эффекту "паралича" нейронной сети.

Для создания суммирующего элемента, как следует из изложенного выше, необходимо использовать трехразрядный сумматор, несмотря на то что входной вектор состоит из двух бит. От нейрона с большим числом входов (или их разрядности)

можно ожидать многократного увеличения аппаратных затрат.

### Обзор реализаций нейронных сетей

В настоящее время существует большое число моделей нейронных сетей, способных решать самые разнообразные задачи. Зачастую основной вопрос их применения связан с выбором той или иной математической модели нейронной сети и алгоритма ее обучения. Классическим приемом является использование цифровой электронно-вычислительной машины (ЦЭВМ) общего назначения с программным описанием нейронной сети и алгоритма обучения (в режиме эмуляции) [5]. Такой подход имеет существенное преимущество относительно других — его универсальность, однако решение задач посредством нейронных сетей предполагает наличие ориентированности на их выполнение. Отсюда вытекают известные недостатки нейроэмуляции.

Различают цифровые программные и аппаратные нейронные сети (рис. 1). Цифровые аппаратные сети могут быть построены на совокупности логических элементов и элементов памяти, задающих модель искусственного нейрона. В данном случае логические элементы используются в основном для задания сумматоров, умножителей и управляющей логики. Элементы памяти предназначены для хранения весов и задания функций активации. По такому же принципу к аппаратным нейросетям можно отнести аналоговые сети, использующие, однако, непрерывную обработку сигнала и аналоговые электронные компоненты.

Прототипирование цифровых нейросетей более целесообразно на начальном этапе проектирования, так как они позволяют получить работоспособное устройство быстрее аналогового эквивалента. Кроме того, разработка аналоговой нейронной сети большого размера требует значительных вложений. Однако по мере увеличения числа вхо-

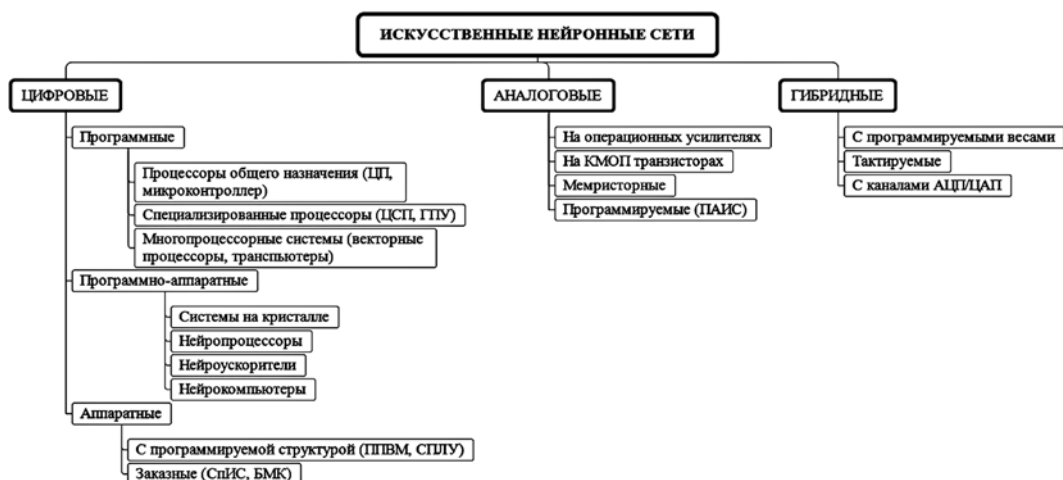


Рис. 1. Классификация реализаций нейронных сетей

дов нейронной сети и требований по быстродействию актуальность применения аналогового устройства повышается. Это связано со значительными задержками при распространении сигнала через сеть и резким увеличением аппаратных затрат при увеличении числа входов сети. Аналоговые нейронные сети, обладая наименьшей гибкостью и большой сложностью исполнения, позволяют достичь максимально эффективного использования ресурсов и наименьшего потребления. Гибридные нейронные сети получили свое название благодаря использованию наиболее подходящих свойств цифровых и аналоговых сетей. Например, в аналоговом нейроне проще реализовать операцию сложения, но хранить и настраивать весовые коэффициенты лучше в цифровом виде. Производительность гибридных нейросетей несколько ниже, чем аналоговых, но их реализация проще, а точность выше.

### Формализация подхода в нейросетевом базисе

Программируемые пользователем вентиляльные матрицы (ППВМ) являются одной из разновидностей ПЛИС и находят широкое применение для быстрого прототипирования цифровых устройств. Их структура представляет собой матрицу конфигурируемых логических блоков (CLB), соединенных программируемыми коммутационными матрицами. Каждый логический блок состоит из некоторого числа генераторов логических функций (LUT) и D-триггеров. Архитектура данного типа микросхем позволяет создавать максимально гибкие решения в области цифровой электроники, обладающие высоким быстродействием и параллелизмом.

Несмотря на большое число конфигурируемых логических блоков на кристалле размеры нейронной сети, не использующей в качестве элементарных процессоров (нейронов) последовательно-циклические конструкции, ограничены. Поэтому задача поиска оптимальной топологии сети с наименьшим использованием ресурсов микросхемы при сохранении максимального быстродействия является актуальной задачей. К решению данной задачи можно отнести следующие методы:

- решение части задачи "неинтеллектуальными" методами;
- уменьшение числа нейронов и связей сети в процессе обучения;
- использование математических преобразований, кодирования, сжатия;
- адаптация разрядности весовых коэффициентов под конкретную решаемую задачу;
- подбор математических моделей, эффективно реализуемых в конкретном аппаратном базисе.

Приведенные методы можно использовать на разных уровнях архитектуры нейросреды, поэтому они дополняют друг друга и их совместное применение способствует поиску наилучшего решения рассматриваемой задачи.

Поскольку примеры использования первых трех методов рассмотрены в литературе [6—8], для данного исследования интерес представляют последние два. Чтобы дополнить понимание адаптации разрядности, рассмотрим "классическую" модель аппаратного нейрона [9, 10]. Она состоит из двух умножителей, двух сумматоров и блока вычисления функции активации с разрядностями  $\pi$ ,  $\sigma$  и  $\psi$  соответственно (рис. 2). Для определения их оптимальных значений примем за основу недопустимость следующих положений:

1) падение точности на выходе элемента вследствие уменьшения разрядности выходной шины относительно входной;

2) потеря информации при стыковке элементов вследствие несогласованности разрядности шин;

3) избыточность аппаратных ресурсов вследствие неоправданного расширения разрядности шин.

На рис. 2  $n_1, n_2, n_1 + n_2, \psi(n_1 + n_2)$  — разрядности элементов нейрона;  $x_0, x_1$  — входы;  $w_0, w_1, b$  — весовые коэффициенты и смещение.

Исходя из обозначенных выше положений, составим систему неравенств для допустимых разрядностей элементов нейрона:

$$\begin{cases} \max(n_x; n_w) \leq \pi(n_x; n_w) \leq n_x + n_w + 1, \\ \pi(n_x; n_w) \leq \sigma(\pi(n_x; n_w)) \leq \pi(n_x; n_w) + 1, \\ 1 \leq \psi(\sigma(\pi(n_x; n_w))) \leq n_x, \end{cases}$$

где  $n_x, n_w$  — разрядности входов и весов соответственно;  $\pi, \sigma, \psi$  — разрядности выходов умножителя, сумматоров и функции активации,  $n_x, n_w, \pi, \sigma, \psi \in N_0$ .

Рассмотрим полученные зависимости подробнее. Система неравенств определена для каждого типа элемента нейрона. Минимальная разрядность умножителя не может быть меньше максимальной разрядности одной из входных шин, иначе это приведет к избыточности аппаратных ресурсов и потере информации. Максимальное значение выходной разрядности не может превысить суммы входных разрядностей, так как дальнейшее увеличение не имеет смысла. Сумматор должен быть согласован с умножителем, поэтому его разрядность не превы-

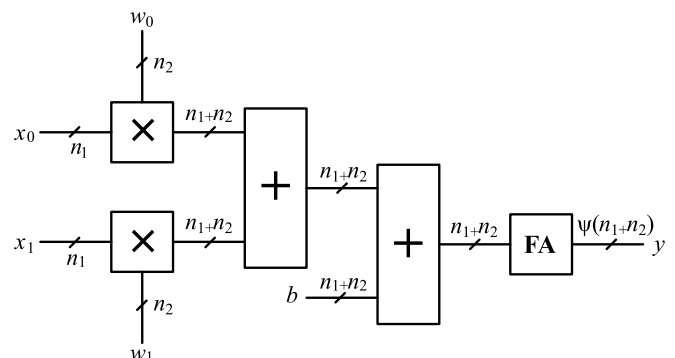


Рис. 2. Классическая структура аппаратной реализации нейрона

шает значения, большего  $\pi$  на единицу, соответствующую биту переноса. Минимальная разрядность для функции активации может быть равна 1 для нейрона со ступенчатой функцией активации. Согласованность выхода функции активации нейрона со входом нейрона следующего слоя достигается при значениях  $\sigma$ , не превышающих значения  $n_x$  следующего слоя. Решая данную систему относительно разрядностей весов и входных сигналов, можно сделать вывод о том, что разрядность первых не превышает разрядности вторых. Таким образом, максимально "плавная" настройка нейрона достижима при их равенстве. Уменьшение же разрядности весов связано с реализацией нейросети для конкретной задачи. Разрядность весов не должна превышать разрядности входов и при этом должна быть достаточной для достижения точности вычисления.

Поскольку аппаратный базис микросхем ППВМ представлен матричной структурой логических элементов, целесообразно использовать модели булевых нейронных сетей [11]. В связи с этим в качестве альтернативного метода аппаратной реализации нейросети на ППВМ предлагается использовать разработанную модель, принадлежащую к классу булевых  $\Sigma\Pi$ -нейронных сетей (БСПНС) [12]. В данной модели нейрон можно описать следующим выражением:

$$y = f\left(\sum_n w_n \Phi_n(x)\right) = f\left(\sum_n \prod_p \varphi_{np}(w_n, x)\right), \quad (1)$$

где  $w$  — весовой коэффициент;  $\Phi(x)$  — функция преобразования радиального нейрона;  $\varphi$  — функция преобразования пи-нейрона сигма-пи ( $\Sigma\Pi$ -нейронной сети).

Такую модель нейрона можно одновременно считать сетью. В некотором смысле она напоминает

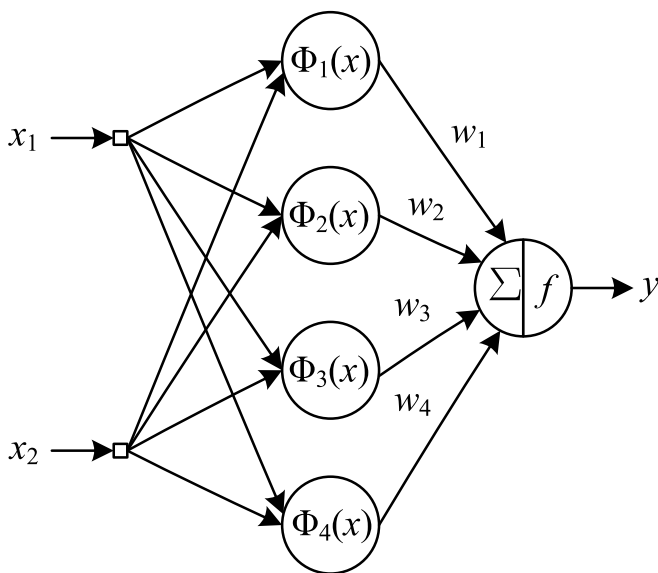


Рис. 3. Бинарная  $\Sigma\Pi$ -нейронная сеть

радиально-базисную сеть [13]. Благодаря мультипликативной обработке входных векторов достигается большая нелинейность преобразования и эффективность в работе с линейно-неразделимыми функциями. Отличие полученной БСПНС сети от существующих заключается в большей совместности с микросхемами ППВМ. Кроме того, в процессе обучения неиспользуемые функции  $\Phi_n$  перестают принимать участие в вычислениях, тем самым проявляя сходство с биологической сетью. Граф бинарной  $\Sigma\Pi$ -нейронной сети представлен на рис. 3. Первый слой сети осуществляет мультипликативное преобразование  $\Phi_n(x)$ , т.е. является  $\Pi$ -слоем. Второй слой представлен  $\Sigma$ -нейроном с функцией активации  $f$ .

На рисунке 3  $x_1, x_2$  — входы,  $w_1, w_2, w_3, w_4$  — весовые коэффициенты.

### Выбор оптимальной конфигурации ППВМ (на примере задачи XOR)

Сложение по модулю 2 (Исключающее "ИЛИ", XOR) — это булева функция от двух переменных, принимающая значение "ЛОЖЬ" ("ИСТИНА"), если аргументы равны (не равны) [14]. Функции XOR являются классическим примером нелинейно-разделимых функций (рис. 4).

Так, попытки реализации данной функции предпринимались с самого раннего появления нейронных сетей. В работе [15] была показана ограниченность однослойного перцептрона для решения данной задачи. Однако применение сетей с большим числом слоев и нелинейными функциями активации позволяет справиться с этой и другими задачами по нелинейному разделению элементов множества.

Для демонстрации преимуществ разрабатываемого подхода были рассмотрены три модели решения задачи исключающего "ИЛИ". В первом случае использовали "классическую" модель аппаратного нейрона [9, 13], во втором случае — модель нейрона с оптимизированной разрядностью. Общим моделям соответствует структура, показанная на рис. 2. Для первого эксперимента были выбраны разрядности входных сигналов и свободных параметров  $n_x = n_w = n_b = 32$ . Так как исходным нейроном яв-

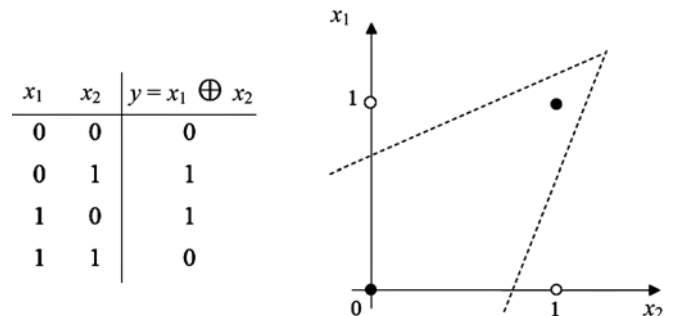


Рис. 4. Функция XOR как пример нелинейно-разделимых функций

## Обсуждение результатов

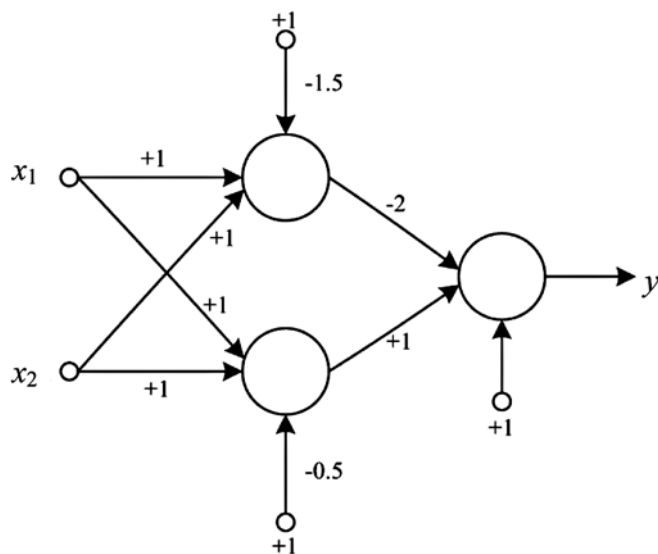


Рис. 5. Граф модели решения задачи XOR

ляется нейрон МакКаллока-Питтса, введенная функция  $\psi(\sigma(\pi(n_x; n_w)))$  уменьшает разрядность суммы до одного разряда. Параметры обученного графа сети показаны на рис. 5. Вершинами графа являются нейроны МакКаллока-Питтса, весовые коэффициенты и смещения также представлены на рис. 5.

Нейрон с оптимизированной разрядностью отличается тем, что разрядность всех его элементов уменьшена до значения, достаточного для реализации поставленной задачи. Поэтому во втором эксперименте разрядности составили  $n_x = 1$ ,  $n_w = 2$ ,  $n_b = 3$ . В целях эксперимента архитектуры, имеющие элементы конвейеризации, не рассматривали, так как очевидно, что они требуют большее количество ресурсов микросхемы. Предлагаемая модель сети обучилась на соответствующую задачу топологию, и в отличие от предыдущих моделей, разрядность ее свободных параметров перестала влиять на затрату ресурсов. Для моделирования была использована микросхема xc5vlx110 фирмы Xilinx. Результаты сравнения приведены в табл. 4.

Таблица 4

### Используемые ресурсы микросхемы после процесса обучения

Модель сети	LUT элементы	Регистровые элементы	Выходы микросхемы	Разрядность нейрона, бит		
				$n_x$	$n_w$	$n_b$
"Классическая" реализация	7080	6	65	32	32	32
"Классическая" реализация с оптимизированной разрядностью	39	0	3	1	2	3
БСПНС	1	0	3	1	0	0

Анализ результатов показывает, что "классическая" реализация нейрона приводит к значительному использованию ресурсов микросхемы. После процесса оптимизации разрядности нейрона затрачиваемых ресурсов на его реализацию становится гораздо меньше. Подход на основе БСПНС сети позволяет использовать ресурсы микросхемы максимально эффективно. Это связано с тем, что для "классической" реализации элементарным компонентом сети является неделимый нейрон, не способный подстраивать свою внутреннюю архитектуру, так как ее видоизменение в сторону упрощения выполнимо лишь при уменьшении разрядности всех его вычислительных узлов. Однако известно, что любое вычислительное устройство, реализуемое на ППВМ, состоит из множества элементарных LUT-таблиц [16]. Разработанный тип нейросети позволил преодолеть эту проблему путем анализа неиспользуемых LUT-таблиц и связей, освобождая ресурсы микросхемы. Полученная нейронная сеть не моделирует работу вычислительного узла, а становится этим узлом в процессе обучения и адаптации, тем самым ее избыточность стремится к избыточности самого узла, так как конечная архитектура сети в точности совпадает с архитектурой вычислительного узла. Несмотря на то что "классическая" реализация предполагает использование конвейерной обработки и тем самым повышает быстродействие, устройство все же требует дополнительных тактов на его заполнение [17]. Новый подход показал возможность сокращения числа дополнительных тактов без потери максимальной производительности.

Полученная нейронная сеть является "микросетью", способной порождать другие нейронные сети и вычислительные узлы. Она примитивна, имеет слабую способность к обобщению, но обладает максимальным параллелизмом и производительностью. Ошибка такой сети может быть полностью сведена к нулю только при подаче всех образов на ее входы. Такая сеть может быть универсальным аппроксиматором логических функций. Она позволяет на своей основе создавать любые функциональные логические зависимости, не зависящие от времени, т.е. имеет однозначную определенность входных и выходных образов. После стадии обучения уменьшаются размеры сети вместе с процессом аппаратной адаптации под требуемую функцию. Данный процесс можно представить схематично (рис. 6).

На первом этапе сеть покрывает максимальную площадь кристалла и занимает гораздо больше ресурсов, нежели требуемая. По мере предъявления образов происходит сокращение числа используемых функций  $\phi_i$ , тем самым уменьшая ее размер. Стадия адаптации размеров сети позволяет получить оптимизированное аппаратное решение пос-

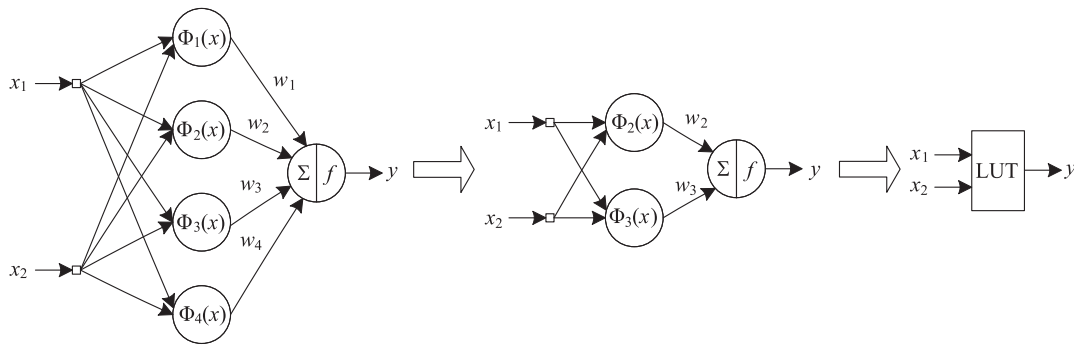


Рис. 6. Процесс адаптации топологии нейросети

тавленной задачи, имеющее максимальную степень параллелизма и быстродействия. На последнем этапе сеть "концентрируется" в таблицах LUT. В связи с элементарностью отдельных нейронов вытекает свойство большей управляемости степенью надежности системы, т.е. для повышения надежности не требуется создавать дополнительные аппаратно-избыточные нейроны. Поэтому степень надежности архитектуры становится более управляемой и прогнозируемой величиной. Также данный подход позволяет избавить реализацию нейронной сети от необходимости хранения действительных значений весов на кристалле. В данном подходе они являются мнимыми и существуют только на стадии обучения, что полностью исключает затраты памяти и задержки на их обработку.

### Заключение

В данной работе предложен новый подход к реализации аппаратных нейронных сетей. Предлагается модель оптимизированного нейрона и сети на его основе. Такой подход требует дальнейших исследований и является перспективным для быстродействующих, универсальных машин для нейросетевой обработки данных. Работа в данной области может быть связана с построением адаптивных вычислительных устройств, позволяющих самостоятельно обучаться выполнению логических операций с повышенным быстродействием. Кроме того, применение интеллектуального подхода на этапах проектирования устройства может обеспечить ускорение операций минимизации сложных вычислительных узлов.

### Список литературы

1. Korani R., Hajera H., Imthiazunnisa B., Chandra Sekhar R. FPGA modelling of neuron for future artificial intelligence applications // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2013. Vol. 2, N. 12. P. 4763—4768.
2. Грибачев В. Элементная база аппаратных реализаций нейронных сетей // Компоненты и технологии: сайт. URL: [http://kit-e.ru/articles/elcomp/2006\\_8\\_100.php](http://kit-e.ru/articles/elcomp/2006_8_100.php) (дата обращения: 30.06.2016).

3. Мезенцева О. С., Мезенцев Д. В., Лагунов Н. А., Савченко Н. С. Реализация нестандартных моделей нейронов на векторном процессоре Neugomatrix // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. Т. 131, № 6. С. 178—182.

4. Adetiba E., Ibikunle F. A., Daramola S. A., Olajide A. T. Implementation of Efficient Multilayer Perceptron ANN Neurons on Field Programmable Gate Array Chip // International Journal of Engineering & Technology. 2014. Vol. 14, N. 1. P. 151—159.

5. Борисов К. Е. Критический анализ различных архитектурных подходов к построению нейросред. URL: <http://katorp.narod.ru/txt/mympm.htm> (дата обращения: 30.06.2016).

6. Васильев В. И., Ильясов Б. Г., Кусимов С. Т. Нейрокомпьютеры в авиации (самолеты): учеб. пособие для вузов. Сер. "Нейрокомпьютеры и их применение", под общ. ред. А. И. Галушкина, кн. 14. М.: Радиотехника, 2003. 496 с.

7. Nakkiran P., Alvarez R., Prabhavalkar R., Parada C. Compressing Deep Neural Networks using a Rank-Constrained Topology // Proceedings of Annual Conference of the International Speech Communication Association (Interspeech). Dresden, Germany, 6—10 September 2015. P. 1473—1477.

8. Matteucci M., Spadoni D. ELeaRNT: Evolutionary Learning of Rich Neural Network Topologies. URL: <https://www.ml.cmu.edu/research/dap-papers/matteucci-cmu-cald-02-103.pdf> (дата обращения: 10.09.2016).

9. Manchev O., Donchev B., Pavlitov K. FPGA implementation of artificial neurons // Electronics: An Open Access Journal. BULGARIA, Sozopol, 22—24 September 2004. URL: [http://fett.tu-sofia.bg/et/2004/Papers/Microelectronics/Paper-B\\_Donchev2.pdf](http://fett.tu-sofia.bg/et/2004/Papers/Microelectronics/Paper-B_Donchev2.pdf) (дата обращения: 30.06.2016).

10. Omondi A. R., Rajapakse J. C. FPGA Implementations of Neural Networks // Springer, 2006. URL: [http://lab.fs.uni-lj.si/lasin/wp/IMIT\\_files/neural/doc/Omondi2006.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/lasin/wp/IMIT_files/neural/doc/Omondi2006.pdf) (дата обращения: 30.06.2016).

11. Anthony M. Boolean Functions and Artificial Neural Networks. URL: <http://www.cdam.lse.ac.uk/Reports/Files/cdam-2003-01.pdf> (дата обращения: 10.09.2016).

12. Zhang C., Yang J., Wu W. Binary Higher Order Neural Networks for Realizing Boolean Functions. // IEEE Transactions on Neural Networks. 2011. Vol. 22, N. 5. P. 701—713.

13. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. М.: Вильямс, 2008. 1104 с.

14. Википедия. Свободная библиотека. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Сложение\\_по\\_модулю\\_2](https://ru.wikipedia.org/wiki/Сложение_по_модулю_2) (дата обращения: 10.09.2016).

15. Minsky M., Papert S. Perceptrons: an introduction to computational geometry. Cambridge: MA, 1988.

16. Virtex-5 FPGA User Guide. UG190 (v5.4), 2012. March 16 // Xilinx: All Programmable. URL: [http://www.xilinx.com/support/documentation/user\\_guides/ug190.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug190.pdf) (дата обращения: 30.06.2016).

17. Михайлюк Т. Е., Жернаков С. В. К вопросу об аппаратной реализации модуля потокового шифрования для комплексной системы защиты информации // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 3 (63). С. 138—148.

T. E. Mikhailyuk, Postgraduate Student, e-mail: realotoim@mail.ru,  
S. V. Zhernakov, D. Sc., Professor, e-mail: zhsviit@mail.ru,  
Ufa State Aviation Technical University

## On an Approach to the Selection of the Optimal FPGA Architecture in Neural Network Logical Basis

The article discusses approaches to hardware neural networks implementations using programmable logic devices (PLD) of field programmable gate array (FPGA) type. The aim of the study is to develop new approaches for improving the compatibility of neural networks with hardware. The features and limitations of the classical implementation of neural networks are shown. The classification of neural networks according to the method of realization is considered. The advantages and disadvantages of existing implementations are described. The formalized approach applying to the considering of the hardware neuron bit depth influence on chip resources is described. The model of optimized neuron and hardware-oriented boolean sigma-pi neural network (BSPNN) based on it are presented. The mathematical model of the network is obtained. The advantages of the proposed method realization in the neural network basis using FPGA compared to existing approaches are shown. The results of chip resource utilization reduction on the example of the "exclusive OR" problem are presented. The process of neural network topology adaptation for solving this problem is shown. The applicability of this technology for the universal machines of neural network processing is concluded.

**Keywords:** PLD, FPGA, Boolean Neural Network, Sigma-Pi Neural Network, hardware utilization, "XOR" problem

### References

1. Korani R., Hajera H., Imthiazunnisa B., Chandra Sekhar R. FPGA modelling of neuron for future artificial intelligence applications, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2013, vol. 2, no. 12, pp. 4763–4768.
2. Gribachev V. Jelementnaja baza apparatnyh realizacij nejronnyh setej (Element base of hardware implementations of neural networks). Available at: [http://kit-e.ru/articles/elcomp/2006\\_8\\_100.php](http://kit-e.ru/articles/elcomp/2006_8_100.php) (accessed 30 June 2016).
3. Mezenceva O. S., Mezencev D. V., Lagunov N. A., Savchenko N. S. Realizacija nestandartnyh modelej nejronov na vektornom processore Neuromatrix (Implementations of non-standard models of neuron using Neuromatrix), *Izvestija Juzhnogo Federal'nogo universiteta. Tehniceskie nauki*, 2012, vol. 131, no. 6, pp. 178–182.
4. Adetiba E., Ibikunle F. A., Daramola S. A., Olajide A. T. Implementation of Efficient Multilayer Perceptron ANN Neurons on Field Programmable Gate Array Chip. *International Journal of Engineering & Technology*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 151–159.
5. Borisov K. E. Kriticheskiy analiz razlichnyh arhitekturnykh podhodov k postroeniju nejrosred (Critical analysis of different architectural approaches to neural environment building). Available at: <http://katpop.narod.ru/txt/mympt.htm> (accessed 30 June 2016).
6. Vasil'ev V. I., Il'jasov B. G., Kusimov S. T. *Nejrokomp'yutery v aviacii (samolety)* (Neurocomputers in aviation (aircrafts)). Moscow: Radiotekhnika, 2003. 496 p.
7. Nakkiran P., Alvarez R., Prabhavalkar R., Parada C. Compressing Deep Neural Networks using a Rank-Constrained Topology, *Proceedings of Annual Conference of the International Speech Communication Association (Interspeech)*, Dresden, Germany, 6–10 September 2015, pp. 1473–1477.
8. Matteucci M. *ELeaRNT: Evolutionary Learning of Rich Neural Network Topologies*. Available at: <https://www.ml.cmu.edu/research/dap-papers/matteucci-cmu-cald-02-103.pdf> (accessed 10 September 2016).
9. Manchev O. FPGA implementation of artificial neurons, *Electronics: An Open Access Journal*, Bulgaria, Sozopol, 22–24 September 2004. Available at: [http://fett.tu-sofia.bg/et/2004/Papers/Microelectronics/Paper-B\\_Donchev2.pdf](http://fett.tu-sofia.bg/et/2004/Papers/Microelectronics/Paper-B_Donchev2.pdf) (accessed 30 June 2016).
10. Omondi A. R., Rajapakse J. C. *FPGA Implementations of Neural Networks*, Springer, 2006. Available at: [http://lab.fs.uni-lj.si/lasin/wp/IMIT\\_files/neural/doc/Omondi2006.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/lasin/wp/IMIT_files/neural/doc/Omondi2006.pdf) (accessed 30 June 2016).
11. Anthony M. Boolean Functions and Artificial Neural Networks. Available at: <http://www.cdam.lse.ac.uk/Reports/Files/cdam-2003-01.pdf> (accessed 10 September 2016).
12. Zhang C., Yang J., Wu W. Binary Higher Order Neural Networks for Realizing Boolean Functions, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, vol. 22, no. 5, pp. 701–713.
13. Hajkin S. Nejrornyje seti: Polnyj kurs (Neural Networks: A Comprehensive Foundation). M.: Vil'jams, 2008. 1104 p.
14. Wikipedia. *Free Encyclopedia*. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (accessed 10 September 2016).
15. Minsky M., Papert S. *Perceptrons: an introduction to computational geometry*, Cambridge, MA, 1988.
16. *Virtex-5 FPGA User Guide*. UG190 (v5.4) March 16, 2012. Available at: [http://www.xilinx.com/support/documentation/user\\_guides/ug190.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug190.pdf) (accessed 30 June 2016).
17. Mihajljuk T. E., Zhernakov S. V. K voprosu ob apparatnoj realizacii modulja potokovogo shifrovaniya dlja kompleksnoj sistemy zashchity informacii (On the question of hardware implementation module streaming encryption for comprehensive information security system), *Vestnik UGATU*, 2014, vol. 18, no. 3 (63), pp. 138–148.

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Технический редактор Е. В. Конова.

Корректор З. В. Наумова.

Сдано в набор 29.12.2016. Подписано в печать 21.02.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ317. 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.