

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 24  
2018  
№ 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Левин В. И.** Интервальные уравнения в задачах исследования неопределенных систем . . . . . 147
- Гермашев И. В., Дербишер В. Е., Дербишер Е. В., Маркушевская Е. А.** Анализ нечетких данных для оптимизации химико-технологических систем . . . . 153
- Асадов Х. Г., Джахидзаде Ш. Н., Керимова М. И.** Метод дискретно-вариационной оптимизации систем дистанционного зондирования . . . . . 160

### WEB-ТЕХНОЛОГИИ

- Антоненко В. А., Смелянский Р. Л., Ермилов А. А., Романов А. Р., Пинаева Н. М., Плакунов А. В.** Платформа управления виртуальными сетевыми функциями С2 . . . . . 165
- Мальцева С. В., Думский Д. В., Комаров М. М.** Исследование рынка новых доменных имен . . . . . 173

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

- Печников Д. А.** Модели обеспечения оперативности процесса критериально-ориентированного тестирования . . . . . 182
- Тимофеева Т. В., Нестеренко М. А.** Параметризация кривых в AutoCAD на примере овалов Кассини . . . . . 189

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Карпова И. П.** Хранение и обработка распределенных данных в группе мобильных роботов . . . . . 194
- Кобзаренко Д. Н., Камилова А. М., Газанова Н. Ш., Дадашев А. М.** Применение непрерывного вейвлет-преобразования в изучении временных рядов ветромониторинга на примере Дагестана . . . . . 201
- Савин С. И., Ворочаева Л. Ю., Мальчиков А. В., Ворочаев А. В.** Метод генерации последовательности шагов для шестиногого внутритрубного робота, перемещающегося по пространственно-изогнутым трубам, с использованием развертки трубы . . . . . 209

#### 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

## INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 24  
2018  
No. 3

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

### CONTENTS

#### MODELING AND OPTIMIZATION

- Levin V. I.** Interval Equations in Problems of Research of Uncertain Systems . . . . 147
- Germashev I. V., Derbisher V. E., Derbisher E. V., Markushevskaya E. A.** The Fuzzy Data Analysis for the Chemical-Technological Systems Optimization . . . . 153
- Asadov H. H., Jahidzadeh Sh. N., Kerimova M. I.** Method of Discrete Variation Optimization of Remote Sensing Systems . . . . . 160

#### WEB TECHNOLOGIES

- Antonenko V. A., Smeliansky R. L., Ermilov A. A., Romanov A. R., Pinaeva N. M., Plakunov A. V.** C2: Cloud Platform with NFV Life-cycle Management . . . . . 165
- Maltseva S. V., Dumsky D. V., Komarov M. M.** The Market Research of New gTLD . . . 173

#### INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION

- Pechnikov D. A.** Model Ensure Efficiency of Process Criteria-Oriented Testing . . . 182
- Timofeeva T. V., Nesterenko M. A.** Parametrization of Curves in AutoCAD by the Example of Cassini's Ovals . . . . . 189

#### APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES

- Karpova I. P.** Distributed Data Storage and Processing for Mobile Robotic Groups 194
- Kobzareno D. N., Kamilova A. M., Gazanova N. Sh., Dadashev A. M.** Application of Continuous Wavelet-Transformation in the Study of Time Series of Wind Monitoring on the Example of Dagestan . . . . . 201
- Savin S. I., Vorochaeva L. Yu., Malchikov A. V., Vorochaev A. V.** An Approach to Step Sequence Generation Problem for an In-Pipe Robot with Six Legs Designed to Move in Spatially-Curved Pipes, Based on Unwrapping of the Pipe . . . . . 209

#### 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.,  
Пензенский государственный технологический университет

## Интервальные уравнения в задачах исследования неопределенных систем

*При моделировании технических, экономических, социальных систем часто возникает необходимость решения уравнений с интервально-определенными параметрами (интервальные уравнения). Решение таких уравнений требует специальных методов, отличных от методов решения обычных, детерминированных уравнений. Предложен новый метод решения интервальных уравнений, основанный на аппарате интервальной математики. Целью работы является разработка полностью формализованного метода решения интервальных уравнений, базирующегося на упомянутом математическом аппарате. Предложенный в статье метод заключается в использовании эквивалентных преобразований обеих частей интервального уравнения по законам интервальной математики, позволяющих перейти от интервального уравнения к обычным детерминированным уравнениям и их последующему решению известными методами. Показано, что решение разнообразных интервальных уравнений можно выполнить двумя различными методами: множественным и интервальным. Выявлены различия между этими двумя методами в понятии решения уравнения, в используемом математическом аппарате, в возможности точного решения, в мощности получаемого множества решений. Приведен пример решения двумя методами интервального уравнения, используемого при расчете зоны загрязнения опасным веществом. Предложен новый подход к решению интервальных уравнений, основанный на эквивалентном преобразовании уравнения по законам интервальной математики. Такое преобразование позволяет привести уравнение к детерминированному виду, что дает возможность решить его хорошо известными методами решения обычных (детерминированных) уравнений. Предложенный подход позволяет находить точное решение интервального уравнения (если оно существует) или его приближенное решение (если точного решения не существует).*

**Ключевые слова:** интервал, интервальная функция, интервальное уравнение, множественный метод, интервальный метод

### Введение

Современная наука и практика успешно справляются с задачами исследования систем с полностью определенными параметрами. Они формулируются как задачи расчета, анализа и синтеза различных функций с детерминированными параметрами, служащих характеристиками изучаемых систем. Но на практике чаще встречаются системы с неполностью определенными параметрами. Причины появления таких систем:

- естественная неопределенность реальных процессов, происходящих в системах;
- неточное задание параметров большинства систем из-за погрешности при их вычислении или измерении;
- изменение во времени параметров систем;
- необходимость совместного исследования семейств однотипных систем, имеющих сходные функции-характеристики и различающихся лишь значениями параметров этих функций.

Исследование введенных неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих характеристиками данных систем. Эти задачи сложнее их упомянутых выше детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с детерминированными параметрами. Это усложнение — результат того, что алгебра недетерминированных чисел всегда сложнее алгебры детерминированных чисел.

В настоящей работе рассматриваются задачи нахождения корней интервальных уравнений. Эти уравнения отличаются от обычных (полностью определенных) уравнений тем, что их параметры — неполностью определенные и задаются в виде интервалов возможных значений. Интервальные уравнения встречаются на практике, например, в задачах оптимизации систем в условиях неопределенности, при нахождении критических точек характеристик и точек пересечения характеристик неполностью определенных (эмпирических) моделей и т. д.

## Постановка задачи

Рассмотрим обычное (детерминированное) уравнение с одной переменной

$$f(P, x) = 0. \quad (1)$$

Здесь  $f$  — некоторая детерминированная функция,  $x$  — детерминированная переменная,  $P$  — детерминированный вектор параметров вида

$$P = (p, q, \dots, s). \quad (2)$$

Если заменить в уравнении (1) детерминированный вектор параметров  $P$  вектором параметров  $\tilde{P}$  вида

$$\tilde{P} = (\tilde{p}, \tilde{q}, \dots, \tilde{s}),$$

где  $\tilde{p} = [p_1, p_2]$ ,  $\tilde{q} = [q_1, q_2]$ , ...,  $\tilde{s} = [s_1, s_2]$  — интервальные параметры, то детерминированная функция  $f$  перейдет в соответствующую интервальную функцию  $\tilde{f} = [f_1, f_2]$ , а вещественное число 0 — в соответствующее интервальное число  $\tilde{0} = [0, 0]$ . В результате детерминированное уравнение (1) перейдет в интервальное уравнение вида

$$\tilde{f}(\tilde{P}, x) = \tilde{0}. \quad (3)$$

Уравнение (3) и будет объектом нашего изучения. Основной задачей этого изучения является нахождение корня (множества корней) уравнения (3), т. е. значений переменной  $x$ , которые обращают значение левой части уравнения в значение его правой части, т. е. в интервальный нуль  $\tilde{0}$ . Эта задача, в отличие от задачи решения обычного уравнения, носит неоднозначный характер. Это связано с тем, что пересечение интервальных кривых, определяющее корни интервального уравнения (3), может пониматься в различных смыслах. Этот эффект не возникает при пересечении обычных кривых, с которым связано решение обычного уравнения.

## Обзор литературы

Хотя необходимость решения интервальных и других неточно определяемых (стохастических, нечетких и т. д.) уравнений возникает достаточно часто на практике [1–5], систематическое изучение таких уравнений и методов их решения началось сравнительно недавно. По-видимому, первое упоминание об интервальных уравнениях и методах их решения появилось в книге [6]. В этой работе использован множественный подход, при котором интервальное уравнение (3) рассматривается как множество образующих его обычных уравнений (1), получаемых при варь-

ровании их параметров  $P$  в границах заданных интервальных параметров  $\tilde{P}$ . При этом множество решений интервального уравнения получается как множество решений указанных, образующих его обычных уравнений. Аналогичный подход используется в работе [7] для решения конкретного интервального уравнения, возникающего в важной прикладной задаче расчета длины опасной зоны загрязнения поверхности токсичным веществом. Краткий обзор различных ситуаций, возникающих при решении практических задач с помощью указанного подхода, приведен в работе [8]. При этом рассматриваются как ситуации, моделируемые уравнениями с одним корнем, так и ситуации, моделируемые уравнениями с двумя или несколькими корнями. Наконец, в книге [9] был предложен другой, чисто интервальный подход к решению интервальных уравнений вида (3), при котором такое уравнение рассматривается не как множество обычных уравнений вида (1), а как одно уравнение, имеющее интервальные параметры и потому подчиняющееся законам интервальной математики. Использование этих законов позволяет совершать эквивалентные преобразования интервального уравнения, упрощая его и приводя к детерминированному виду, из которого непосредственно вытекает его решение.

Таким образом, предложенные в литературе подходы к решению интервальных уравнений существенно различаются по определению того, что считать решением уравнения, и по используемому математическому аппарату. Кроме того, они различаются по своим возможностям в отыскании корней уравнений. В частности, чисто интервальный подход, в отличие от множественного подхода, не всегда обеспечивает существование точного решения интервального уравнения. Однако отсутствие точного решения такого уравнения является не недостатком интервального подхода, а следствием неопределенности задачи, выражающейся в задании параметров уравнения с точностью лишь до интервалов возможных значений [10, 11].

## Множественный подход

Будем решать интервальное уравнение (3), используя множественный подход. Рассмотрим первый случай, когда последней операцией в левой части уравнения является сложение. Тогда уравнение (3) можно представить в виде

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x) + \tilde{f}_B(\tilde{P}, x) = \tilde{0}, \quad (4)$$

где  $\tilde{f}_A = [f_{A_1}, f_{A_2}]$ ,  $\tilde{f}_B = [f_{B_1}, f_{B_2}]$  — новые по отношению к  $\tilde{f}$  интервальные функции тех же пе-

ременной  $x$  и вектора параметров  $\tilde{P}$ . Обозначив  $-\tilde{f}_B = \tilde{f}_C$ , уравнение (4) можно переписать в виде

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x) = \tilde{f}_C(\tilde{P}, x). \quad (5)$$

Поскольку интервальные функции в левой и правой частях уравнения (5) графически представляются в виде интервальных кривых, решение этого уравнения сводится к нахождению пересечения двух интервальных кривых, т. е. к нахождению множества  $\Omega$  точек (области), принадлежащих обеим интервальным кривым. В этом, очевидно, и проявляется множественный подход к решению интервальных уравнений. При этом собственно решением интервального уравнения (5) является не само указанное выше множество  $\Omega$ , а его проекция  $\Omega_x$  на ось  $X$ .

Детали множественного алгоритма нахождения решения интервального уравнения проще показать на примере решения уравнения с одним корнем.

**Пример 1.** Найти решение интервального уравнения  $e^{-\tilde{P}x} = \tilde{q}x$  с интервальными параметрами  $\tilde{p} = [p_1, p_2]$ ,  $\tilde{q} = [q_1, q_2]$ . Это уравнение используется при расчете длины опасной зоны загрязнения поверхности токсичным веществом. Графическое изображение интервальных кривых, представляющих функции левой и правой частей заданного уравнения, показаны на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$A$  — интервальная кривая  $\tilde{y} = e^{-\tilde{p}x}$ , где  $\tilde{p} = [p_1, p_2]$ ;

$B$  — интервальная кривая  $\tilde{y} = \tilde{q}x$ , где  $\tilde{q} = [q_1, q_2]$ ;

$A_1$  — детерминированная кривая  $y = e^{-p_1x}$ ;

$A_2$  — детерминированная кривая  $y = e^{-p_2x}$ ;

$B_1$  — детерминированная кривая  $y = q_1x$ ;

$B_2$  — детерминированная кривая  $y = q_2x$ ;

$\Omega$  — пересечение интервальных кривых  $A$  и  $B$ ;

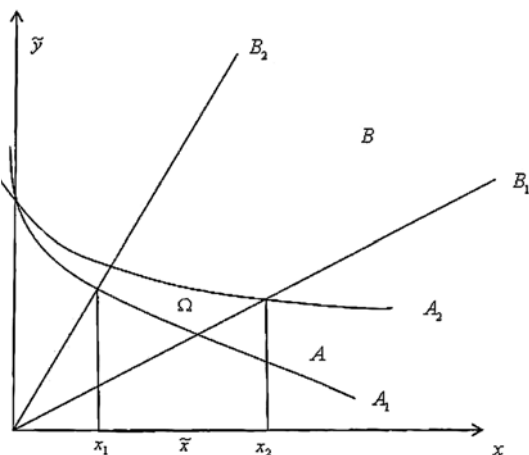


Рис. 1. Графическое представление решения интервального уравнения множественным методом

$x^* = [x_1, x_2]$  — проекция  $\Omega$  на ось  $X$  — решение интервального уравнения  $e^{-\tilde{P}x} = \tilde{q}x$ .

Из рисунка видно, что единственная область  $\Omega$ , являющаяся общей частью обеих интервальных кривых, расположена между крайней левой точкой  $x_1$  и крайней правой точкой  $x_2$ . Так что проекция  $\Omega_x$  области  $\Omega$  на ось  $X$ , являющаяся искомым единственным решением уравнения, имеет вид интервала  $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ . Причем, как видно из рис. 1, левая граница  $x_1$  этого решения есть точка пересечения кривых  $A_1$  и  $B_2$ , т. е. решение обычного детерминированного уравнения  $e^{-p_1x} = q_2x$ , а правая граница  $x_2$  этого решения есть точка пересечения кривых  $A_2$  и  $B_1$ , т. е. решение обычного уравнения  $e^{-p_2x} = q_1x$ . Таким образом, для решения заданного интервального уравнения достаточно решить два указанных обычных уравнения.

Пусть, например, надо найти решение конкретного интервального уравнения  $e^{-[0,5; 0,7]x} = [2, 3]x$ . Тогда для нахождения левой границы решения  $x_1$  надо решить детерминированное уравнение  $e^{-0,7x} = 3x$ , а для нахождения правой границы  $x_2$  — детерминированное уравнение  $e^{-0,5x} = 2x$ . Решая эти уравнения численным методом, находим  $x_1 = 0,275$ ,  $x_2 = 0,408$ . Отсюда решение заданного конкретного интервального уравнения получается в виде  $\tilde{x} = [x_1, x_2] = [0,275; 0,408]$ .

Если задано интервальное уравнение, имеющее два или более корней, его решение проводится путем последовательного вычисления этих корней, с использованием алгоритма, примененного выше в примере 1.

Мы рассмотрели процедуру решения с помощью множественного подхода интервального уравнения вида (3) в случае, когда последней операцией в левой части уравнения является сложение. В случае, когда последней операцией в левой части является умножение, уравнение (3) можно представить в виде

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x)\tilde{f}_B(\tilde{P}, x) = \tilde{0} \quad (6)$$

с теми же функциями  $f_A = (\cdot)$ ,  $f_B = (\cdot)$ , что и в формуле (4). Уравнение (6) можно разбить на пару уравнений

$$\tilde{f}_A(\tilde{P}, x) = \tilde{0} \quad \text{или} \quad \tilde{f}_B(\tilde{P}, x) = \tilde{0}, \quad (7)$$

в левых частях которых последней операцией является сложение. Благодаря этому уравнения (7) можно решить с помощью алгоритма, изложенного выше.

### Интервальный подход

Будем решать интервальное уравнение (3), используя интервальный подход. Этот подход ос-

нован на эквивалентных преобразованиях обеих частей интервального уравнения с помощью подходящих законов интервальной математики. В результате таких преобразований левая и правая части интервального уравнения приводятся к явному виду интервала, а все интервальное уравнение — к явному интервальному виду

$$[f_1(P_f, x), f_2(P_f, x)] = [\varphi_1(P_\varphi, x), \varphi_2(P_\varphi, x)], \quad (8)$$

где  $f_1, f_2, \varphi_1, \varphi_2$  — детерминированные функции переменной  $x$ , а  $P_f, P_\varphi$  — векторы параметров вида (2). Приравняв нижние границы левого и правого интервалов (8), а также их верхние границы, получаем систему из двух обычных (детерминированных) уравнений, которая эквивалентна исходному интервальному уравнению (8):

$$\left. \begin{aligned} f_1(P_f, x) &= \varphi_1(P_\varphi, x); \\ f_2(P_f, x) &= \varphi_2(P_\varphi, x). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таким образом, решение  $x^*$  системы детерминированных уравнений (9), если оно существует, является точным решением интервального уравнения (3). Если система (9) не имеет решения, но первое и второе ее уравнения имеют решения соответственно  $x'_1$  и  $x'_2$ , которые близки, то можно принять  $x^* \approx x'_1$  или  $x^* \approx x'_2$  или, что, очевидно, лучше,  $x^* \approx (x'_1 + x'_2)/2$ , или даже  $x^* = [x'_1, x'_2]$ . В остальных случаях решения системы детерминированных уравнений (9), а значит, и решения интервального уравнения (3) не существует.

В эквивалентных преобразованиях обеих частей интервального уравнения (3) для приведения его к системе (9) используются следующие законы интервальной математики:

$$\begin{aligned} [a_1, a_2] + [b_1, b_2] &= [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \\ [a_1, a_2] - [b_1, b_2] &= [a_1 - b_2, a_2 - b_1]; \\ k[a_1, a_2] &= \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} \\ [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] &= \left[ \min_{i,j} (a_i \cdot b_j), \max_{i,j} (a_i \cdot b_j) \right]; \quad (10) \\ [a_1, a_2] / [b_1, b_2] &= [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1] = \\ &= \left[ \min_{i,j} (a_i / b_j), \max_{i,j} (a_i / b_j) \right]. \end{aligned}$$

Детали интервального алгоритма поиска решения интервального уравнения поясним, как и выше, на примере решения уравнения с одним корнем.

**Пример 2.** Найти решение интервального уравнения  $e^{-\tilde{p}x} = \tilde{q}x$  с интервальными параметрами  $\tilde{p} = [p_1, p_2]$ ,  $\tilde{q} = [q_1, q_2]$ . Решение данного уравнения множественным способом, с использованием графического представления интервальных кривых,

было показано в примере 1. Теперь применим интервальный метод. При этом необходимость графического представления кривых отпадает, и процедура отыскания решения интервального уравнения упрощается. Алгоритм решения следующий.

**Шаг 1.** Приводим левую и правую части уравнения к явному виду интервала. Учитывая, что корень уравнения  $x > 0$ , а функция  $e^x$  — монотонно возрастающая, с помощью (10) находим: правая часть

$$\tilde{q}x = [q_1, q_2]x = [q_1x, q_2x],$$

левая часть

$$\begin{aligned} e^{-\tilde{p}x} &= e^{-[p_1, p_2]x} = e^{-[p_1x, p_2x]} = \\ &= e^{[-p_2x, -p_1x]} = [e^{-p_2x}, e^{-p_1x}]. \end{aligned}$$

**Шаг 2.** Представляем все уравнение в явном интервальном виде

$$[e^{-p_2x}, e^{-p_1x}] = [q_1x, q_2x]. \quad (11)$$

**Шаг 3.** Переходим от интервального уравнения (11) к системе двух детерминированных уравнений, приравнявая нижние границы правого и левого интервала в (11), а также их верхние границы. Получаем

$$\left. \begin{aligned} e^{-p_2x} &= q_1x; \\ e^{-p_1x} &= q_2x. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

**Шаг 4.** Решаем систему уравнений (12). Найдём корни 1-го уравнения  $x'_1$  и 2-го уравнения  $x'_2$ . Если  $x'_1 = x'_2$ , то существует точное решение системы (12), которое равно  $x^* = x'_1 = x'_2$ . Оно же является решением заданного интервального уравнения. Если  $x'_1 \neq x'_2$ , то точное решение системы (12) и, соответственно, точное решение интервального уравнения не существует. Однако при  $x'_1 \approx x'_2$  существует приближенное решение  $x^*$  системы (12) и интервального уравнения:  $x^* = x'_1$  или  $x^* = x'_2$ , или  $x^* \approx (x'_1 + x'_2)/2$ , или  $x^* = [x'_1, x'_2]$ , где  $x'_1 = \min(x'_1, x'_2)$ ,  $x'_2 = \max(x'_1, x'_2)$ . При существенно различных  $x'_1$  и  $x'_2$  решения системы (12) и интервального уравнения не существует.

Найдём решение того же конкретного интервального уравнения, что и в примере 1:  $e^{-[0,5; 0,7]x} = [2,3]x$ . В данном случае система (12) приобретает вид

$$\left. \begin{aligned} e^{-0,7x} &= 2x; \\ e^{-0,5x} &= 3x. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Решая 1-е и 2-е уравнения (13) численным методом, находим их решения в виде  $x'_1 = 0,381$ ,  $x'_2 = 0,289$ . Здесь  $x'_1 \neq x'_2$ , так что точного реше-

ния системы (13) заданного интервального уравнения не существует. Однако можно считать, что  $x_1^* \approx x_2^*$  и потому существует приближенное их решение

$$\begin{aligned} x^* &\approx 0,381 \text{ или } x^* \approx 0,289, \\ \text{или } x^* &\approx (0,381 + 0,289)/2 = 0,335, \\ \text{или } x^* &= [0,289, 0,381]. \end{aligned} \quad (14)$$

Графическое изображение интервальных кривых, представляющих функции левой и правой частей рассмотренного в примере 2 интервального уравнения, показано на рис. 2.

На рис. 2 приняты следующие обозначения:

- $A$  — интервальная кривая  $\tilde{y} = e^{-\tilde{p}x}$ , где  $\tilde{p} = [p_1, p_2]$ ;
- $B$  — интервальная кривая  $\tilde{y} = \tilde{q}x$ , где  $\tilde{q} = [q_1, q_2]$ ;
- $A_1$  — детерминированная кривая  $y = e^{-p_1x}$ ;
- $A_2$  — детерминированная кривая  $y = e^{-p_2x}$ ;
- $B_1$  — детерминированная кривая  $y = q_1x$ ;
- $B_2$  — детерминированная кривая  $y = q_2x$ ;
- $\Theta$  — пересечение интервальных кривых  $A$  и  $B$ ;
- $x^* = [x_1^*, x_2^*]$  — проекция  $\Theta$  на ось  $X$  — решение интервального уравнения  $e^{-\tilde{p}x} = \tilde{q}x$ .

Из рис. 2 видно, что единственная область  $\Theta$ , которую следует считать общей частью обеих интервальных кривых, расположена между крайней правой точкой  $x_2^*$  и крайней левой точкой  $x_1^*$ . Так что проекция области  $\Theta$  на ось  $X$ , являющаяся объединенным решением заданного интервального уравнения, имеет вид интервала  $x^* = [x_1^*, x_2^*]$ .

Левая  $x_1^*$  и правая  $x_2^*$  границы этого решения являются соответственно точкой пересечения кривых  $A_2$  и  $B_2$  [т. е. решением 2-го уравнения (13)] и точкой пересечения кривых  $A_1$  и  $B_1$  [т. е. решением 1-го уравнения (13)].

Сравнивая рис. 1 и рис. 2, видим, что область  $\Omega$ , определяющая множество решений рассмотрен-

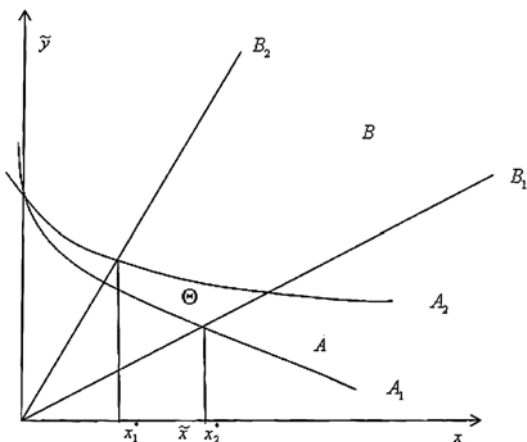


Рис. 2. Графическое представление решения интервального уравнения интервальным методом

ного интервального уравнения при множественном подходе, шире области  $\Theta$ , определяющей множество решений этого уравнения при интервальном подходе. Это положение остается справедливым и для других интервальных уравнений. Оно может быть записано в виде  $\Theta \subset \Omega$ .

Решение с помощью интервального подхода интервальных уравнений с несколькими корнями и уравнений типа (6) (где последняя операция не сложение, а умножение) осуществляется так же, как при использовании множественного подхода.

## Обсуждение

Выше было показано (теоретически и на конкретных примерах), что решение возникающих на практике разнообразных интервальных уравнений возможно, по крайней мере, двумя различными способами. Первый, множественный способ рассматривает интервальное уравнение как множество образующих его обычных уравнений, полученных варьированием их параметров в границах интервальных параметров интервального уравнения. При этом множество решений интервального уравнения получается как множество решений образующих его обычных уравнений. Второй, чисто интервальный способ рассматривает интервальное уравнение не как множество обычных уравнений, а как одно уравнение, имеющее, однако, интервальные параметры, подчиняющиеся законам интервальной математики. Эквивалентное преобразование интервального уравнения по этим законам приводит его к виду детерминированного уравнения, решение которого можно получить известными методами.

Предложенный в данной статье чисто интервальный способ решения интервального уравнения существенно отличается от известного ранее множественного способа. Отличие есть в определении того, что считать решением интервального уравнения (при множественном подходе решением является множество всех точек пересечения интервальных функций в левой и правой частях уравнения, а при интервальном подходе — множество точек, в которых интервальные функции в левой и правой частях уравнения равны или приближенно равны): в используемом математическом аппарате (при множественном подходе это теория множеств, при интервальном подходе — интервальная математика); в возможности нахождения точного решения (при множественном подходе такое решение всегда существует и может быть найдено всегда, при интервальном подходе — не всегда). Кроме того, множество получаемых с помощью интервального подхода решений интервального уравнения всегда уже множества ре-

шений, получаемых с помощью множественного подхода, составляя его часть. Последняя особенность интервального подхода связана с тем, что в нем учитываются только часть точек, геометрически относящихся к пересечению интервальных кривых левой и правой частей уравнения. Эта особенность свидетельствует об адекватности предложенного в статье интервального подхода, проявляющейся в том, что сокращение информации об уравнении (переход от детерминированного к интервальному уравнению) приводит к размыванию его решения (переходу от единственности решения к множеству решений).

### Заключение

В работе предложен новый подход к решению интервальных уравнений, основанный на эквивалентном преобразовании уравнения по законам интервальной математики, в результате чего оно приводится к детерминированному виду и может быть решено хорошо известными методами решения обычных (детерминированных) уравнений. Этот подход отличается от известного множественного подхода содержанием понятия "решение интервального уравнения" и полной формализацией процесса отыскания корней уравнения. Этот процесс строится на использовании аппарата интервальной математики, благодаря чему полностью исключает различные эвристические приемы, что существенно упрощает процесс решения уравнения. Важно отметить, что точные значения корней интер-

вального уравнения при интервальном подходе могут существовать, а могут и не существовать. В первом случае эти значения можно найти. Во втором случае можно найти приближенные значения корней уравнения. Предложенный подход к решению интервальных уравнений имеет важное значение, позволяя решать разнообразные задачи, связанные с исследованием неточно известных характеристик систем в технике, экономике, социальной сфере.

### Список литературы

1. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. М.: Высшая школа. 2005. 575 с.
2. **Заде Л. А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
3. **Алефельд Г., Херибергер Ю.** Введение в интервальные вычисления. М.: Мир. 1987. 360 с.
4. **Канторович Л. В.** О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сибирский математический журнал. 1962. Т. 3, № 5. С. 3–14.
5. **Налимов В. В., Чернова Л. А.** Теория эксперимента. М.: Наука. 1971. 320 с.
6. **Воцинин А. П., Сотиров Г. Р.** Оптимизация в условиях неопределенности. М.: МЭИ, София: Техника, 1989. 226 с.
7. **Gorsky V., Shvetzova-Shilovskaya T., Voschinin A.** Risk assessment of Accident involving environmental high-toxicity substances // Journal of Hazardous Materials. 2000. N. 78.
8. **Воцинин А. П.** Интервальный анализ данных: развитие и перспективы // Заводская лаборатория. 2002. Т. 68, № 1. С. 118–126.
9. **Левин В. И.** Интервальная математика и исследование систем в условиях неопределенности. Пенза: ПТИ. 1998. 68 с.
10. **Левин В. И.** Методология оптимизации в условиях неопределенности методом детерминизации // Информационные технологии. 2014. № 5. С. 14–21.
11. **Левин В. И.** Метод моделирования поведения функций с помощью раздетерминизации // Радиоэлектроника, информатика, управление. 2017. № 1. С. 33–41.

V. I. Levin, Dr of Tech Sci, Professor,  
Penza State Technological University

## Interval Equations in Problems of Research of Uncertain Systems

*In the modeling of technical, economic, social systems, it is often necessary to solve equations with interval-specific parameters (interval equations). The solution of such equations requires special methods that differ from the methods for solving ordinary, deterministic equations. A new method for solving interval equations based on the apparatus of interval mathematics is proposed. The aim of the work is the development of a completely formalized method for solving interval equations based on the mathematical apparatus mentioned. The method proposed in the article consists in using equivalent transformations of both parts of the interval equation according to the laws of interval mathematics that allow one to move from the interval equation to the ordinary deterministic equations and their subsequent solution by known methods. It is shown that the solution of various interval equations can be performed by two different methods: multiple and interval. The differences between these two methods in the concept of solving the equation, in the mathematical apparatus used, in the possibility of an exact solution, in the power of the resulting set of solutions are revealed. An example of a solution of the interval equation used in the calculation of the zone of contamination by a dangerous substance is given by two methods. The paper proposes a new approach to solving interval equations based on an equivalent transformation of the equation according to the laws of interval mathematics. Such a transformation allows us to bring the equation to a deterministic form, which makes it possible to solve it by well-known methods for solving ordinary (deterministic) equations. The proposed approach allows us to find the exact solution of the interval equation (if it exists) or its approximate solution (if there is no exact solution).*

**Keywords:** interval, interval function, interval equation, multiple method, interval method



## References

1. **Venttsel' E. S.** *Teoriya veroyatnosti* (Probability Theory), Moscow, Vysshaya shkola, 2005, 575 p. (in Russian).
2. **Zade L. A.** *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii* (The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions), Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).
3. **Alefel'd G., Khertsberger Yu.** *Vvedenie v interval'nye vychisleniya* (Introduction to interval computations), Moscow, Mir, 1987, 360 p. (in Russian).
4. **Kantorovich L. V.** *O nekotorykh novykh podkhodakh k vychislitel'nym metodam i obrabotke nablyudenii* (On some new approaches to computational methods and processing of observations), *Sibirskii Matematicheskii Zhurnal*, 1962, vol. 3, no. 5, pp. 3–14 (in Russian).
5. **Nalimov V. V., Chernova L. A.** *Teoriya eksperimenta* (Theory of experiment), Moscow, Nauka, 1971, 320 p. (in Russian).
6. **Voshchinin A. P., Sotirov G. R.** *Optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti* (Optimization in conditions of uncertainty), Moscow, MEI, Sofiya, Tekhnika, 1989, 226 p. (in Russian).
7. **Gorsky V., Shvetzova-Shilovskaya T., Voschinin A.** Risk assessment of Accident involving environmental high-toxicity substances, *Journal of Hazardous Materials*, 2000, no. 78.
8. **Voshchinin A. P.** *Interval'nyi analiz dannykh: razvitiye i perspektivy* (Interval analysis of data: development and prospects), *Zavodskaya Laboratoriya*, 2002, vol. 68, no. 1, pp. 118–126 (in Russian).
9. **Levin V. I.** *Interval'naya matematika i issledovanie sistem v usloviyakh neopredelennosti* (Interval mathematics and systems research in conditions of uncertainty), Penza, PTI, 1998, 68 p. (in Russian).
10. **Levin V. I.** *Metodologiya optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti metodom determinizatsii* (Methodology optimization under conditions of uncertainty by the method of determination), *Informatsionnye Tekhnologii*, 2014, no. 5, pp. 14–21 (in Russian).
11. **Levin V. I.** *Metod modelirovaniya povedeniya funktsii s pomoshch'yu razdeterminizatsii* (A method for modeling the behavior of functions by means of a partition), *Radioelektronika, Informatika, Upravlenie*, 2017, no. 1, pp. 33–41 (in Russian).

УДК 004.67

**И. В. Гермашев**, д-р техн. наук, проф., e-mail: i.v.germashev@volsu.ru,  
Волгоградский государственный университет,  
**В. Е. Дербисер**, д-р хим. наук, проф., e-mail: derbisher\_ve@vstu.ru,  
**Е. В. Дербисер**, канд. техн. наук, доц., e-mail: derbisher2@vstu.ru,  
Волгоградский государственный технический университет,  
**Е. А. Маркушевская**, канд. пед. наук, доц., e-mail: emarkushevskaya@vspsu.ru,  
Волгоградский государственный социально-педагогический университет

## Анализ нечетких данных для оптимизации химико-технологических систем

*Предложен метод анализа данных в условиях нечеткой, неполной, разнородной исходной информации для решения задач оптимизации химико-технологических систем. Результаты исследования развивают математическое обеспечение информационных систем обеспечения научно-производственной деятельности химиката технолога в части моделирования лингвистических ресурсов и могут служить для обоснованного принятия решений, например, при оптимизации состава композиционных веществ. Для формализации исходных данных использованы нечеткие числа, в результате чего получено параметрическое пространство, описывающее многокомпонентные системы. Вычисление индекса соответствия каждого параметра системы предъявляемым требованиям позволило перейти к относительным безразмерным вещественным величинам. В качестве агрегатной функции использовалась процедура взвешенного голосования. Полученное значение отражает интегральную меру соответствия химико-технологической системы предъявляемым требованиям.*

**Ключевые слова:** анализ данных, модель данных, оператор, нечеткие числа, многокритериальный анализ, химико-технологические системы, математическое обеспечение, информационные системы

### Введение

Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических систем (ХТС) в условиях многокритериальности, неполноты и нечеткости исходной информации, представляющей собой, в том числе знания, опыт и интуицию специалиста-эксперта для управления этими системами, — один из основных векторов

их развития. При этом выявление оптимальных и компромиссных технических решений уже на ранних стадиях постановки лабораторных исследований и опытно-промышленных выпусков продукции в мировой практике [1, 2] является, несомненно, актуальной задачей, ориентированной как на создание новой техники и технологии, так и на экономию человеческих и материальных ресурсов.

Проблема анализа нечетких данных является довольно распространенной для информационных систем (ИС), ориентированных, как правило, на взаимодействие с конечным потребителем. В качестве примера можно привести систему анализа лингвистической информации для прогноза коммерческой привлекательности товаров [3]. Для обработки подобной информации зачастую используют аппарат нечеткой математики [4].

Эта работа является многоаспектной и сложной, особенно тогда, когда, как указано выше, исходные данные, используемые при подготовке информации для принятия решения, имеют нечеткий характер. В химической технологии таковых, пожалуй, больше всего: выбор составов, оценка свойств новых материалов, проектирование конкурентоспособных технологий, учет возможного экологического ущерба и безопасности и т. д. Характеризуя проблему моделирования ХТС в этой части, необходимо исходить из того, что сама постановка задачи моделирования, компьютерная реализация и ее результативность могут иметь множественный характер, который во многом определяется формализацией исходных данных (параметров и условий) и проверкой правильности полученных в ходе моделирования результатов. В зависимости от уровня нечеткости и вида используемой модели решения могут иметь разную значимость [5].

Современные исследования, нацеленные на обработку нечетких данных, используют разные подходы, укладывающиеся, как правило, в схему "исходные данные — фаззификация — анализ — дефаззификация — результат". При этом формулируются лингвистические переменные и при использовании общепринятых методов фаззификации термов переходят к нечетким множествам и далее, как например в работе [6], проводится анализ полученной модели данных в математическом пакете или, как в работе [7], реализованы нечеткие компоненты в интеллектуальной системе. Предлагаемые подходы ориентируются на конкретную предметную область, и поэтому входные данные необходимо формализовать в соответствии с требованиями математических методов. А это может оказаться не по силам пользователям системы. Поэтому в таких случаях либо предлагают подробные методические руководства, либо автоматизируют процесс.

Обобщив вышеизложенные подходы и собственный опыт решения подобных задач [8, 9], была сделана настоящая работа, которая представляет собой математическое обеспечение ИС, позволяющее, во-первых, автоматизировать первичную обработку исходных данных (процесс фаззификации) и, во-вторых, проводить их анализ для информационной поддержки процедур

принятия решений. Причем вторая часть ориентирована на широкий круг задач химической технологии таких, как классификация, идентификация и экспертиза ХТС. Хотя, поскольку методы анализа ориентированы на относительные данные, абстрагированные от предметной области, то эти методы могут применяться и в других областях науки и техники, но необходимо предусмотреть формализацию данных предметной области в терминах предлагаемых методов.

Обобщенно отметим также, что для решения задач данного профиля использовались последние достижения в области нечетких множеств [8—11], интервальной математики [12] и др. [13], однако универсальной методики ни в отечественной, ни в зарубежной практике не выработано, и исследования в этом направлении активно продолжаются [14, 15].

Настоящая работа посвящена развитию этих подходов, в частности, направлена на формализацию исходных данных в форме нечетких чисел и определение библиотеки математических моделей информации для поддержки принятия решения о выборе системы из набора заданных. Типизация исходных данных, на наш взгляд, позволит унифицировать и алгоритмизировать процесс подготовки результатов эксперимента для их автоматизированного анализа.

### Постановка задачи

Пусть  $Q = (Q_{ij})$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ , — матрица исходных данных, описывающих результаты измерений или вычислений  $m$  характеристик  $n$  представителей определенного класса химических систем,  $Q_{ij} \in Q_j$ , где  $Q_j$  — множество значений, представляющих собой числа, множества, слова и т. п., что в упрощенном виде показано на рис. 1. По этим данным необходимо оценить представленные системы и выбрать в некотором смысле оптимальную. Лучше всего рассмотреть решение задачи на конкретном примере.

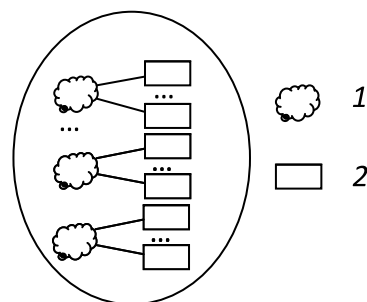


Рис. 1. Модель исходных данных:

1 — представители класса систем; 2 — измеряемые показатели  $Q$  систем

Выборочные характеристики полимеров [10]

№ полимера, $i$	R''	R'	$\eta_g$ , дл/г	$T_s$ , °C	$T_{10}$ %, °C	Кислородный индекс	Растворимость			
							серная кислота	м-крезол	фенол	тетрахлорэтилен: фенол (3: 1)
Имя параметра			$Q_{i1}$	$Q_{i2}$	$Q_{i3}$	$Q_{i4}$	$Q_{i5}$	$Q_{i6}$	$Q_{i7}$	$Q_{i8}$
1	R <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	0,89	355	550	32,1	+	+	–	+
2	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	0,86	340	520	40,3	+	+	+/-	+
3	R <sub>1</sub>	R <sub>3</sub>	0,79	310	500	36,0	+	+	–	+
4	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	0,80	320	530	41,0	+	+	+/-	+
5	R <sub>2</sub>	R <sub>2</sub>	0,81	295	520	52,0	+	+	+/-	+
6	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	0,85	308	500	43,0	+	+	+/-	+
7	R <sub>4</sub>	R <sub>1</sub>	0,82	300	550	40,2	+	+	–	+
8	R <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	0,90	276	540	52,0	+	+	+/-	+
9	R <sub>4</sub>	R <sub>3</sub>	0,73	308	515	42,0	+	+	–	+

В качестве примера используем анализ набора, выбранного случайным образом из типичного исследования в области создания полимерных композитов [10]. Оно связано с поиском перспективных термо- и огнестойких полигетероариленов. При этом автор ставил задачу дать некоторые компромиссные рекомендации, но использовал при этом только экспериментальные действия.

В указанной работе при синтезе каждого из полигетероариленов использовался свой мономер. При этом мономеры отличались друг от друга только двумя радикалами, которые обозначим R' и R''. Не вдаваясь в подробности указанного исследования, не имеющих отношения к проблематике данной работы, обозначим радикалы для замещения в R' и R'' через R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>. Будем считать, что именно эти радикалы являлись активными фрагментами мономеров, из которых осуществлялся синтез полимеров, и обеспечивали новизну исследования. Далее, используя разные выборки двух радикалов из ряда {R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>} и вводя их в состав вместо R' и R'', при синтезе получали набор полимеров и полимерных ком-

позитов с разными физико-химическими свойствами. Данные, представляющие интерес в качестве исходного информационного массива для настоящей статьи, приведены в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $\eta_g$ , дл/г — приведенная вязкость полимера;  $T_s$ , °C — температура размягчения полимера;  $T_{10}$  %, °C — температура деструкции полимера.

Далее исходим из следующего. Пусть предполагаемое назначение полимера требует от него определенных физико-химических свойств, важность  $\alpha$  которых, по мнению экспертов, для эксплуатации композита будет соответствовать приведенной в табл. 2.

Необходимо оценить привлекательность представленных полимеров с точки зрения этих эксплуатационных требований, т. е. предложить оптимальный вариант исходя из возможного назначения.

Решение задачи разобьем на несколько этапов: анализ исходных данных  $Q$ , построение нечетких чисел  $U$ , формализация требований в форме нечетких чисел, сравнение  $U$  с формальными требованиями, выбор системы.

Таблица 2

Ранговые оценки свойств полимерного композита

№ п/п, $j$	Характеристика	$\alpha_j$
1	Приведенная вязкость	0,10
2	Температура размягчения	0,25
3	Температура потери 10 % исходной массы	0,20
4	Огнестойкость (кислородный индекс)	0,15
5	Растворимость (серная кислота)	0,05
6	Растворимость (м-крезол)	0,05
7	Растворимость (фенол)	0,10
8	Растворимость [тетрахлорэтилен: фенол (3: 1)]	0,10

### Анализ исходных данных

Цель этого этапа — привести разнотипные данные к одному типу в форме отрезка, т. е. определить оператор  $A$ :

$$A(Q_{ij}) = [q_{ij1}; q_{ij2}], q_{ij1}, q_{ij2} \in \mathbb{R}, q_{ij1} < q_{ij2},$$

где  $\mathbb{R}$  — множество действительных чисел.

Точно задать эту операцию не представляется возможным, поскольку на практике  $Q_{ij}$  может быть представлено в любой форме, но для нача-

ла можно описать решение для наиболее типичных форм, создав библиотеку моделей данных, а в дальнейшем, при необходимости, пополнять библиотеку, что позволит адаптировать предлагаемый подход практически к любым типам исходных данных. Рассмотрим несколько наиболее распространенных случаев.

1.  $Q_{ij}$  — вещественное число.

В этом случае надо иметь в виду, что большинство измерений или вычислений, в результате которых получены исходные данные, проводятся с определенной погрешностью. Так что даже числовое представление не является вполне четким. Поэтому при оперировании с такими данными обычно параллельно еще проводят оценку погрешности результатов.

Организация нечетких чисел позволяет учесть погрешность в самой величине и поэтому следует ожидать более адекватных результатов при дальнейших вычислениях.

Если погрешность  $Q_{ij}$  не превосходит некоторой величины  $\delta_{ij} > 0$ , тогда положим

$$q_{ij1} = Q_{ij} - \delta_{ij}; q_{ij2} = Q_{ij} + \delta_{ij}.$$

Иллюстрируя полимером № 1 из рассматриваемого примера (табл. 1), получим, например, для кислородного индекса

$$\begin{aligned} Q_{14} &= 32,1, \delta_{14} = 0,1, \\ q_{141} &= 32,0, q_{142} = 32,2, \text{ т. е.} \\ A_1(32,1) &= [32,0; 32,2], \end{aligned}$$

где через  $A_1$  обозначен оператор, реализующий описанную выше процедуру. Фактически для применения оператора  $A_1$  необходимо в качестве аргумента указывать не только значение  $Q_{ij}$ , но и его погрешность  $\delta_{ij}$ , т. е. более корректно будет задать оператор  $A_1$  следующим образом:

$$A_1: \mathbb{R} \times \mathbb{R}^+ \setminus \{0\} \rightarrow \mathfrak{F}, \mathfrak{F} = \{[a; b] \mid a, b \in \mathbb{R}, a < b\},$$

а именно,

$$A_1(x, y) = [x - y; x + y], x \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}.$$

2.  $Q_{ij}$  — множество действительных чисел.

Положим  $q_{ij1} = \inf Q_{ij}$ ,  $q_{ij2} = \sup Q_{ij}$  и получим соответствующий оператор

$$A_2: \mathfrak{X} \rightarrow \mathfrak{F}, \mathfrak{X} = \{X \mid X \subset \mathbb{R}\},$$

а именно,

$$A_2(X) = [\inf X; \sup X], X \subset \mathbb{R}.$$

3.  $Q_{ij}$  — лингвистическое значение.

Пусть  $Q_{ij} \in t = \{t_k \mid k = 1, \dots, r\}$ , причем термы  $t_k$  таковы, что  $t_1 < \dots < t_r$ , где  $<$  — некоторое отношение упорядочивания. Проведем разбиение отрезка

$E = [0; 1]$  на  $r$  частей в соответствии с термами  $t_k$ , при этом сохраняя тот же порядок, т. е.

$$E = \bigcup_{k=1}^r E_k,$$

где  $E_k = [e_{k-1}; e_k]$ ,  $k = 1, \dots, r-1$ ,  $E_r = [e_{r-1}; e_r]$ ,  $0 = e_0 < e_1 < \dots < e_r = 1$ . Ставим в соответствие терму  $t_k$  множество  $E_k$  и далее поступаем согласно пункту 2.

В нашем примере для  $j = 5$  имеем  $t = \{-, +/-, +\}$ , т. е.  $r = 3$  и положим, например,  $E_1 = [0; 0,33]$ ,  $E_2 = [0,33; 0,67]$ ,  $E_3 = [0,67; 1]$ . В итоге получаем

$$\begin{aligned} q_{151} &= 0,67, q_{152} = 1,00, \text{ т. е.} \\ A_3(+) &= [0,67; 1,00], \end{aligned}$$

где описанный выше оператор  $A_3$  задан следующим образом

$$A_3: t \rightarrow \mathfrak{F}_1, \mathfrak{F}_1 = \{[a; b] \mid [a; b] \subset [0; 1]\},$$

а именно,

$$A_3(t_k) = [e_{k-1}; e_k].$$

Таким образом, задан оператор  $A$ , преобразующий исходные данные в числовой отрезок по следующей схеме

$$A(x) = \begin{cases} A_1(x), & \text{если } x \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^+ \setminus \{0\}, \\ A_2(x), & \text{если } x \in \mathbb{R}, \\ A_3(x), & \text{если } x \in t. \end{cases}$$

Применив оператор  $A$  к исходной матрице  $Q$ , получим  $q = (q_{ijp})$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ ,  $p = 1, 2$ , где  $[q_{ij1}; q_{ij2}] = A(Q_{ij})$ .

Далее, аналогично [8] по значениям  $q$  заданы нечеткие числа:

$$u_{ij}(x) = e^{-\frac{(x-q_{ij})^2}{\delta_{ij}^2} \ln 2},$$

где  $q_{ij} = (q_{ij1} + q_{ij2})/2$ ,  $\delta_{ij} = (q_{ij2} - q_{ij1})/2$ ,  $x \in \mathbb{R}$ .

В итоге получена матрица нечетких чисел  $U(x) = (u_{ij}(x))$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$  (табл. 3).

Далее необходимо формализовать требования к представителям класса систем. В контексте нашего примера — формализовать эксплуатационные требования к полимерам. Для этого поступим аналогично [8], а именно, зададим гипотетический полимер, обладающий такими характеристиками, которые полностью удовлетворяют эксплуатационным требованиям. Присвоим этому полимеру номер 0 (табл. 3). При этом характеристика  $q_{0j}$  отражает требуемое значение, а  $\delta_{0j}$  — допуск, в пределах которого значение соответствующей характеристики удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Параметры нечетких чисел  $u_{ij}$

Номер полимера, $i$	Номер характеристики, $j$															
	1		2		3		4		5		6		7		8	
	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$	$q_{ij}$	$\delta_{ij}$
0	0,95	0,2	360	60	600	100	53	10	0,835	0,5	0,835	0,7	0,835	0,3	0,835	0,5
1	0,89	0,01	355	1	550	5	32,1	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165
2	0,86	0,01	340	1	520	5	40,3	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
3	0,79	0,01	310	1	500	5	36,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165
4	0,80	0,01	320	1	530	5	41,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
5	0,81	0,01	295	1	520	5	52,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
6	0,85	0,01	308	1	500	5	43,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
7	0,82	0,01	300	1	550	5	40,2	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165
8	0,90	0,01	276	1	540	5	52,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,5	0,17	0,835	0,165
9	0,73	0,01	308	1	515	5	42,0	0,1	0,835	0,165	0,835	0,165	0,165	0,165	0,835	0,165

**Вычислительный эксперимент и его обсуждение**

Для оценки систем из заданного класса воспользуемся методом, описанным в работе [8].

Чтобы определить, в какой мере характеристика полимера №  $i$  близка характеристике эталонного полимера № 0, вычислим степень равенства  $v_{ij}$  соответствующих нечетких множеств [16]:

$$v_{ij} = \max_R \min(u_{ij}(x_j), u_{0j}(x_j)),$$

причем значение 1 будет соответствовать абсолютному равенству, а 0 — абсолютному неравенству.

Для функций принадлежности приведенного вида нами получено, что значение максимина достигается в точке [17]:

$$v_{ij} = \mu_{0j}(x_{ij}^*), \text{ где } x_{ij}^* = \frac{q_{ij}\delta_{0j} + q_{0j}\delta_{ij}}{\delta_{0j} + \delta_{ij}},$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \tag{1}$$

Проведя взвешенное голосование, получим интегральную оценку  $v_i$  соответствия совокупности характеристик объекта  $s_i$  совокупности характеристик объекта  $s_0$ :

$$v_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j v_{ij}, \tag{2}$$

где  $\alpha_j \geq 0$ ,  $\sum_{j=1}^m \alpha_j = 1$ . Результаты вычислений на основе данных табл. 2 и 3 представлены в табл. 4.

Таким образом, с точки зрения предъявленных требований оптимальным является полимер № 2.

Кроме того, полученные оценки можно применять для классификации систем. Допустим, необходимо все полимеры разделить на три класса:

для первоочередного исследования (класс  $l = 2$ ), резервная группа (класс  $l = 1$ ) и бесперспективные (класс  $l = 0$ ). Зададим пороговые значения  $v^l$  ( $l = 1, 2$ ) при превышении оценки  $v_i$  которых будем относить полимер  $i$  к классу  $l$ . То есть при классификации будем поступать по следующей схеме:

- если  $0 \leq v_i < v^1$ , то относим полимер  $i$  в класс 0;
- если  $v^1 \leq v_i < v^2$ , то относим полимер  $i$  в класс 1;
- если  $v^2 \leq v_i \leq 1$ , то относим полимер  $i$  в класс 2.

В данном случае значения  $v^l$  можно варьировать таким образом, чтобы изменять диапазон уровня перспективности полимеров в каждом из классов. Положим,  $v^1 = 0,500$ ,  $v^2 = 0,700$ , тогда полимеры классифицируются следующим образом:

- 0) неперспективные полимеры (класс 0): таких нет;
- 1) резервная группа (класс 1): полимеры № 3, 6, 7, 9;
- 2) для первоочередного исследования (класс 2): полимеры № 1, 2, 4, 5, 8.

Для дополнительной иллюстрации использования вышеприведенного метода без подробных расчетов покажем итоговые данные при реше-

Таблица 4

Оценки  $v_i$  полимеров на соответствие эксплуатационным требованиям

№ полимера, $i$	$v_i$
1	0,746
2	0,774
3	0,575
4	0,730
5	0,740
6	0,690
7	0,648
8	0,742
9	0,614

Характеристика марок ударопрочного полистирола

№ п/п, $i$	Марка полистирола	Параметры							$v_i$
		$\omega$ , не более, %	$B$ , не менее, МПа	$[\sigma]_b$ , не менее, МПа	$a_k$ , не менее, Дж/м <sup>2</sup>	$\epsilon$ , не менее, %	$E_r$ , не менее, МПа	$[\sigma]_r$ , не менее, МПа	
		№ параметра, $j$							
1	2	3	4	5	6	7			
0	Эталон	0,05	2250	37	100,5	42	1850	23–25,0	
1	625	0,05	2350	40	63,0	27	1800	20,0	0,72
2	825	0,05	2000	37–39	96,0	50	1500	17,5	0,83
3	825E	0,05	2200	45	96,0	45–50	1800	21,0	0,86
4	945	0,05	2068	30	120,0	50	1300–1400	15,0	0,65
5	945E	0,05	1600	38	145,0	50	1300	22,5	0,61

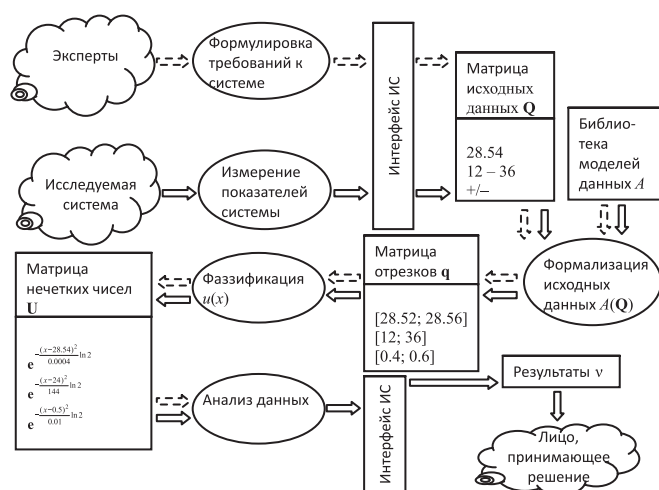


Рис. 2. Схема потоков данных в ИС

нии задачи выбора оптимального варианта ударопрочного полистирола из пяти (число объектов значения не имеет) промышленных образцов (табл. 5). Данные о свойствах материалов взяты с сайта [18].

В табл. 5 приняты следующие обозначения:  $\omega$ , % — массовая доля остаточного стирола;  $B$ , МПа — модуль эластичности;  $[\sigma]_b$ , МПа — прочность при изгибе;  $a_k$ , Дж/м<sup>2</sup> — ударная вязкость по Изоду, с надрезом;  $\epsilon$ , % — относительное удлинение;  $E_r$ , МПа — модуль упругости при растяжении;  $[\sigma]_r$ , МПа — прочность при растяжении.

Предложенная вычислительная модель может служить для автоматизированного анализа при выборе оптимального состава ХТС. Примерная схема работы такой ИС представлена на рис. 2. В предложенной схеме требования к оцениваемым объектам задаются непосредственно в интерфейсе ИС при формулировании задачи, позволяя экспертам оперативно корректировать постановку задачи в контексте проводимых исследований.

При постановке типовых задач оценки ХТС возможно формирование библиотеки экспертных оценок (наряду с библиотекой моделей данных), что позволяет избавить пользователя ИС от необходимости проводить экспертные оценки и полностью автоматизировать процесс оценки ХТС.

## Заключение

Часто возникающая задача на начальных этапах проектирования — это задача выбора наилучшего варианта из множества допустимых, которые удовлетворяют некоторым заданным требованиям. При попытке получить решение в условиях неполной и нечеткой информации об объекте проектирования возникает довольно большая вероятность неправильных решений. Поэтому использование ясной стратегии может свести к минимуму эту вероятность, снижая затраты времени, интеллектуальных и материальных ресурсов.

Предлагаемый в данной статье подход к математическому моделированию с использованием нечеткой информации в области химической технологии в сущности представляет собой математическое обеспечение профилированной ИС. Формирование базы данных моделей внутри системы позволяет вывести лингвистические ресурсы интерфейса пользователя на новый уровень взаимодействия с использованием языковых сред, более приближенных к естественным языкам, и задавать входные данные в более привычной для исследователя форме.

В статье продемонстрирован только один из аспектов использования предлагаемого моделирования, направленный на использование нечетких данных при выборе полимерного композиционного материала из однородного набора. Как видно из приведенных выше результатов, анализ экспериментальных данных хорошо алгоритми-

зируется и может быть реализован в виде ИС химика-исследователя и химика-технолога. Хотя приведенные исследования проиллюстрированы на примере полимерных материалов, однако общеметодическое содержание предлагаемых математических моделей и методов анализа позволяет перенести их и на ряд других задач химии и химической технологии.

#### Список литературы

1. **Khidhir B. A., Al-Oqaiel W., Kareem P. M.** Prediction Models by Response Surface Methodology for Turning Operation // *Am. J. of Model. and Optim.* 2015. Vol. 3, N. 1. P. 1–6.
2. **Sarmasti Emami M. R.** Fuzzy Logic Applications in Chemical Processes // *The J. of Math. and Comput. Sci.* 2010. Vol. 1, N. 4. P. 339–348.
3. **Krishnamoorthy S.** Linguistic features for review helpfulness prediction // *Expert Syst. with Appl.* 2015. Vol. 42, N. 7. P. 3751–3759.
4. **Nasrollahzadeh K., Basiri M. M.** Prediction of shear strength of FRP reinforced concrete beams using fuzzy inference system // *Expert Syst. with Appl.* 2014. Vol. 41, N. 4. P. 1006–1020.
5. **Salski A., Bartels F.** A fuzzy approach to land evaluation // *IASME Trans.* 2005. Vol. 5, N. 2. P. 774–780.
6. **Kizhisseri M. I., Mohamed M. M. A.** Fuzzy-based wastewater quality indices for pollution classification: a case study in the United Arab Emirates // *Environ. Syst. and Decis.* 2016. Vol. 36, N. 1. P. 62–71.
7. **Chandra P. H., Kalavathy S. M. S. T., Jayaseeli A. M. I., Karoline J. P.** Mechanism of fuzzy ARMS on chemical reaction // *Adv. in Intell. Syst. and Comput.* 2016. N. 424. P. 43–53.
8. **Гермашев И. В., Дербисер В. Е., Морозенко Т. Ф., Орлова С. А.** Оценка качества технических объектов с ис-

пользованием нечетких множеств // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2001. Т. 67, № 1. С. 65–68.

9. **Гермашев И. В., Дербисер В. Е.** Оптимизация состава полимерных композиций с использованием теории нечетких множеств // Теоретические основы химической технологии. 2001. Т. 35, № 4. С. 440–443.

10. **Кумыков Р. М.** Растворимые, термо- и огнестойкие полигетероарилены на основе производных хлораля // Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет, 2010.

11. **Оразбаев Б. Б.** Методы многокритериального выбора и интеллектуальные системы принятия решений для управления производственными объектами при нечеткой исходной информации // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет), 1996.

12. **Орлов А. И., Луценко Е. В.** Системная нечеткая интервальная математика. Краснодар: КубГАУ, 2014.

13. **Орлов А. И.** Нечисловая статистика. М.: МЗ-Пресс, 2004.

14. **Egrioglu E., Aladag C. H., Basaran M. A., Yolcu U., Uslu V. R.** A new approach based on the optimization of the length of intervals in fuzzy time series // *J. of Intell. and Fuzzy Syst.* 2011. Vol. 22, N. 1. P. 15–19.

15. **Voskoglou M. Gr., Subbotin I. Ya.** Application of the Triangular Fuzzy Model to Assessment of Analogical Reasoning Skills // *Am. J. of Appl. Math. and Stat.* 2015. Vol. 3, N. 1. P. 1–6.

16. **Мешалкин В. П.** Экспертные системы в химической технологии. М.: Химия, 1995.

17. **Germashev I. V., Derbisher V. E.** Properties of unimodal membership functions in operations with fuzzy sets // *Russian Mathematics (Iz VUZ).* 2007. Vol. 51, N. 3. P. 72–75.

18. **Полимерные материалы.** URL: <http://www.polymer-branch.com/> (дата обращения: 03.05.15).

**I. V. Germashev**, Professor, e-mail: [i.v.germashev@volsu.ru](mailto:i.v.germashev@volsu.ru), Volgograd State University,

**V. E. Derbisher**, Professor, e-mail: [derbisher\\_ve@vstu.ru](mailto:derbisher_ve@vstu.ru),

**E. V. Derbisher**, Associate Professor, e-mail: [derbisher2@vstu.ru](mailto:derbisher2@vstu.ru),  
Volgograd State Technical University,

**E. A. Markushevskaya**, Associate Professor, e-mail: [emarkushevskaya@vspu.ru](mailto:emarkushevskaya@vspu.ru),  
Volgograd State Social Pedagogical University

## The Fuzzy Data Analysis for the Chemical-Technological Systems Optimization

*The data analysis method in a fuzzy, incomplete, heterogeneous information source for chemical-technological systems optimization is proposed. The research results develop chemical engineer scientific and production activities information systems mathematical software in terms of modeling linguistic resources and can be used for informed decision making for example by optimizing the composite substances content. Fuzzy numbers formalize the primary data and this resulted in a parametric space that describes the multicomponent systems. The compliance index calculation to demanded requirements for the each system parameter allows moving to the relative dimensionless physical values. The weighted voting procedure was used as an aggregate function. The resulting value reflects a compliance integrated measure to demanded requirements for the chemical-technological system. Based on the proposed approach obtained operator formalizes the primary data, which allow to realize the fuzzification in automatic mode. A few examples illustrate the operator application to solve practical problems in the polymer compositions field. The choosing the best polymer composition problem and also the polymer compositions classification problem in terms of quality were solved. This operator is the basis of the information systems mathematical support. The data flows scheme for such systems is proposed. These systems can be used for organization of engineers and researchers automated working places. The use of experts is only necessary at the initial stage, the formation of data models. Further data analysis is carried out automatically.*

**Keywords:** data analysis, data model, operator, fuzzy number, multi-criteria analysis, identification, classification, chemical-technological systems, mathematical software, information system

## References

1. **Khidhir B. A., Al-Oqaiel W., Kareem P. M.** Prediction Models by Response Surface Methodology for Turning Operation, *Am. J. of Model. and Optim.*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1–6.
2. **Sarmasti Emami M. R.,** Fuzzy Logic Applications in Chemical Processes, *The J. of Math. and Comput. Sci.*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 339–348.
3. **Krishnamoorthy S.** Linguistic features for review helpfulness prediction, *Expert Syst. with Appl.*, 2015, vol. 42, no. 7, pp. 3751–3759.
4. **Nasrollahzadeh K., Basiri M. M.** Prediction of shear strength of FRP reinforced concrete beams using fuzzy inference system, *Expert Syst. with Appl.*, 2014, vol. 41, no. 4, pp. 1006–1020.
5. **Salski A., Bartels F.** A fuzzy approach to land evaluation. *IASME Trans.*, 2005, vol. 5, no. 2, pp. 774–780.
6. **Kizhisseri M. I., Mohamed M. M. A.** Fuzzy-based wastewater quality indices for pollution classification: a case study in the United Arab Emirates, *Environ. Syst. and Decis.*, 2016, vol. 36, no. 1, pp. 62–71.
7. **Chandra P. H., Kalavathy S. M. S. T., Jayaseeli A. M. I., Karoline J. P.** Mechanism of fuzzy ARMS on chemical reaction, *Adv. in Intell. Syst. and Comput.*, 2016, no. 424, pp. 43–53.
8. **Germashev I. V., Derbisher V. E., Morozenko T. F., Orlova S. A.** Otsenka kachestva tehnikeskikh ob'ektov s ispolzovaniem nechyotkih mnozhestv, *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2001, vol. 67, no. 1, pp. 65–68 (Germashev I. V., Derbisher V. E., Morozenko T. F., Orlova S. A. Assessment of technical objects quality using fuzzy multitudes, *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2001, vol. 67, no. 1, pp. 65–68 (in Russian)).
9. **Germashev I. V., Derbisher V. E.** Optimizatsiya sostava polimernyh kompozitsiy s ispolzovaniem teorii nechyotkih mnozhestv, *Teor. Osn. Him. Tehnol.*, 2001, vol. 35, no. 4, pp. 440–443 (Germashev I. V., Derbisher V. E. Optimization of a compound of polymer compositions using the theory of fuzzy multitudes, *Teor. Osn. Him. Tehnol.*, 2001, vol. 35, no. 4, pp. 440–443 (in Russian)).
10. **Kumykov R. M.** *Rastvorimye, termo- i ognestoykie poligeteroarileny na osnove proizvodnyh hloralaya.* Chemical sciences doctor dissertation abstract, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 2010. (Kumykov R. M. Soluble, thermo resistant and fire-proof polyheteroarylenes on the basis of chloral derivatives. Chemical sciences doctor dissertation abstract, Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, 2010 (in Russian)).
11. **Orazbayev B. B.** *Metody mnogokriterialnogo vybora i intellektualnye sistemy prinyatiya resheniy dlya upravleniya proizvodstvennymi ob'ektami pri nechyotkoy ishodnoy informatsii.* Technical sciences doctor dissertation abstract, Moscow, 1996, Moscow State Institute of Steel and Alloys (technological university) (Orazbayev B. B. Methods of multiple criteria and intellectual systems of making decisions for the management of industrial objects along with fuzzy initial information, Technical sciences doctor dissertation abstract, Moscow State Institute of Steel and Alloys (technological university), Moscow, 1996 (in Russian)).
12. **Orlov A. I., Lutsenko E. V.** *Sistemnaya nechyotkaya intervalnaya matematika.* KSAU, Krasnodar, 2014. (Orlov A. I., Lutsenko E. V. System fuzzy interval mathematics, KSAU, Krasnodar, 2014 (in Russian)).
13. **Orlov A. I.** *Nechislovaya statistika.* MZ-Press, Moscow, 2004. (Orlov A. I. Nonnumeric statistics. MZ-Press, Moscow, 2004 (in Russian)).
14. **Egrioglu E., Aladag C. H., Basaran M. A., Yolcu U., Uslu V. R.** A new approach based on the optimization of the length of intervals in fuzzy time series, *J. of Intell. and Fuzzy Syst.*, 2011, vol. 22, no. 1, pp. 15–19.
15. **Voskoglou M. Gr., Subbotin I. Ya.** Application of the Triangular Fuzzy Model to Assessment of Analogical Reasoning Skills, *Am. J. of Appl. Math. and Stat.*, 2015, vol. 3, no. 1, pp. 1–6.
16. **Meshalkin V. P.** *Expertnye sistemy v himicheskoy tehnologii Chemistry.* Moscow, 1995, (Meshalkin V. P. Expert systems in chemical engineering, Chemistry, Moscow, 1995 (in Russian)).
17. **Germashev I. V., Derbisher V. E.** Properties of unimodal membership functions in operations with fuzzy sets, *Russ. Math. (Iz VUZ)*, 2007, vol. 51, no. 3, pp. 72–75.
18. **Polimernye materialy,** available at: <http://www.polymer-branch.com/> (accessed 03.05.15) (in Russian).

УДК 629.783; 621.396

**Х. Г. Асадов**, д-р техн. наук, проф., e-mail: asadzade@rambler.ru, **Ш. Н. Джахидзаде**, докторант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджан,

**М. И. Керимова**, диссертант,

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджан

## Метод дискретно-вариационной оптимизации систем дистанционного зондирования

Современные компьютерные методы оптимизации (генетический метод, метод нейронных сетей, метод нечетких множеств, метод мультиагентов и т. д.) требуют разработки или наличия соответствующего программного обеспечения и неприемлемы для применения в отдельных нестандартных случаях, требующих принятия оперативного рационального или оптимального продолжения решения. Указанная задача более или менее удачно решается в многокритериальных или многоуровневых методах оптимизации. Однако эти методы отличаются большой трудоемкостью и не позволяют принимать оперативное решение в создавшихся нестандартных ситуациях. Показана необходимость разработки новых методов оптимизации систем дистанционного зондирования, специфика работы которых заключается в наличии существенного влияния окружающей среды в зоне прохождения зондирующего и отраженного сигналов. Изложен предлагаемый метод дискретно-вариационной оптимизации информационных систем. Дано математическое обоснование предлагаемого метода. Предложен алгоритм реализации этого метода.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, оптимизация, окружающая среда, информационный критерий, функционал

### Введение

Как отмечается в работе [1], в начале второй половины 20-го века в связи с развитием косми-

ческой техники был получен ряд важных результатов, обобщающих известные положения теории вариационного исчисления. Сюда относятся принцип максимума, метод динамического про-



граммирования, метод Кротова, метод Милютин—Дубовицкого и ряд других работ. Согласно работе [2], наличие помех в канале измерения приводит к необходимости фильтрации результатов измерения с учетом модели объекта. При этом оптимизация процесса измерений может быть осуществлена выбором оптимальной математической модели объекта, оптимальным выбором временного промежутка и наилучшим распределением моментов измерения внутри этого промежутка. Так, например согласно [3], при решении задач перевода самолета из заданной исходной точки в заданную конечную точку для оптимизации качества управления возможна реализация прямого вариационного метода, что позволяет генерировать траектории в темпе реального времени.

Как указывается в работе [4], вариационные методы анализа настолько глубоко проникли в теорию и практику автоматического регулирования, что каждый новый результат в этой области представляет определенный практический интерес. Одним из таких качественно новых результатов является "волновой" метод, основанный на аналогии между нахождением глобального экстремума интегрального функционала и распространением света в оптически неоднородной среде [5]. Вместе с тем ряд задач аэродинамического проектирования не могут быть решены классическими вариационными методами для течений с циркуляцией и локальными ограничениями [6]. Согласно работе [7], вариационный метод может быть использован для решения задач устранения шума, а также задач обработки изображений. При этом могут быть рассмотрены гауссовские и пуассоновские шумы. Как указывается в работе [1], современные задачи управления характеризуются наличием разнообразных ограничений, а также основными дифференциальными связями, что ограничивает их практическое использование. При этом, согласно [6], в практических задачах проектирования и оптимизации важным является выбор целевого функционала.

В работах [8, 9] были рассмотрены вопросы оптимизации измерительных систем и систем дистанционного зондирования по информационному критерию. В указанных работах на основе конкретных примеров ставилась цель нахождения оптимальной временной зависимости отношения сигнал/шум в смысле достижения целевым функционалом экстремального значения за определенный временной промежуток  $t_1$  в случае выполнения особого ограничительного условия, налагаемого на отношение сигнал/шум. Решение указанной задачи позволило получить аналитическое выражение оптимальной зависимости отношения сигнал/шум от времени, при которой целевой функционал достигает экстре-

мальной величины. Вместе с тем в указанных работах не нашел своего решения следующий вопрос: в каких условиях функция зависимости отношения сигнал/шум от времени, отличная от экстремали выбранного целевого функционала, удовлетворяющая условию ограничения, примененного также к экстремали за период  $0 - t_1$ , за более длительное время  $t_2 > t_1$  может обеспечить более высокую информативность системы.

В настоящей работе изложены результаты проводимого анализа, позволяющего решить этот вопрос.

### Предлагаемый метод

Общая схема рассматриваемой системы дистанционного зондирования показана на рисунке.

Считаем, что вследствие различных динамических процессов, происходящих во внешней среде прохождения зондирующего сигнала, динамический диапазон отраженных с объекта сигналов подвергается изменению во времени, т. е. имеем функцию

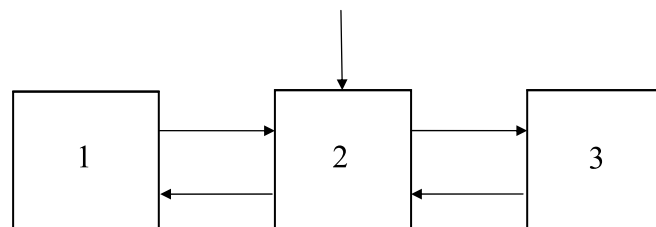
$$\psi = \psi(t), \quad (1)$$

где  $\psi$  — динамический диапазон отраженных от объекта сигналов, определяемый как

$$\psi(t) = \frac{U_{\max}(t)}{U_{\min}}, \quad (2)$$

здесь  $U_{\max}(t)$  — максимально возможный сигнал, отраженный от объекта;  $0 \leq t \leq t_0$ ;  $U_{\min} = 3\sigma_m$ , где  $\sigma_m$  — СКО шумов в канале.

Рассматривается бинарное множество функций  $\Phi_1 = \{\psi(t), \psi_1(t)\}$ , где  $\psi(t)$  подлежит вычислению по критерию максимальной информативности системы в интервале  $0 < t \leq t_0$ ; а  $\psi_1(t)$  подлежит подбору по тому же критерию в интервале  $0 < t \leq t_1$ , где  $t_1 > t_0$ . При этом требуется вычислить условия, при котором выбор  $\psi_1(t)$  в смысле достижения высокой информативности более предпочтителен, чем  $\psi(t)$ .



Общая схема системы дистанционного зондирования:

1 — узел передачи зондирующего сигнала и обработки принятого сигнала; 2 — внешний канал передачи зондирующего и отраженного сигнала; 3 — объект излучения

## Реализация метода

Рассмотрим механизм вычисления первого элемента множества  $\Phi_1$ , т. е. функции  $\psi(t)$ . Информационный критерий, применяемый для вычисления  $\psi(t)$ , имеет вид

$$M_1 = \sum_{i=1}^n N(t_i) \log_2 \psi(t_i) dt, \quad (3)$$

где в дискретной сумме (3)  $N(t_i)$  — число отсчетов, осуществляемых в момент  $t_i$ . Считаем, что изучаемый объект пространственно информативный и в фиксированный момент  $t_i$  возможно параллельное проведение  $N(t_i)$  измерений.

Выражение (3) запишем в условно-непрерывном виде:

$$M_{10} = \int_0^{t_0} N(t) \log_2 \psi(t) dt. \quad (4)$$

На функцию  $\psi(t)$  налагается следующее ограничительное условие:

$$\int_0^{t_0} \psi(t) dt = C_1, \text{ где } C_1 = \text{const}. \quad (5)$$

С учетом выражений (4) и (5) составим полный функционал безусловной вариационной оптимизации:

$$M_{20} = \int_0^{t_0} N(t) \log_2 \psi(t) dt + \lambda \left[ \int_0^{t_0} \psi(t) dt - C_1 \right], \quad (6)$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа.

Рассмотрим решение оптимизационной задачи (6). Согласно уравнению Эйлера [10], оптимальная функция  $\psi(t)$ , приводящая функционал (6) к его экстремальному значению, должна удовлетворить условию

$$\frac{d \{ N(t) \cdot \log_2 \psi(t) + \lambda [\psi(t) - C_1] \}}{d\psi(t)} = 0. \quad (7)$$

С учетом условия (7) имеем

$$\frac{N(t)}{\psi(t) \cdot \ln 2} + \lambda = 0. \quad (8)$$

Из выражения (8) находим

$$\psi(t) = -\frac{N(t)}{\lambda \ln 2}. \quad (9)$$

С учетом выражений (3) и (9) получим

$$-\int_0^{t_0} \frac{N(t)}{\lambda \ln 2} dt = C_1. \quad (10)$$

Из выражения (10) находим

$$\lambda = -\int_0^{t_0} \frac{N(t)}{C_1 \cdot \ln 2} dt. \quad (11)$$

Применительно к функции  $N(t)$  можно рассмотреть следующие варианты:

$$1) N(t) = k_1 \cdot t; \quad (12)$$

$$2) N(t) = N_0 - k_2 \cdot t. \quad (13)$$

Рассмотрим случай (12), когда число параллельно проводимых измерений в момент  $t$ ,  $0 \leq t \leq t_0$ , растет по линейному закону. С учетом выражений (11) и (12) получим

$$\lambda = -\frac{k_1 \cdot t_0^2}{2C_1 \cdot \ln 2}. \quad (14)$$

Из выражений (7), (12), (14) получим

$$\psi(t)_{\text{opt}} = \frac{2C_1 \cdot t}{t_0^2}. \quad (15)$$

Таким образом, при решении (15) функционал (6) достигает экстремального значения. Для выяснения типа экстремума можно вычислить вторую производную интегранта в выражении (6) и убедиться, что она отрицательна, т. е. функционал (6) при решении (15) достиг бы максимального значения.

Рассмотрим условия решения указанной выше задачи исследования условий расширения временного интервала до значения  $0 \leq t \leq t_1$ . Допустим, что имеется функция  $\psi_{11}(t)$ , удовлетворяющая условию

$$\int_0^{t_1} \psi_{11}(t) dt = C_1. \quad (16)$$

В этом случае функционал (6) применительно к функции  $\psi_{11}(t)$  может быть записан в следующем виде:

$$M_{21} = \int_0^{t_1} N(t) \cdot \log_2 \psi_{11}(t) dt. \quad (17)$$

Допустим, что функция  $\psi_{11}(t)$  сепарабельна, т. е. может быть представлена в виде

$$\psi_{11}(t) = k_1(t) \cdot \psi(t). \quad (18)$$

С учетом условия

$$t_1 = t_0 + \Delta t, \quad (19)$$

а также выражения (18), функционал (17) может быть представлен как

$$\begin{aligned} M_{21} &= \int_0^{t_0} N(t) \cdot \log_2 \psi_{11}(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} N(t) \log_2 \psi_{11}(t) dt = \\ &= \int_0^{t_0} N(t) \cdot \log_2 k(t) dt + \int_0^{t_0} N(t) \log \psi(t) dt + \\ &\quad + \int_{t_0}^{t_1} N(t) \log_2 \psi_{11}(t) dt. \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом выражений (4) и (20) вычислим разность

$$\begin{aligned} \Delta M_1 &= M_{21} - M_{10} = \\ &= \int_0^{t_0} N(t) \cdot \log_2 k(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} N(t) \log_2 \psi_{11}(t) dt = (21) \\ &= \int_0^{t_1} N(t) \cdot \log_2 k(t) dt + \int_{t_0}^{t_1} N(t) \log \psi(t) dt. \end{aligned}$$

Таким образом, ответ на приведенный выше первый вопрос может быть сформулирован следующим образом: при выполнении условия  $\Delta M_1 > 0$  функция  $\psi_{11}(t)$ , удовлетворяющая условиям (16) и (18), может обеспечить более высокую информативность системы.

### Модельное исследование

Проведем модельное исследование по первому вопросу, т. е. по функции  $\psi_{11}(t)$ . Допустим, что осуществлен произвольный выбор функции  $\psi_{11}(t)$ , т. е.

$$\psi_{11M}(t) = C_3 \cdot t^2. \quad (22)$$

В этом случае согласно (5) получим

$$\int_0^{t_1} C_3 \cdot t^2 dt = C_1. \quad (23)$$

Из выражения (23) находим

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{3C_1}{C_3}}. \quad (24)$$

С учетом выражения (15) функцию  $\psi_{11M}$  представим как

$$\psi_{11M} = \left( \frac{2C_1 \cdot t}{t_0^2} \right) \cdot \left( \frac{C_3 t \cdot t_0^2}{2C_1} \right) = k_3(t) \cdot \psi(t), \quad (25)$$

где

$$k_3(t) = \left( \frac{C_3 t \cdot t_0^2}{2C_1} \right). \quad (26)$$

Следовательно, с учетом выражений (21) и (26) следует доказать неотрицательность величины  $\Delta M_1$ , с учетом замены нуля в нижнем пределе на  $t_{01}$ , где  $0 < t_{01} < t_1$ , т. е.

$$\begin{aligned} \Delta M_1 &= \int_{t_{01}}^{t_1} N(t) \cdot \log_2 \frac{C_3 t_0^2 \cdot t}{2C_1} dt + \\ &+ \int_{t_0}^{t_1} N(t) \log_2 \psi(t) dt. \end{aligned} \quad (27)$$

В случае  $\psi = 1$  при  $t_0 < t < t_1$  второй член в (27) равен нулю. Что касается первого члена в (27), то при фиксированных  $C_3$  и  $C_1$  всегда можно выбрать такое значение  $t_0$ , которое обеспечило бы положительное значение  $\Delta M_1$ .

С учетом выражения (27) таким значением будет

$$t_0 > \sqrt{\frac{2C_1}{C_3 \cdot t_1}}. \quad (28)$$

С учетом выражений (23) и (28) получим

$$t_0 > t_1 \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (29)$$

Таким образом, предлагаемый метод дискретно-вариационной оптимизации позволяет:

— определить тот интервал времени  $t_0$ , в течение которого оптимальная режимная функция  $\psi(t)$ , вычисленная по информационному критерию, будет предпочтительной по сравнению со вторым элементом бинарного множества режимных функций, элементы которого подвержены единому ограничительному условию;

— определить более продолжительный интервал времени  $t_1$ , в течение которого специально подобранная режимная функция  $\psi_1(t)$  будет предпочтительней, чем  $\psi(t)$ .

### Заключение

В заключение сформулируем основные выводы проведенного исследования.

1. Показана необходимость разработки новых методов оптимизации систем дистанционного зондирования, специфика работы которых заключается в наличии существенного влияния окружающей среды в зоне прохождения зондирующего и отраженного сигналов.

2. Изложен предлагаемый метод дискретно-вариационной оптимизации информационных систем. Дано математическое обоснование предлагаемого метода.

### Список литературы

1. Гурман В. И., Расина И. В., Блинов А. О. Эволюция и перспективы приближенных методов оптимального управления // Программные системы. Теория и приложения. 2011. № 2 (6). С. 11—29.
2. Мочалов И. А., Пригожин Л. Б. Вариационная задача оптимизации измерений в алгоритмах идентификации и управления // Cybernetika, 1987. Т. 23. Вып. 6. С. 498—514.
3. Лам Т. Т. Решение краевой задачи формирования траектории движения самолета при выполнении пространственного маневра // Электронный журнал "Труды МАИ". 2014. Вып. № 78.

4. **Кротов В. Ф.** Методы решения вариационных задач на основе достаточных условий абсолютного минимума // Автоматика и телемеханика. 1962. Т. 23, № 12. С. 1571—1583.

5. **Казakov А. Л., Лемперт Ф. Ф.** Об одном подходе к решению задач оптимизации, возникающих в транспортной логистике // Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 50—61.

6. **Аульченко С. М., Латыпов Ф. Ф., Никуличев Ю. В.** Методы проектирования и оптимизации крыльевых профилей в дозвуковом потоке // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6, № 4. С. 429—439.

7. **Данг Н. Х. Т.** Устранение гауссовского и пуассоновского шумов на растровых изображениях // Известия Туль-

ского государственного университета. Серия Естественные науки. 2014. Вып. 4. С. 127—142.

8. **Асадов Х. Г.** Оптимизация и синтез экстремальных информационно-измерительных систем дистанционного зондирования // Измерительная техника. 2002. № 7. С. 55—57.

9. **Асадов Х. Г.** Применение принципа параметрического уменьшения размерности для синтеза одного подкласса информационных систем и планирования измерительного эксперимента // Измерительная техника. 2003. № 6. С. 3—7.

10. **Эльсгольц Л. Э.** Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

**H. H. Asadov**, Professor, e-mail: asadzade@rambler.ru, **Sh. N. Jahidzadeh**, Doctorant, National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan  
**M. I. Kerimova**, Dissertant, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

## Method of Discrete Variation Optimization of Remote Sensing Systems

*The modern computer methods of optimization (genetic methods, method of neuron networks, method of fuzzy nets, multi-agents method, etc) requires development or presence of relevant software and not acceptable for utilization in some non-standard cases demanding operative rational or optimum continuation of previously accepted decision. Such type of tasks in some cases can be solved using multi-criteria or multi-level methods of optimization. But these methods are laborious and don't allow to take an operative decisions in non-standard situations. In the article the necessity for development of new methods for optimization of remote sensing systems is shown. It is stressed out that feature of such systems is that presence of significant effect of environment on sensing and reflected signal in the channel of its transfer. The suggested method of discrete-variation optimization of information systems is described. The mathematical grounding of the method is given. The realization algorithm of suggested method is developed.*

**Keywords:** remote sensing, optimization, environment, information criteria, functional

### References

1. **Gurman V. I., Rasina I. V., Blinov A. O.** Jevolucija i perspektivy priblizhennyh metodov optimal'nogo upravljenja, *Programnyye sistemy. Teorija i prilozhenija*, 2011, no. 2 (6), pp. 11—29. (V. I. Gurman, I. V. Rasina, A. O. Blinov. Evolution and perspectives of proximate methods of optimum control. *Software. Theory and application*, 2011, no. 2 (6), pp. 11—29. (in Russian).

2. **Mochalov I. A., Prigozhin L. B.** Variacionnaja zadacha optimizacii izmerenij v algoritmah identifikacii i upravljenja, *Kybernetika*, 1987, vol. 23, is. 6, pp. 498—508. (I. A. Mochalov, L. B. Prigozhin. Variation task of optimization of measurements in algorithms of identification and control, *Cybernetics*, 1987, vol. 23, is. 6, pp. 498—508.) (in Russian).

3. **Lam T. T.** Reshenie kraevoj zadachi formirovanija traektorii dvizhenija samoleta pri vypolnenii prostranstvennogo manevra, *Jelektronnyj zhurnal "Trudy MAI"*, 2014, is. 78. (T. T. Lam. Solution of border task of formation of trajectory of aircraft motion upon carrying out of spatial maneuvers.) (in Russian).

4. **Krotov V. F.** Metody reshenija variacionnyh zadach na osnove dostatochnyh uslovij absoljutnogo minimuma, *Avtomatika i Telemehnika*, 1962, vol. 23, no. 12, pp. 1571—1583. (V. F. Krotov. Methods of solution of variation tasks on the basis of sufficient conditions of absolute minimum. *Automation and Telemechanics*, 1962, vol. 23, № 12, pp. 1571—1583) (in Russian).

5. **Kazakov A. L., Lempert F. F.** Ob odnom podhode k resheniju zadach optimizacii voznikajushih v transportnoj logistike. *Avtomatika i Telemehnika*, 2011, no. 7, pp. 50—61 (A. L. Kazakov,

F. F. Lempert. On one approach towards solution of optimization tasks occurred in transport logistics. *Automation and Telemechanics*. 2011, no. 7, pp. 50—61) (in Russian).

6. **Aul'chenko S. M., Latypov F. F., Nikulichev Ju. V.** Metody proektirovanija i optimizacii kryl'evyh profilej v dozvukovom potoke, *Teplofizika i ajeromehanika*, 1999, vol. 6, no. 4, pp. 429—439 (in Russian).

7. **Dang N. H. T.** Ustranenie gaussovskogo i puassonovskogo шумов на растровых изображениях, *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Estestvennye nauki*, 2014, is. 4, pp. 127—142 (in Russian).

8. **Asadov H. G.** Optimizacija i sintez jekstremal'nyh informacionno-izmeritel'nyh sistem distancionnogo zondirovanija, *Izmeritel'naja tehnika*, 2002, no. 7, pp. 55—57 (Asadov H. H. Optimization and synthesis of extremum information-measuring systems of remote sensing. *Measuring Techniques*. 2002, no. 7, pp. 55—57) (in Russian).

9. **Asadov H. G.** Primenenie principa parametricheskogo umen'shenija razmernosti dlja sinteza odnogo podklassa informacionnyh sistem i planirovanija izmeritel'nogo jeksperimenta, *Izmeritel'naja tehnika*, 2003, no. 6, pp. 3—7. (Asadov H. H. Application of the principle of parametric decrease of measure for synthesis of one subclass of information systems and planning of measuring experiments. *Measuring Technoques*, 2003, no. 6, pp. 3—7) (in Russian).

10. **Jel'sgol'c L. Je.** *Differencial'nye uravnenija i variacionnoe ischislenie*. Moscow, Nauka, 1974, 432 p. (Elsgolts L. E. Differential equations and variation computation. Moscow, Nauka, 1974, 432 p.) (in Russian).

УДК 004.738

**В. А. Антоненко**, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., e-mail: anvial@lvk.cs.msu.su,  
**Р. Л. Смелянский**, член-корр. РАН, проф., e-mail: smel@cs.msu.su,  
**А. А. Ермилов**, ст. программист-разработчик, e-mail: aermilov@arccn.ru,  
**А. Р. Романов**, студент, e-mail: xanter@lvk.cs.msu.su,  
**Н. М. Пинаева**, студент, e-mail: pinaeva@lvk.cs.msu.su,  
**А. В. Плакунов**, программист-разработчик, e-mail: artacc@lvk.cs.msu.su,  
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

## Платформа управления виртуальными сетевыми функциями C2<sup>1</sup>

*Рассматривается проблема построения универсальной облачной платформы. Универсальной в том смысле, что она равно хорошо обеспечивает виртуализацию и управление как сервисов для телеком-операторов, так и сервисов для корпоративных приложений. Показано, что ключевое значение для решения этой проблемы имеет система управления жизненным циклом сервисов. Представлена архитектура облачной платформы C2, в которой реализованы предлагаемые решения. Архитектура этой платформы следует стандарту ETSI NFV MANO. Эффективность полученного решения продемонстрирована на экспериментах, в которых были получены оценки накладных расходов на масштабирование и поддержание доступности виртуальных сервисов.*

**Ключевые слова:** SDN, NFV, облачная инфраструктура

### Введение

Современные телекоммуникационные сети содержат большое количество проприетарного и, как правило, узкоспециализированного оборудования, созданного для реализации конкретной функциональности. Внедрение новой услуги требует установки нового комплекта оборудования, поддерживающего необходимую функциональность, и его настройки. Такой подход имеет высокие капитальные и операционные затраты, а также не позволяет динамически масштабировать, автоматически настраивать и поддерживать работоспособность сервиса. Использование технологии виртуализации сетевых функций (Network Functions Virtualization, NFV) [1] позволяет решить вышеперечисленные проблемы. Стоит отметить, что технология виртуализации сетевых функций пришла именно из области телекоммуникации.

Виртуализация сетевых функций — это технология, позволяющая за счет виртуализации физических ресурсов (вычислительных, сетевых

и хранилищ данных) программно реализовать необходимую функциональность на типовом оборудовании. Тем самым достигается независимость логики сервиса от оборудования, на котором он выполняется. Инженерия "виртуальной сетевой функции" (Virtual Network Function, VNF) зависит от целей, для которых строится инфраструктура виртуализации сетевых функций, от того, кто и для чего строит эту инфраструктуру. Можно условно выделить две основные группы потребителей такой инфраструктуры: телеком-операторы и операторы корпоративных центров обработки данных (далее ЦОД).

Цель виртуализации сетевых функций для телеком-операторов заключается в представлении программными методами сетевых сервисов для анализа, управления и инжиниринга сетевого трафика. Для телеком-операторов виртуальная сетевая функция — это сущность, реализующая функциональность специализированных программно-аппаратных сетевых устройств (так называемых appliance) для коммутирования, маршрутизации, фильтрации, балансировки и тому подобной обработки трафика. Здесь объектом обработки является не запрос/данные пользователя, а трафик, им вызванный. Примерами сервисов телеком-операторов (телко-сервисов)

<sup>1</sup> Данная работа поддержана грантом РФФИ № 16-07-01261, 2016.

могут быть IP телефония, видеоконференцсвязь, EPC, биллинг, DPI (Deep Package Inspection), трафик инжиниринг и мониторинг, и т. п.

Вторая группа — это операторы корпоративных ЦОД. В этом случае объектом обработки виртуальных функций являются данные, возникающие в процессе обработки запроса пользователя. Здесь виртуальная сетевая функция — это, например, программа для управления базами данных, web-сервер и любая другая функциональность, нацеленная на обработку запросов пользователей — корпоративных клиентов.

Для корпоративных клиентов важна доступность облачных сервисов. Непрерывность доступа обычно не столь критична. Для телетрафика важна не только доступность, но и непрерывность доступа. Потеря трафика не допустима! Например, если произойдет ошибка на виртуальной машине, где запущен сервер раздачи видео, то виртуальная машина просто будет перезапущена, а для пользователя это лишь небольшое неудобство по причине недоступности видео в течение нескольких секунд. Для телеком-операторов, если абонент звонит в службу спасения с сообщением о пожаре в своей квартире, то не допустимо сбросить его звонок и заставить перезвонить.

Гарантированная производительность — еще одно важное свойство телко-сервисов. Она может быть обеспечена только при наличии предсказуемого количества ресурсов — вычислительных ядер, памяти, сетевых ресурсов, при которых виртуальные машины будут успешно запущены и взаимодействовать между собой с нужной скоростью. Поэтому телеком-операторы накладывают ограничения на время реакции сервиса, что влечет определенные ограничения на размещение как самих сервисов в сети, так и выделяемых под них ресурсов.

Корпоративные клиенты приложений в корпоративных ЦОД не столь требовательны к задержкам прохождения пакетов, хотя и здесь могут быть исключения, например, видеосервисы, приложения безопасности внутри корпоративного ЦОД, такие как межсетевой экран веб-приложений, система предотвращения или обнаружения вторжений и т. д.

Важно понимать, что объекты обработки для этих двух разных видов сервисов (телко и корпоративных) разные: для телко-сервиса объектом обработки является трафик, поданный на вход телко-сервиса; для корпоративных сервисов — запрос пользователя, обработка его данных. Также важно осознавать, что инфраструктура для реализации как телко, так и корпоративных сервисов может быть распределенной, с весьма сложной топологией.

В настоящее время отсутствует унифицированное решение, которое бы равно эффективно

поддерживало как телко-сервисы, так и корпоративные сервисы в виде виртуальных сетевых функций. В статье будет показано, что:

- причина этого заключается в различии требований к доступности и производительности телко-сервисов и корпоративных сервисов;
- решение этой проблемы заключается в организации и настройках системы обеспечения жизненного цикла виртуальной сетевой функции, что позволит использовать ресурсы одного ЦОД для обеих категорий пользователей.

В статье представлена архитектура облачной платформы C2, которая следует эталонной модели ETSI NFV MANO [1] и которая является решением сформулированной выше проблемы. Дизайн и архитектура этой платформы полностью соответствуют требованиям виртуальных сетевых функций, реализующих телко-сервисы. Платформа поддерживает полный жизненный цикл виртуальной сетевой функции: создание, настройка, мониторинг, удаление. Как будет показано ниже, предложенная эталонная модель полностью соответствует требованиям поддержки корпоративных сервисов.

Введем несколько определений, следуя [1]. Виртуальная сетевая функция (далее "функция") — программная реализация сетевой функции, которая может быть установлена и запущена в инфраструктуре виртуализации сетевых функций. Виртуальный сервис (сервис) — определенная композиция функций, заданных функциональной и поведенческой спецификацией [1]. Под инфраструктурой виртуальных сетевых функций (Network Function Virtualization Infrastructure, NFVI) понимается программно-аппаратное окружение (физические серверы с установленным программным обеспечением (ПО) виртуализации, объединенные в сеть), в котором размещаются и функционируют функции.

Как видно, эти определения не охватывают случай корпоративного сервиса. Поэтому введем понятие виртуальной прикладной функции (Virtualized Application Function — VAF) как программы с четко определенными внешними интерфейсами и логикой функционирования, предназначенной для обработки запросов, поступающих на ее выходы. Особенность и главное отличие VAF от VNF заключаются в том, что VAF может быть точкой предоставления VNS и подписываться на сервис, состоящий из цепочки VNF.

Везде далее, если не оговорено противное, термин "виртуальная функция" мы будем использовать как для VNF, так и для VAF. Жизненный цикл виртуальной функции охватывает все этапы ее существования — от создания до удаления (рис. 1).

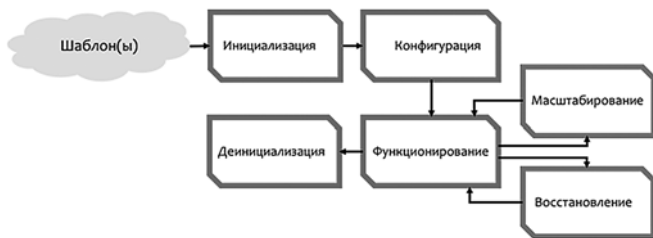


Рис. 1. Стадии жизненного цикла виртуальной функции

Определим экземпляр виртуальной функции как набор виртуальных машин, развернутых из образа операционной системы, с прикладным программным обеспечением, реализующим сервисы виртуальной функции, и сетей, возникающих при инициализации виртуальной функции. Состояние экземпляра функции определяется значениями параметров из заранее определенного списка, за которыми ведется мониторинг, параметры могут отображать различные аспекты работы виртуальных машин или сетей, входящих в состав экземпляра.

Дальнейшая структура статьи такова: в разделе 1 представлен обзор схожих работ в области виртуализации сетевых функций для корпоративного ЦОД и телеком-операторов. В разделе 2 описаны основные модули платформы C2 и взаимосвязи между ними, а также процессы регистрации и поддержки жизненного цикла функции, описание функций на языке TOSCA в виде TOSCA-шаблона. В разделе 3 показано соответствие платформы C2 модели ETSI NFV MANO, выполнены оценки накладных расходов на организацию, масштабирование и восстановление сервиса, показана зависимость пропускной способности каналов и задержек трафика от числа экземпляров функции на его пути и проведены эксперименты с пропускной способностью цепочек функций, включая функции от сторонних поставщиков.

## 1. Схожие работы

В данном разделе рассматриваются основные решения в области "NFV management and organization (MANO)" платформ на сегодняшний день. Сразу отметим, что в основном в этих проектах не сформулировано, на поддержку какого вида функций (VAF или VNF) ориентирована та или иная платформа. Из статей [5–21] можно сделать вывод, что эти платформы предназначены для применения в ЦОД, а вот конкретно для какого вида сервисов, авторы не уточняют. Тем не менее, как мы уже сказали выше, здесь есть существенные различия и особенности.

Рассмотрим основные проекты реализации MANO с точки зрения следующих критериев:

соответствие стандарту ETSI и полнота поддержки жизненного цикла функции.

Концептуально модель MANO состоит из трех уровней: оркестрация сервисов, управление функциями и управление инфраструктурой. Однако не все проекты, которые реализуют MANO, используют данное разделение на уровни с открытыми API. Следовательно, они не являются открытыми системами и могут быть интегрированы, использованы только как единое целое.

Например, в одной из первых реализаций MANO (проект OPNFV [5]) понятие сервиса эквивалентно понятию функции. В проекте Cloudify [6] понятия сервиса и функции, хотя и отличаются, но пользователь не может определять сервис как суперпозицию функций с определенным именем. В проекте Cloudify приходится управлять непосредственно экземпляром каждой функции, даже если они логически находятся в составе единой сервисной цепочки. Следовательно, средства управления и оркестрации этой платформы позволяют работать только с функциями, но с сервисом как суперпозицией функций. Это противоречит эталонной модели MANO.

Проект OPNFV [5] в основном разрабатывает интерфейс для менеджера виртуальной инфраструктуры, подходящий для использования будущими платформами виртуализации сетевых функций. Проект Cloudify [6] в основном сфокусирован на функциональности системы оркестрации и управления жизненным циклом (оркестратор платформы, менеджер функций) на базе различных менеджеров виртуальной инфраструктуры: OpenStack [7], ESXi [8] и Azure [9].

Проект с открытым исходным кодом OpenStack Tasker [10] — это еще одна реализация менеджера функций и оркестратора платформы. В отличие от Cloudify этот проект реализует MANO-платформу в виде расширения облачной платформы OpenStack. Это означает, что он не допускает поддержки других менеджеров виртуальной инфраструктуры. На момент написания статьи не доведены до конца такие возможности Tasker, как: интеграция с пользовательским интерфейсом платформы OpenStack и автоматическое управление восстановлением и масштабированием сетевых функций. Отдельно следует отметить необходимость выделять внешний адрес каждому экземпляру функции, что сокращает область применения системы и накладывает дополнительные требования к инфраструктуре сетевой функции.

Важным является то, как задавать сервис, т. е. как сообщать платформе о его организации и требованиях к виртуальной инфраструктуре. Проект Cloudify для этой цели использует язык спецификаций TOSCA. В Tasker для этих целей разработан собственный язык спецификации на

базе языка YAML, с возможностью поддержки языка TOSCA в будущем.

Для любой реализации MANO важным аспектом является совместимость со средствами мониторинга инфраструктуры ЦОД, например, проекты Zabbix [11] и NAGIOS [12].

Один из наиболее перспективных и гибких вариантов решения проблемы мониторинга сетевых ресурсов ЦОД — это использование программно-конфигурируемого сетевого (ПКС) контроллера [13], который не только может управлять трафик-инжинирингом в сети ЦОД, но и выполнять мониторинг физических и виртуальных сетевых компонентов в режиме реального времени. На момент написания статьи первые шаги в направлении интеграции ПКС контроллера и MANO-платформы сделали только проекты OPNFV, где реализован интерфейс для интеграции с контроллером OpenDayLight [14], и проект OpenContrail [15], где для этих целей используется собственный OpenContrail контроллер.

CORD (Central Office Re-architected as a Data-center, [16]) — единственная MANO-платформа, ориентированная как на корпоративные ЦОД, так и ЦОД телеком-операторов. В проекте предлагается установить в центральном офисе провайдера платформу виртуализации, реализующую модель издателя-подписчика для сервисов трех типов: сервисы уровня управления (например, контент-ориентированная сеть или виртуальная сеть по запросу), сервиса уровня данных (например, родительский контроль или NAT) и общие облачные сервисы (например, сеть доставки контента или интернет-вещей). Однако проект не объединяет эти три типа сервисов в единой платформе, а предоставляет три типа решений: для провайдеров интернета (R-CORD), для мобильных операторов (M-CORD) и для корпоративных клиентов (E-CORD).

На основании сказанного можно сделать вывод, что ни один из рассмотренных проектов не нацелен на управление виртуальными сервисами как в корпоративных ЦОД, так и в ЦОД телеком-операторов. Платформа виртуализации для телеком-операторов должна уделять особое внимание качеству сервиса при размещении функций, а также производительности и доступности при поддержке жизненного цикла функции. Платформа для операторов корпоративных ЦОД в главной мере должна озаботиться вопросом стабильности работы функции, тогда как качество сервиса, производительность и доступность отходят на второй план.

Также следует отметить, что публичных демонстраций работы каждой из систем (за исключением проекта Cloudify), с примерами масштабирования и восстановления сетевой функции

и с оценкой накладных расходов на построения цепочек сетевых функций отсутствуют.

## 2. Архитектура облачной платформы C2

Как было сказано во введении, основное отличие телеком NFV MANO-платформ от корпоративных — это то, до какой степени и какие требования к работе сетевых функций учитываются при их оркестрации. Поэтому при разработке архитектуры облачной платформы C2 учитывались требования, предъявляемые как к сервисам телеком, так и к сервисам операторов корпоративных центров обработки данных.

Экземпляром виртуальной функции назовем набор виртуальных машин, соединенных изолированными виртуальными сетями. Под масштабированием экземпляра виртуальной функции будем иметь в виду горизонтальное масштабирование. Другими словами, будем наращивать число экземпляров виртуальной функции в случае нехватки производительности действующих экземпляров. Под восстановлением экземпляра виртуальной функции будем понимать процесс детектирования некорректного функционирования экземпляра и выполнение определенных действий (конфигурация, перезагрузка, выполнения дополнительных команд и скриптов) для приведения экземпляра в нормальное состояние.

Облачная платформа C2 представляет собой расширение проекта Self-Organized Cloud (SOC) [17] и научных проектов, посвященных задачам размещения ресурсов в ЦОД [18, 19]. В проекте SOC функциональность менеджера виртуальной инфраструктуры практически полностью была реализована на базе платформы OpenStack. Это позволяет собирать информацию о доступных MANO-платформе физических ресурсах (ядрах ЦП, оперативной памяти, дисковых подсистемах) и создавать пользователю виртуальные сети — тенанты. Под тенантом будем понимать совокупность из виртуальной сети, виртуальных хранилищ данных и виртуальных машин. Платформа C2 реализует функциональность MANO поверх платформы SOC типа "инфраструктура как услуга" и спроектирована как классическая трехуровневая система MANO, задача реализации которой ложится в основном на MANO-оркестратор платформы, менеджер функций и менеджер виртуальной инфраструктуры.

Структура облачной платформы C2 на уровне основных подсистем представлена на рис. 2.

Ключевым модулем является NFV оркестратор (C2-Orc). Его основная цель — это поддержка жизненного цикла всех экземпляров виртуальных функций. C2-Orc знает, из каких функций состо-



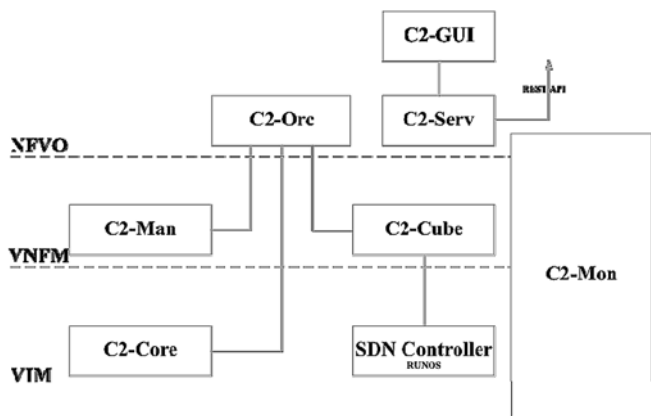


Рис. 2. Соответствие модулей облачной платформы C2 стандарту ETSI NFV MANO

ит каждый сервис, однако не имеет представления о детальном описании состава экземпляра функции (характеристики и число виртуальных машин, виртуальных сетей и т. д.). C2-Orc наблюдает только за состоянием экземпляра виртуальной функции в целом (например, "нормальное" состояние, или "перегружен", или "недоступен").

В случае, когда C2-Orc необходимо инициировать создание нового экземпляра виртуальной функции, он отправляет запрос в Virtual Function (VF) менеджер (C2-Man). Предполагается, что C2-Man заранее принял Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications (TOSCA) [3] описание необходимой виртуальной функции. Под TOSCA-описанием понимается шаблон виртуальной функции, который описывает топологию виртуальных машин, состав программного обеспечения, а также политики оркестрации виртуальной функции. TOSCA — расширяемый формат и позволяет описать любое облачное приложение. Спецификация TOSCA описывает шаблон виртуальной функции в терминах "узлов" (подсеть, сеть, сервер или программный компонент) и "отношений" (связи между узлами).

Комбинация спецификаций на TOSCA и образа виртуальной машины (подготовленной специально для виртуальной функции) будем называть C2-Template. Стоит отметить, что часто необходимо ссылаться в TOSCA на внешние по отношению к текущему шаблону скрипты (например, для сложной конфигурации экземпляра виртуальной функции), такие скрипты также должны входить в состав C2-Template.

C2-Man предоставляет C2-Orc детальную информацию о шаблоне экземпляра виртуальной функции. Тот, в свою очередь, перенаправляет данные в менеджер инфраструктуры (C2-Core). Модуль C2-Core работает с системой виртуализации инфраструктуры, используя Python API. На данный момент OpenStack — единственная среда

виртуализации инфраструктуры, поддерживаемая облачной платформой C2. Однако уровневая организация платформы C2 с открытым API каждого уровня позволяет утверждать, что она может быть интегрирована с разными средами виртуализации инфраструктуры.

Следует отметить, что функциональности среды виртуализации инфраструктуры недостаточно для оркестрации жизненного цикла виртуальной функции. Например, в модуле Neutron платформы OpenStack отсутствует функциональность "зеркалирования" трафика, нет L2/L3 балансировки трафика. Для этих целей был разработан и реализован модуль C2-Cube, который с помощью ПКС контроллера RUNOS [13] расширяет функциональность выше указанного модуля с точки зрения работы с виртуальными сетями.

Для оперативного мониторинга каждого экземпляра виртуальной функции C2-Orc получает (в режиме реального времени) информацию от модуля C2-Mon. Этот модуль использует систему мониторинга Zabbix. На данный момент — это единственная система мониторинга, поддерживаемая облачной платформой C2, однако в планах команды проекта в будущем добавить поддержки системы мониторинга NAGIOS.

Облачная платформа C2 имеет полнофункциональный графический интерфейс, реализуемый в модуле C2-GUI. Данный интерфейс позволяет конфигурировать, размещать и мониторить экземпляры виртуальных функций, а также подписывать пользователей на сервисы. Графический интерфейс — это клиент-серверное приложение, серверная часть которого — модуль C2-Serv. C2-Serv представляет два типа API: websocket API для связи с C2-GUI и REST API для упрощения интеграции с программной инфраструктурой телком или корпоративного оператора.

### 3. Экспериментальное исследование

Целями экспериментального исследования являлись: оценка накладных расходов на разработку, масштабирование и восстановление функции; оценка зависимости задержки прохождения пакетов через цепочку функций от длины этой цепочки; проведение нагрузочного тестирования на стойке из восьми серверов\*; демонстрация реализации C2 MANO на функциях от сторонних поставщиков, интересных как клиентам телеком-операторов, так и операторам корпоративных ЦОД.

\* Intel Xeon CPU E5-2640 v2 @ 2.00 GHz, 64 GB RAM, 6.4 TB HDD.

**Исследование затрат времени на разворачивание функции.** Эксперимент разделялся на три этапа:

1. Создание экземпляров функции.
2. Создание цепочки функций:
  - с чистого образа операционной системы (ОС) с установкой нужного ПО и последующей настройкой функции;
  - с заранее подготовленного образа с установленным ПО, где требуется только настройка функции.
3. Масштабирование сервиса.

Во всех тестах оценены затраты времени на развертывание конкретной сетевой функции от момента инициализации подписки до момента маршрутизации пользовательского трафика в уже настроенный экземпляр сетевой функции. В табл. 1 представлено время, необходимое на разворачивание инфраструктуры функции.

**Исследование затрат времени на поддержку жизненного цикла функции.** Данный эксперимент демонстрирует затраты времени на отработку политики масштабирования и восстановление функции. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Данные эксперимента показывают, что наихудшее время восстановления нормального состояния функции составляет 2 мин 19 с. Строка "Триггер" определяет параметры триггера: триггер восстановления срабатывал после 60 с недо-

ступности по ICMP, триггер масштабирования срабатывал после того, как загрузка центрального процессора (ЦП) машины превышала 60 % в течение 60 с. В таблице показано время, потребовавшееся платформе C2, чтобы восстановить нормальное состояние функции.

**Исследование влияния длины цепочки функций на задержку прохождения пакетов.** В данном эксперименте для тестирования задержки используется "fping":

```
fping-e -cNUM -H STEP URL,
```

где

- NUM — число ICMP запросов. Использовались значения 15, 50 и 100.
- STEP — значение поля Time-to-live (TTL) пакета. Это значение равнялось 70.
- URL — адрес назначения пакета. Назначением был домен "ubuntu.com".

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) представлена зависимость задержки прохождения пакета от длины цепочки функций. Длина цепочки указана на горизонтальной оси, средняя задержка — на вертикальной оси.

Результаты эксперимента показывают линейную зависимость между числом функций в цепочке и задержкой прохождения трафика через цепочку. В данном случае каждый экземпляр функции увеличивал задержку менее чем на 1 мс, однако в общем случае задержка может зависеть от реализации самой функции. Стоит отметить, что эти накладные расходы могут быть уменьшены путем оптимизации ядра операционной системы в области работы с сетевым стеком протоколов, например, путем использования Intel DPDK [20].

Таким образом, платформа C2 может создавать достаточно длинные цепочки функций с минимальным влиянием на качество сервиса для пользователя. Это соответствует требованию корпоративных сервисов, а именно, поддерживать большое число простых и разнородных функций.

Таблица 1

**Результаты измерения времени разворачивания функции**

Сервис	Squid	Snort	Squid-Snort	Snort-Squid
Чистая ОС	37 с	29 с	53 с	52 с
Подготовленная ОС	35 с	28 с	51 с	51 с

Примечание: с — секунды; чистая ОС — установка приложения на виртуальную машину с чистым образом ОС; подготовленная ОС — образ с уже инсталлированным приложением.

Таблица 2

**Результаты измерения времени оркестрации функции**

Сервис	Squid Чистая ОС	Snort Чистая ОС	Squid Подготов. ОС	Snort Подготов. ОС
Масштабирование (новый экз.)	139 с	Масштабирование недопустимо	135 с	Масштабирование недопустимо
Восстановление (перезагрузка)	73 с	70 с	70 с	70 с
Восстановление (переустановка)	129 с	121 с	126 с	119 с
Триггер (загрузка ЦП)	60 % в течение 60 с	—	60 % в течение 60 с	—
Триггер (ICMP таймаут)	60	60 с	60 с	60 с

Примечание: с — секунды; чистая ОС — установка приложения на виртуальную машину с чистым образом ОС; подготовленная ОС — образ с уже инсталлированным приложением.

**Сравнение с другими проектами.** В данном эксперименте сравниваются результаты, показанные платформой C2 в трех предыдущих экспериментах с результатами проектов Cloudify и OPNFV. На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлено сравнение времени ответа и времени разворачивания функции между проектами.

В данном эксперименте для вычисления времени ответа также использовалась программа "fping". Эксперимент со временем разворачивания функции для проектов OPNFV и Cloudify проводился следующим образом:

- установка проекта в соответствии с официальной документацией;
- добавление образа ОС для запуска функции в хранилище образов проекта;
- создание TOSCA шаблона в соответствии с документацией и запуск виртуальной машины из образа;
- ручная настройка экземпляра функции.

Результаты эксперимента показывают незначительные отличия во всех значениях, кроме времени размещения и настройки функции. Причина этого отличия заключается в отсутствии возможности автоматической настройки функции в проекте OPNFV и бесплатной версии проекта Cloudify.

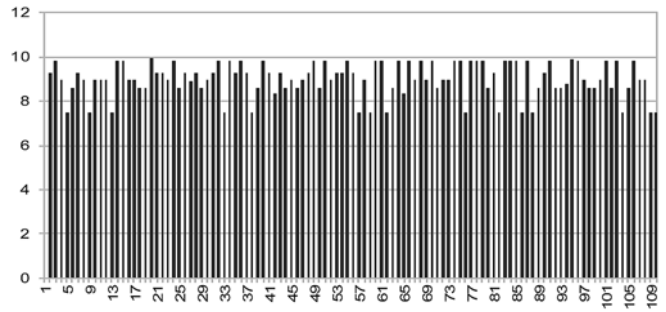
Также в проекте OPNFV нет средств мониторинга за состоянием функции, поэтому в случае выхода функции из нормального состояния все действия по восстановлению администратору приходится выполнять вручную.

В проекте Cloudify отсутствует определение цепочки функций и возможность мониторинга за целой цепочкой и за сложными параметрами, такими как список процессов или код ошибки в журнале событий.

**Нагрузочное тестирование.** Платформа C2 позволяет предоставить функциональность CPE (Customer Premises Equipment) внутри платформы виртуализации сетевых функций. Виртуализация CPE — это способ доставки сетевых сервисов, таких как маршрутизация, межсетевой экран, виртуальные изолированные сети, на корпоративное предприятие в виде программного обеспечения, а не специализированного оборудования. Виртуализация CPE позволяет платформе C2 упростить и ускорить доставку сервисов, удаленную конфигурацию и управление устройствами, а также позволяет пользователям по требованию заказывать новые сервисы и конфигурировать существующие.

В эксперименте проводилось нагрузочное тестирование цепочек из двух функций: межсетевой экран и NAT, в тестовом окружении, состоящем из девяти физических серверов\*.

\* Intel Xeon CPU E5-2640 v2 @ 2.00 GHz, 64 GB RAM, 6.4 TB HDD.



**Рис. 5.** Разделение пропускной способности внешнего канала между пользователями CPE. По оси X — номер клиента, по оси Y — средняя загрузка в Мбит/с

Один из серверов был источником трафика, создающего нужное число прямых подключений к платформе C2 по VXLAN-туннелям. Туннель в данном случае эмулирует подключение CPE-устройства и объединяет локальную сеть, находящуюся за CPE-устройством, и виртуальную сеть в платформе в единый сегмент L2. В локальной сети располагалось виртуальное устройство-клиент, генерирующее трафик. Устройство получало необходимые настройки сети (IP-адрес, маску подсети, шлюз, DNS-сервер) от платформы C2. После этого трафик от устройства направлялся через соответствующую цепочку функций.

Сценарий тестирования был следующим:

- создание 111 цепочек функций для пользователей. Такое число пользователей обусловлено количеством ресурсов на всех семи серверах, запускающих виртуальные машины;
- с помощью специального агента наблюдение за тем, как цепочки функций используют канал в 1 Гбит между инфраструктурой платформы и внешней сетью.

Предполагалось, что все цепочки функций поделят пропускную способность канала поровну. Полученные результаты представлены на рис. 5.

Средняя пропускная способность цепочки оказалась равной 8,99 Мбит/с, тогда как суммарная пропускная способность — 989,92 Мбит/с, т. е. использование внешнего канала оказалось близким к оптимальному.

## Заключение

В данной работе представлено описание архитектуры платформы C2. Проанализировано различие требований к платформе виртуализации сетевых функций, предъявляемых клиентами телеком-операторов и операторов корпоративных ЦОД.

Был проведен обзор схожих решений, который показал, что ни одна из существующих на момент написания статьи платформ виртуализации сетевых функций не удовлетворяет тре-

бованиям, определяемым двумя основными вариантами использования, — корпоративных ЦОД и телеком-оператора. Стоит отметить, что в открытых источниках не представлены данные о характеристиках работы рассматриваемых решений (за исключением системы Cloudify), где анализировались бы накладные расходы при масштабировании и восстановлении функций, и проводился анализ накладных расходов на построение цепочек функций.

Эффективность платформы C2 была продемонстрирована в экспериментах, связанных с числом функции в сервисной цепочке. В ходе экспериментального исследования были продемонстрированы возможности облачной платформы C2 и их соответствие стандарту ETSI NFV MANO. Проведена оценка накладных расходов на развертывание сетевого сервиса, оценка времени масштабирования и восстановления сетевого сервиса, оценка ресурсоемкости экземпляра сетевого сервиса и зависимость задержек прохождения пакетов от числа экземпляров сетевого сервиса на физической инфраструктуре.

Результаты экспериментального исследования показывают, что с использованием платформы C2 ресурсы ЦОД эффективно могут быть использованы как в интересах клиентов телеком-операторов, так и операторов корпоративного ЦОД.

#### Список литературы

1. ETSI Network Functions Virtualisation // Introductory White Paper 22 October 2012.
2. Intel. Different NFV/SDN Solutions for Telecoms and Enterprise Cloud. 2014.
3. OASIS. Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications (TOSCA) TC. URL: <http://docs.oasis-open.org/tosca/TOSCA/v1.0/TOSCA-v1.0.html>

4. Ain't Markup Language (YAML). Version 1.2. URL: <http://www.yaml.org/spec/1.2/spec.html>
5. Linux Foundation, OPNFV — An open platform to accelerate NFV. October 2014.
6. Cloudify. White Paper. URL: <http://getcloudify.org>
7. OpenStack. OpenStack Compute Admin Manual, November 2011.
8. Waldspurger C. Memory Resource Management in VMware ESX Server. Operating Systems Design and Implementation (OSDI), 2002.
9. Microsoft. Azure. White Paper. URL: <https://azure.microsoft.com>
10. OpenStack. OpenStack Tacker White Paper. URL: <https://wiki.openstack.org/wiki/Tacker>
11. Zabbix Manual. URL: <http://www.zabbix.com/downloads/ZABBIX%20Manual%20v1.6.pdf>
12. Nagios overview. URL: <https://www.nagios.org/about/overview>
13. Shalimov A., Nizovtsev S., Morkovnik D., Smeliansky R. The runos openflow controller // Proceedings of the 4th European Workshop on Software Defined Networks. IEEE Bilbao, Spain, 2015.
14. OpenDaylight technical overview. 2013
15. Overview of the Contrail system, components and usage // White Paper. January 2014. URL: <http://contrail-project.eu/documents/18553/341152/WhitePaper.pdf>
16. Central Office Rearchitected as a Datacenter (CORD) // White Paper. URL: <http://opencord.org/wp-content/uploads/2016/03/CORD-Whitepaper.pdf>
17. Kostenko V., Plakunov A., Nikolaev A., Tabolin V., Smeliansky R., Shakhova M. Selforganizing cloud platform // In Proceedings of the 2014 international science and technology conference "Modern Networking Technologies (MoNeTec)", Moscow, Russia, 2014.
18. Kostenko V., Plakunov A. Ant algorithms for scheduling computations in data processing centers // Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics. 2017. Vol. 41, N. 1. P. 44—50.
19. Vdovin A. V., Zotov I. A., Kostenko V. A., Plakunov A. V., and Smelyansky R. L. Comparing various approaches to resource allocating in data centers // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2014. Vol. 53, N. 5. P. 689—701.
20. Intel Corporation, Intel Data Plane Development Kit (Intel DPDK) Programmer's Guide, August 2013.

V. A. Antonenko, Researcher, e-mail: [anvial@lvk.cs.msu.su](mailto:anvial@lvk.cs.msu.su),

R. L. Smeliansky, Professor, e-mail: [smel@cs.msu.su](mailto:smel@cs.msu.su), A. A. Ermilov, Developer, e-mail: [aermilov@arccn.ru](mailto:aermilov@arccn.ru),

A. R. Romanov, Student, e-mail: [xanter@lvk.cs.msu.su](mailto:xanter@lvk.cs.msu.su), N. M. Pinaeva, Student, e-mail: [pinaeva@lvk.cs.msu.su](mailto:pinaeva@lvk.cs.msu.su),

A. V. Plakunov, Developer, e-mail: [artacc@lvk.cs.msu.su](mailto:artacc@lvk.cs.msu.su),

Lomonosov Moscow State University

## C2: Cloud Platform with NFV Life-cycle Management

*The paper presents C2 Platform that covers both the telecommunication and enterprise cloud cases. The C2 architecture incorporates as the network service orchestration as service life-cycle management. C2 implementation follows ETSI NFV MANO standard and uses TOSCA to describe network functions. The paper provides the experiment's methodology and experimental measurements of the platform efficiency, function scaling and healing overheads.*

**Keywords:** SDN, NVF, Telco, Cloud

## References

1. ETSI Network Functions Virtualisation, *Introductory White Paper*, 22 October, 2012.
2. Intel. *Different NFV/SDN Solutions for Telecoms and Enterprise Cloud*, 2014.
3. OASIS. *Topology and Orchestration Specification for Cloud Applications (TOSCA) TC*, available at: <http://docs.oasis-open.org/tosca/TOSCA/v1.0/TOSCA-v1.0.html>
4. Ain't Markup Language (YAML) Version 1.2, available at: <http://www.yaml.org/spec/1.2/spec.html>
5. Linux Foundation, OPNFV — An open platform to accelerate NFV. October 2014.
6. Cloudify. White Paper, available at: <http://getcloudify.org>
7. OpenStack, *OpenStack Compute Admin Manual*, November 2011.
8. Waldspurger C. Memory Resource Management in VMware ESX Server, *Operating Systems Design and Implementation (OSDI)*, 2002.
9. Microsoft. *Azure White Paper*, available at: <https://azure.microsoft.com>
10. OpenStack. *OpenStack Tacker White Paper*, available at: <https://wiki.openstack.org/wiki/Tacker>
11. Zabbix Manual, available at: <http://www.zabbix.com/downloads/ZABBIX%20Manual%20v1.6.pdf>
12. Nagios overview, available at: <https://www.nagios.org/about/overview>
13. Shalimov A., Nizovtsev S., Morkovnik D., Smeliansky R. The runos openflow controller, *Proceedings of the 4th European Workshop on Software Defined Networks. IEEE Bilbao*, Spain, 2015.
14. Open Day light technical overview. 2013
15. Overview of the Contrail system, components and usage. *White Paper*. January 2014, available at: <http://contrail-project.eu/documents/18553/341152/WhitePaper.pdf>
16. Central Office Rearchitected as a Datacenter (CORD) // *White Paper*, available at: <http://opencord.org/wp-content/uploads/2016/03/CORD-Whitepaper.pdf>
17. Kostenko V., Plakunov A., Nikolaev A., Tabolin V., Smeliansky R., Shakhova M. Selforganizing cloud platform, *In Proceedings of the 2014 international science and technology conference "Modern Networking Technologies (MoNeTec)"*, Moscow, Russia, 2014.
18. Kostenko V., Plakunov A. Ant algorithms for scheduling computations in data processing centers, *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics*, 2017, vol. 41, no. 1, pp. 44–50.
19. Vdovin A. V., Zotov I. A., Kostenko V. A., Plakunov A. V., and Smelyansky R. L. Comparing various approaches to resource allocating in data centers, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 5, pp. 689–701.
20. Intel Corporation, Intel Data Plane Development Kit (Intel DPDK) Programmer's Guide, August 2013.

УДК 004.047

**С. В. Мальцева**, д-р техн. наук, проф., e-mail: smaltseva@hse.ru,  
**Д. В. Думский**, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: ddumsky@hse.ru,  
**М. М. Комаров**, канд. техн. наук, PhD, доц., e-mail: mkomarov@hse.ru,  
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва

## Исследование рынка новых доменных имен

*Представлен анализ и прогнозирование изменений рынка доменных имен, связанных с масштабной программой ICANN по внедрению новых доменов верхнего уровня. Приведена статистика регистраций новых доменов во всем мире и в России в частности на конец 2016 г. Предложены критерии, характеризующие степень реального использования имен в новых доменных зонах и осведомленности пользователей об информационных ресурсах, размещаемых в них. Выявлены некоторые отрицательные и положительные стороны внедрения новых доменов.*

**Ключевые слова:** доменные имена, gTLD, ICANN

### Введение

Развитие экономики в современном мире тесно связано с развитием телекоммуникаций и связи. Большие объемы данных, присутствующих в экономике, требуют своевременного обмена и обработки и являются двигателем экономического развития не только в нашей стране, но и в целом в мире. Тенденции, связанные с внедрением в последние годы цифровой экономики и с развитием промышленного Интернета и фабрик будущего, предъявляют новые требования к информационным технологиям, в том числе и

к существующей базе доступных для регистрации информационных ресурсов доменных имен. Промышленный Интернет тесно связан с таким новым понятием, как Интернет вещей, предполагающий наличие большого числа датчиков для получения информации о состоянии окружающей среды и работающего оборудования, а также постоянный обмен данными между машинами, датчиками и управляющими системами. Корпорация ICANN, управляющая адресным пространством сети Интернет, в октябре 2013 г. утвердила первый список доменов верхнего уровня согласно новому порядку внедрения новых до-

менов верхнего уровня (программе New gTLD). Согласно вступившим в силу правилам претендовать на получение собственной доменной зоны отныне может любое юридическое лицо. ICANN, запуская свою программу по развитию новых глобальных доменных имен верхнего уровня, ориентировались в том числе и на прогнозы по активному развитию Интернета вещей, предполагая, что часть новых доменов будут использоваться в том числе в технологиях индустриального Интернета. Используемые здесь датчики нижнего уровня являются энергозависимыми устройствами и не могут хранить информацию о таблицах маршрутизации и адреса, по которым они должны передавать данные управляющим системам. Они очевидно будут работать с доменами верхнего уровня.

Исследование, которое мы провели, было связано в первую очередь с анализом российского рынка доменных имен и определением некоторых критериев анализа и тенденций в развитии данного рынка. Мы выяснили, что новые доменные зоны, появившиеся в российском сегменте, пока уступают зонам RU и РФ по ряду факторов, и опрос экспертов это подтвердил. Два основных фактора, влияющих на популярность зон среди пользователей, — это доступность восприятия доменного имени и цена регистрации. Ценовая политика задает некий баланс, связанный, с одной стороны, с репутационными и брендинговыми рисками, с другой стороны, со спросом. Там, где цена выше — меньше риск, но и спрос также ограничен, что является классикой рыночных отношений.

Еще один вопрос связан с готовностью бизнеса и пользователей регистрировать новые имена в новых зонах взамен традиционных старых и проверенных доменов, например RU и РФ. Возраст зоны может оказаться решающим фактором, так как для многих новых доменов нет еще четкого понимания ни у пользователей, ни у регистраторов, к каким типам информационных ресурсов или сферам бизнеса могут относиться те или иные зоны. Примером является доменная зона МОСКВА, когда нет ясности должна ли она соответствовать только компаниям, зарегистрированным в Москве, или всем компаниям, работающим в Москве; предназначена ли она только для бизнеса или может соответствовать и другим сферам деятельности с привязкой к географическому расположению, тогда как традиционные страновые доменные зоны такой неопределенности не вызывают. Второй пример — это доменные зоны, привязанные к брендам: например, домен **yandex** используется компанией Яндекс под свои внутренние сервисы, однако с точки зрения пользователей и других игроков на рынке, мог выдаваться и другим компаниям, входящим в струк-

туру данной компании, и даже клиентам Яндекса. Наличие популярных и известных сайтов в той или иной зоне также влияет на привлекательность новых доменных зон.

Если говорить о преимуществах, которые предоставляют новые доменные зоны перед существующими, то это свободная регистрация, по крайней мере на начальных этапах для коммерческих компаний, и привлекательность для брендинга. Однако, что касается отечественных брендов, то на российском рынке их не очень много, а зарубежные к нашей стране не привязаны. На основании этих двух преимуществ построена ценовая политика, например, регистрация различных премиум-доменов по соответствующим завышенным ценам. Вместе с тем число привлекательных доменов в каждой новой зоне ограничено, и при достижении определенного числа регистраций данный фактор перестает влиять на дальнейший рост регистраций в этой зоне. Доменная зона, таким образом, перестает быть привлекательной для компаний или пользователей. Быстрый рост доменных зон возможен за счет снижения стоимости регистрации, но это несет в себе определенные риски потери репутации перед поисковыми системами и пользователями ввиду наличия большого количества ресурсов низкого качества, которые там могут быть размещены.

С точки зрения динамики роста числа доменных имен следует отметить, что, во-первых, пользователи отдают предпочтение коротким запоминающимся именам в известных доменных зонах. Во-вторых, бизнес подстраивается под потребности пользователей и, в первую очередь, регистрирует имена доменов, которые соответствуют представлениям пользователей о хороших доменах. В-третьих, доменные инвесторы, которые также понимают тренды пользователей и бизнеса, обеспечивают рост доменной зоны и ее продвижение среди бизнеса. Если говорить о распределении ответственности за рост доменных зон, в первую очередь, надо упомянуть доменных инвесторов и регистраторов, которые должны обеспечить привлекательную ценовую политику, во вторую очередь — это бизнес, который может взаимодействовать с пользователем, объясняя, что короткие доменные имена не всегда являются преимуществом и есть другие характеристики, которые могут быть интересны и полезны. На сегодняшний день пока еще не созданы бизнес-модели на основе использования новых доменов верхнего уровня. Здесь также присутствует потенциал для дальнейшего развития доменов верхнего уровня. Понятно, что рост регистраций возможен и при активном маркетинговом продвижении зоны среди обычных пользователей, что зачастую сравнимо с созда-

нием новых крупных брендов. И возможно, что новые бренды могут создаваться от доменной зоны, а не наоборот.

## 1. Постановка задачи исследования

Основной целью проведения данной научно-исследовательской работы является анализ и прогнозирование изменений рынка доменных имен верхнего уровня по результатам реализации программы внедрения новых доменов (New gTLD).

Основные задачи исследования:

— исследование и определение условий и показателей увеличения числа доменных зон, характеризующих рынок доменных имен верхнего уровня;

— исследование и анализ изменений рынка доменных имен верхнего уровня по результатам реализации программы внедрения новых доменов в период с 2013 по 2015 г.;

— прогнозирование изменений рынка доменных имен верхнего уровня по данным реализации программы внедрения новых доменов.

Программа New gTLD — это масштабный проект ICANN, в рамках которого было запущено более 1200 новых доменов верхнего уровня. Не все из них доступны для открытой (*General availability*) регистрации (всего 527, в конце 2016 г.), так как существует несколько стадий запуска новых доменов, предваряющих период открытого доступа. Например, на конец 2016 г. 545 доменов находились в стадии *Sunrise* — доступны для регистрации в них имен только проверенными владельцами торговых марок; 160 в стадии премиальной регистрации (*Landrush*) — период регистрации имен в новых доменах по завышенной цене для всех желающих; 237 в стадии раннего доступа (*Early access*) — регистрация доменов в виде аукциона [1].

Программа позволяет значительно расширить мировое доменное пространство и сделать его намного разнообразнее. Благодаря New gTLD, помимо общедоступных доменов, открываются десятки новых геодоменов (например, таких как .MOSCOW, .BERLIN и .LONDON), отраслевых и специализированных зон (.APP, .HOLDINGS, .HEALTH и пр.), корпоративных доменов (например, .GOOGLE, .YANDEX) и многих других [2]. Геодомены по названию городов, а также домены на национальных языках, в основном, доступны только для регистрации субъектами, имеющими непосредственное отношение к геолокации домена. Корпоративные домены также предполагают использование

только под нужды предприятий, которые их регистрируют, для выделения в них зон для клиентов. Это касается и отраслевых доменов, хотя и не всех. Например, зона .SCIENCE оказалась открыта для свободной регистрации всех желающих, а не только для имеющих отношение к науке организаций.

## 2. Исследование и определение системы показателей, характеризующих рынок доменных имен верхнего уровня

По своей природе домен является услугой. Администратор доменного имени получает только временное право управления доменом, внося определенную ежегодную плату за это. Так называемая "продажа домена" является переуступкой права его аренды за вознаграждение. Домен не осязаем. При этом с точки зрения маркетинга домен имеет все свойства цифрового товара, с этой фактической, а не формальной, позиции и будем его рассматривать в данном исследовании.

Рынок доменов верхнего уровня можно проанализировать, рассматривая статистику выделения доменов второго уровня в каждом из новых доменов, и оценить популярность каждого из них.

Статистика регистрации новых глобальных доменов верхнего уровня, взятая с сайта [ntldstats.com](http://ntldstats.com) [1], показывает, что на 25 ноября 2016 г. всего в мире было зарегистрировано 26 271 570 доменов второго уровня в зонах new gTLD. Из них припарковано, т. е. зарегистрировано на DNS-серверах без обязательного использования домена по прямому назначению (для создания веб-сайтов) 18 630 284 (рис. 1).

На диаграмме ниже (рис. 2) показано распределение доменов второго уровня в долях по некоторым наиболее популярным именам доменов первого уровня.

Домен .xuz (24 % от всех доменов new gTLD) лидирует среди всех новых доменов по числу регистраций и успел прославиться весьма агрессивными стратегиями продвижения и рекламой. Известно, например, что значительная часть

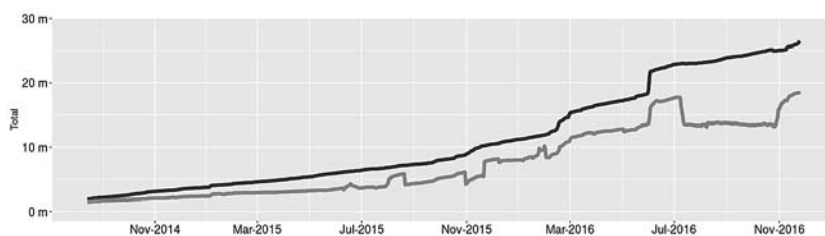


Рис. 1. График роста числа зарегистрированных (сверху) и из них припаркованных (снизу) во всем мире новых доменов второго уровня с 2014 по 2016 г. (m — миллион)

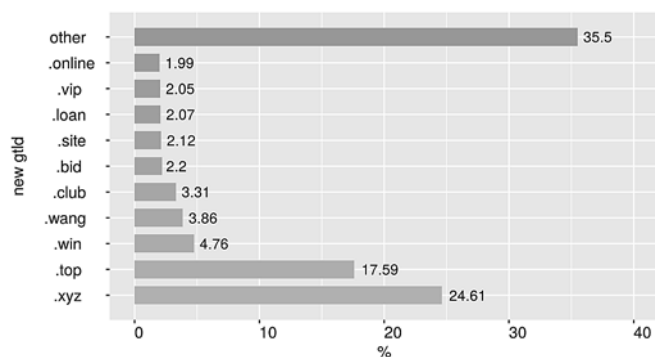


Рис. 2. ТОП10 распределения доменов по популярным зонам new gTLD

имен в зоне .xyz раздавалась пользователям бесплатно вместе с выдаваемыми на коммерческой основе доменами в старых глобальных доменах, а в 2016 г. предоставлялись значительные скидки (до 98 %) у многих регистраторов на предоставление доменов в .xyz. Однако продление регистрации через год у всех регистраторов будет уже без скидки, что скорее всего приведет к снижению числа желающих покупать, а также продлевать регистрацию доменов в этой зоне. К тому же, в данной зоне уже выделены все возможные комбинации трех- и четырехбуквенных доменов и по мере заполнения доменов из большого числа символов интерес к данной зоне (он в основном вызван ценовой политикой и рекламой) может угаснуть. Сразу за ним следует домен .top (17 %) — второй по популярности new gTLD-домен. В начале 2015 г. он составлял конкуренцию домену .SCIENCE, в 2016 г. .top значительно ушел в отрыв, в 20 раз превысив регистрации .SCIENCE.

На диаграмме рис. 3 представлено сравнение новых доменов с национальными доменами верхнего уровня (ccTLD) и некоторыми старыми глобальными доменами (gTLD), кроме лидирующего по заполнению домена .COM.

Видно, что наиболее популярные новые глобальные домены еще не потеснили основные традиционные глобальные домены (.net и .org), а также некоторые национальные домены, но уже опережают домены .biz и .info, а также .RU.

Резкое увеличение числа регистраций новых доменов произошло

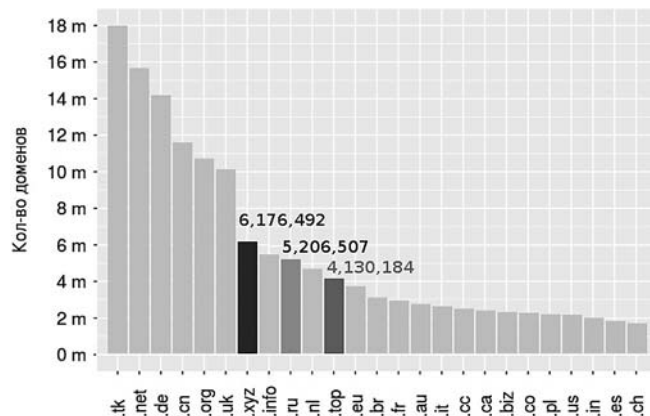


Рис. 3. Сравнение числа регистраций традиционных доменных имен с популярными new gTLD

16 июня 2016 г., что можно увидеть на графике изменения числа регистраций в день (рис. 4, а). За три дня в июне было выделено почти 2 млн доменных имен. Такой же пик регистраций наблюдался на графике регистраций в домене .xyz, (рис. 4, б), при этом на графиках других доменов этого не наблюдалось.

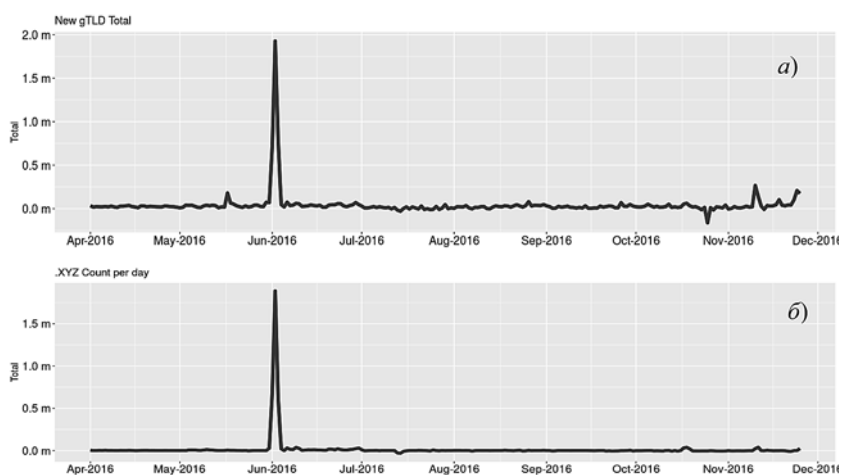


Рис. 4. Число всех регистраций new gTLD в день (а) и отдельно регистрации в .xyz (б) (m — миллион)

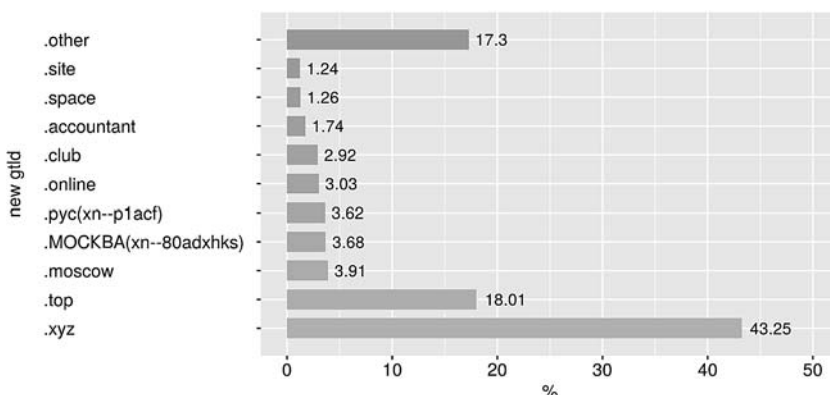


Рис. 5. Диаграмма распределения зарегистрированных в new gTLD доменов в России



Стоимость регистрации доменов

Доменная зона	Администратор доменной зоны	Число доменов, шт.	Дата начала регистрации	Стоимость регистрации розница, руб.	Стоимость регистрации опт., руб.	Стоимость регистрации премиум доменов, руб.	Крупнейший регистратор зоны и его доля	
GDN	GDN Registry FZ LLC	306 819	06.03.16	42	42	Отсутствует	www.alpnames.com — 90,88 %	
РУС	Rusnames Limited	49 876	24.05.16	16*	16*	До 4 000 000	REG.RU — 80,02 %	
MOSCOW	Foundation for Assistance for Internet Technologies and Infrastructure Development (FAITID)	21 744	01.12.14	590	300	1490	RU-CENTER — 64,46 %	
МОСКВА	Foundation for Assistance for Internet Technologies and Infrastructure Development (FAITID)	18 447	01.12.14	590	300	1490	RU-CENTER — 58,68 %	
ОНЛАЙН	CORE Association	2464	02.04.14	2990	2367	До 170 000	RU-CENTER — 49,03 %	
ОРГ	Public Interest Registry	1324	13.05.14	1490	869	Отсутствует	RU-CENTER — 49,41 %	
ДЕТИ	The Foundation for Network Initiatives "The Smart Internet"	1264	15.10.14	1090	694	Стандартная	RU-CENTER — 46,84 %	
САЙТ	CORE Association	1129	02.04.14	2990	2367	До 170 000	RU-CENTER — 45,08 %	
TATAR	Limited Liability Company "Coordination Center of Regional Domain of Tatarstan Republic"	962	23.03.15	516	477	Стандартная	REG.RU — 47,92 %	
YANDEX	YANDEX, LLC	18	Регистрация закрытая					SafeNames Ltd. — 94,44 %

\* — акционная цена до 01.03.2017, после — 990 руб. *Комментарий:* розничная цена регистрации получена с сайта крупнейшего регистратора в доменной зоне, оптовые цены Reg.ru.

Если отдельно рассмотреть динамику регистрации доменов в России с 2013 г., можно отметить, что рост числа регистраций и увеличение интереса к new gTLD доменам началось с декабря 2014 г. и резко увеличилось летом 2016 г., что совпало с событием на графике регистрации всех новых доменов. В динамике числа регистраций новых доменов в РФ аналогично произошел скачок, совпавший по времени с пиком регистраций на общем графике, и за три дня в июне было зарегистрировано более 100 тыс. доменных имен.

Диаграмма распределения доменов второго уровня по new gTLD регистрациям в России представлена на рис. 5. В лидерах находятся .ru и .top как и по всему миру, но далее в рейтинге расположились геодомены .MOSCOW, и кириллические домены .МОСКВА и .РУС.

Нужно отметить, что стоимость регистрации доменов оказывает влияние на число регистраций (табл. 1).

### 3. Исследование и анализ изменений рынка доменных имен верхнего уровня по результатам реализации программы внедрения новых доменов в период с 2013 по 2015 г.

Рассмотрим подробнее распределение доменов по регистраторам (рис. 6) и выберем российские компании. Лидером по числу регистраций в РФ среди российских компаний с 2016 г. является

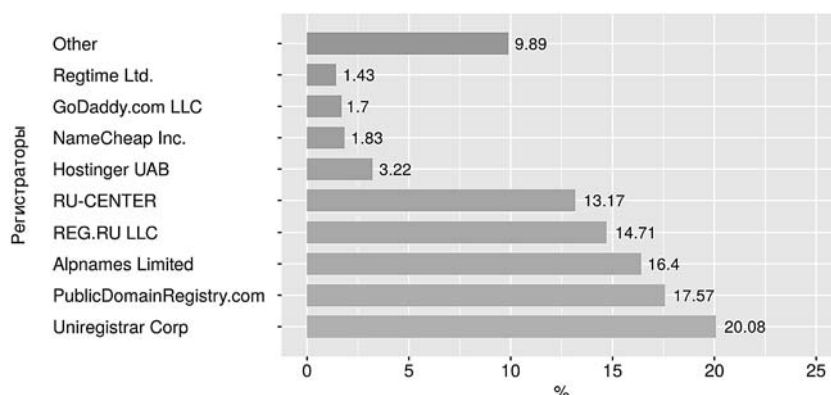


Рис. 6. Распределение числа зарегистрированных в России новых доменов по регистраторам

ся REG.RU LLC. Однако число доменов верхнего уровня у данного регистратора ограничено всего 26 доменами. При этом 73 % регистраций у данной компании создано в популярном домене .xuz. В остальных, таких как .ONLINE, .MOSCOW, .SPACE, .SITE, и доменах на русском языке .РУС и .МОСКВА, число регистраций распределилось примерно в равных долях от 4 до 3 %.

Следующий по рейтингу — отечественный регистратор — компания RU-CENTER. По итогам 2015 г. данная компания была лидером и содержала на обслуживании 32,6 % всех доменных имен, зарегистрированных в России по данным из отчета Координационного центра Национального домена сети Интернет [3]. Однако в 2016 г. акценты сместились, и Reg.Ru обогнал данного регистратора по числу доменов, хотя в основном за счет предоставления имен в одном домене .XYZ. RU-CENTER, при этом, располагает большим числом new gTLD-доменов по сравнению с конкурентом — всего 317, но наиболее популярны для регистраций 12 из них (> 1 % регистраций доменов второго уровня), в том числе и домены, отсутствующие у Reg.Ru. Всего в данной компании зарегистрировано доменов второго уровня в new gTLD на конец 2016 г. 76 649 и данная цифра продолжит расти.

Можно отметить, что несмотря на наличие домена .xuz у данного регистратора, пика на графике регистраций, в данном случае, не наблюдалось. Число регистраций в этом домене у компании RU-CENTER не превышает 3 % от всех остальных.

Большой популярностью по сравнению с xuz у данного регистратора пользуются геодемены .MOSCOW и .МОСКВА, а также домены .CLUB и .ONLINE, которые отсутствуют у компании REG.RU LLC.

Еще один российский регистратор, занимающий на 2016 г. только 1 % от общего рынка регистраторов новых доменов, это компания Regtime (Webnames.ru). Число предлагаемых для регистрации в данной компании доменов первого уровня — 217. Общее число регистраций уменьшилось и практически не увеличивается с января 2016 г. Вероятно, это связано с ценовой политикой и маркетинговыми стратегиями конкурентов. Так, например, регистрация домена второго уровня в .xuz стоит в 40 раз дороже у данного регистратора и никаких скидок не предлагается. Число регистраций в день в десятки раз меньше, чем у REG.RU и RU-CENTER. Популярными являются геодемены .MOSCOW и .МОСКВА и общий домен .CLUB. Далее, примерно в равных долях идут .ОНЛАЙН, .ONLINE и .WIN. Последний отсутствует у REG.RU и не пользуется большой популярностью у RU-CENTER (всего 0,03 % от всех выделенных).

Оставшаяся часть зарегистрированных доменов в .xuz, давшая вклад в пик на общих графиках (см. рис. 4) принадлежит зарубежным регистраторам *Uniregistrar Corp* и *PDR Ltd. (PublicDomainRegistry.com)*, разделивших первую и вторую строчки рейтинга по числу регистраций новых доменов в России. Компания *Uniregistrar Corp*, зарегистрированная на Каймановых островах, сменила зарубежного лидера 2015 г. (компанию *Hostinger*) среди зарубежных регистраторов в России, а также обогнала всех отечественных регистраторов. Однако данное лидерство связано только с рекордами в регистрации доменов в зоне .xuz. Доля регистрации остальных 365 доменов, доступных у данного регистратора, незначительна. Российские геодемены у данного регистратора по понятным причинам отсутствуют.

Третий по рейтингу, зарубежный регистратор *Alpnames Limited* (<https://www.alpnames.com/>) предоставляет значительную часть доменов в зоне .TOP, хотя и располагает еще 287 доменами в других новых зонах.

Помимо отечественных регистраторов на рынке, как уже было сказано, присутствуют порядка 100 зарубежных. Вклад в выделение доменов вносят только первые 10 из них (табл. 2).

Однако выделение большого числа новых доменов приводит к увеличению потенциальных возможностей для совершения киберпреступлений и ведения бизнеса, связанного с киберквотингом. Отследить их можно по числу новых доменов, попадающих ежедневно в черные списки за распространение спама, фишинг и попытки взлома других сетей (рис. 7). С такими доменами

Таблица 2

Топ 10 регистраторов new gTLD на российском рынке

Но-мер	Регистратор	Число доменов, шт.	В процентах к общему числу
1	Uniregistrar Corp	81,430	20,72
2	PDR Ltd. d/b/a Public-DomainRegistry.com	69,929	17,80
3	Alpnames Limited	65,863	16,76
4	Registrar of Domain Names REG.RU LLC	52,305	13,31
5	Regional Network Information Center, JSC dba RU-CENTER	51,601	13,13
6	Hostinger, UAB	12,625	3,21
7	NameCheap, Inc.	7,676	1,95
8	GoDaddy.com, LLC (GoDaddy Group)	6,821	1,74
9	Regtime Ltd. (WebNames.ru)	5,871	1,49
10	Tucows Domains Inc. (OpenSRS / Hover)	5,538	1,41

ведется борьба, и по мере накопления жалоб регистраторы реагируют удалением или полной блокировкой доменов, если их администраторы не реагируют на предупреждения.

Актуальной является проблема киберсквотинга, когда в новых зонах регистрируются домены по названию известных брендов. Однако их регистраторы никакого отношения к брендам не имеют и покупают домены в целях их дальнейшей перепродажи или размещения фишинговых, либо влияющих на репутацию бренда информационных ресурсов. Такие домены блокируются по обращению владельцев известных торговых марок и далее никак не используются.

Для предотвращения случаев киберсквотинга перед открытием свободной регистрации доменных имен в новых зонах регистраторы могут планировать периоды приоритетной регистрации, в течение которых правом подачи заявок могут воспользоваться только определенные категории лиц, в частности, владельцы товарных знаков или организации, имеющие какое-то отношение к отраслевым доменам или геодоменам.

Однако не все компании стремятся воспользоваться данной возможностью. Число доменов первого уровня в настоящий момент более тысячи, и покупка имен во всех не имеет смысла для компаний.

Кроме официальной статистики регистраций важно оценить, как реально используются зарегистрированные домены. В качестве параметров для оценки популярности новых доменов мы выбрали частоту запросов пользователей Интернет к новым доменам на DNS-серверах и число делегированных доменов из зоны new gTLD, расположенных в Российском адресном пространстве (ipv4). Необходимо проверить, расположены ли за ними реальные ресурсы в виде работающих интернет-сайтов.

Для оценки первого показателя мы провели анализ DNS-запросов клиентов городского провайдера Интернет. Так как на самом деле обычно существует значительный разрыв между числом доступных доменных имен и осведомленностью пользователей об их существовании, данный показатель позволит приблизительно оценить разрыв. Для анализа были собраны лог-файлы с DNS-серверов, из которых были отфильтрованы только запросы, относящиеся к новым доменным именам первого уровня.

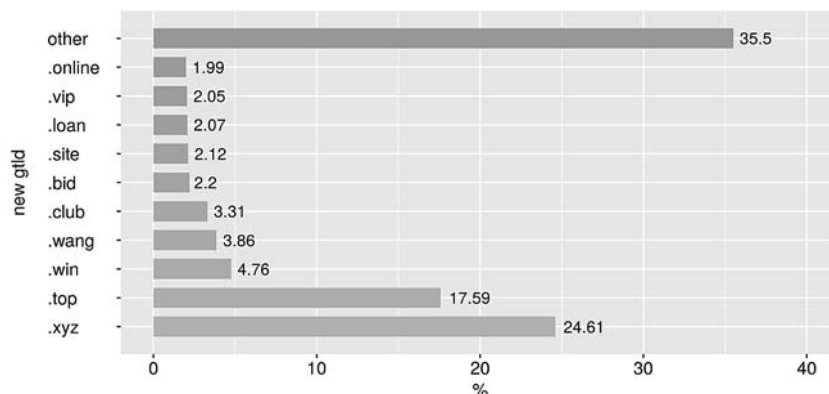


Рис. 7. Распределение вредоносных ресурсов по новым доменам

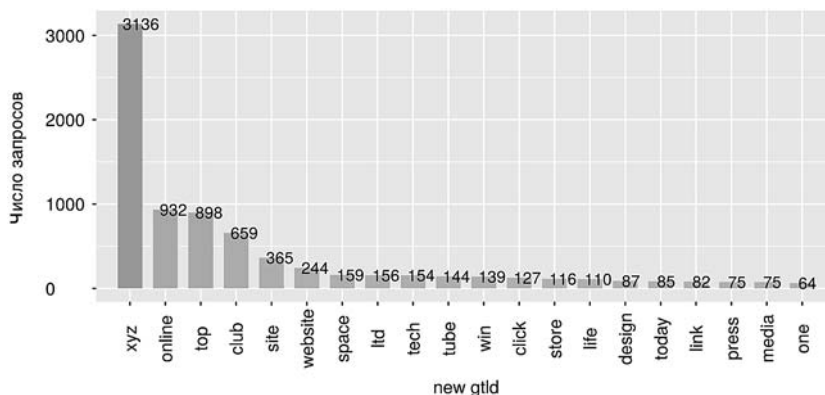


Рис. 8. Распределение числа запросов по доменам

Из полученной статистики по числу различных уникальных доменов второго уровня за период времени, равный 3 недели, удалось увидеть, что запросы к домену .xyz пользуются наибольшей популярностью по сравнению с остальными зарегистрированными доменами (рис. 8). Для сравнения можно привести число запросов, подсчитанное для традиционных доменов, например, в зоне .RU — 27 799 запросов, в зоне .COM — 12 2559 за тот же период времени.

Так как получить достоверную картину по распределению используемых, из всех выделенных, доменов первого уровня на основе анализа запросов клиентов не представляется возможным, было решено провести сканирование сети Интернет и получить список новых доменов из обратных записей в DNS, расположенных в пространстве ip-адресов, относящихся к российскому сегменту. Для этого с общедоступной базы данных RIPE NCC [4] были получены все ip-адреса (около 46 млн), выданные данной организацией российским региональным регистраторам. Далее проведено преобразование их в доменные имена. Из всех этих записей нас интересовали только относящиеся к доменам второго уровня в new gTLD. Самых new gTLD-доменов на текущий момент выделено чуть больше 1200,

хотя наиболее популярных, как было показано выше, гораздо меньше. После сортировки полученного списка мы оставили только уникальные домены второго уровня, для которых есть обратные записи в DNS, и проверили их принадлежность к российским интернет-ресурсам.

Всего удалось извлечь 23 295 606 доменных имен, так как не все ipv4-адреса прописаны на DNS-серверах и используются в настоящее время. Из них только 25 708 записей оказались принадлежащими new gTLD, а уникальных доменов второго уровня оказалось всего 2341. Причем только 441 доменное имя удалось преобразовать обратно в ip-адреса в российской части сети Интернет. Остальные оказались либо ошибочными записями, либо преобразовывались в ip-адреса (согласно базе maxMind [5]) региона RU.

В результате после распределения всех оставшихся доменных имен второго уровня по new gTLD получили, что в лидерах оказались домены club, online, xuz, space.

Удалось получить лишь незначительное число реально используемых доменных имен в новых доменах первого уровня. Что говорит о том, что данные домены пока не популярны для размещения на них сайтов в России, либо большая их часть размещается у зарубежных хостинг-провайдеров.

Важно рассмотреть, используются ли найденные доменные имена для размещения информационных ресурсов и сколько из них всего лишь перенаправляют на другое доменное имя. Диаграмма на рис. 9 демонстрирует, что большая часть найденных доменов используется для размещения сайтов, чуть меньше 30 % представляют собой перенаправление на ресурсы, расположенные в традиционных старых доменах ccTLD и gTLD.

#### 4. Прогноз изменений рынка доменных имен верхнего уровня

В рамках проведенного исследования, в специализированном сообществе был проведен ряд опросов (доменных инвесторов, экспертов области сети Интернет).

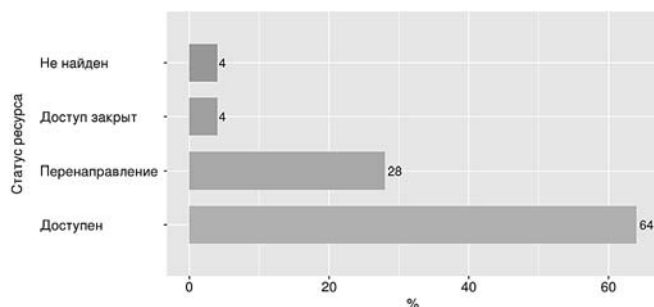


Рис. 9. Статус ресурсов, обозначенных найденными именами в new gTLD

На основе проведенного исследования и анализа рынка доменных имен, проведенных опросов можно сделать следующие выводы.

1. Сдержанный рост новых зон обусловлен уже существующим избытком доменов в традиционных доменных зонах RU и РФ. Кроме того, новые доменные зоны уступают зонам RU и РФ по следующим ключевым факторам:

- популярность зоны у пользователей;
- низкая цена регистрации;
- число доменов в этой зоне;
- возраст зоны;
- общее число сайтов в зоне;
- наличие известных сайтов в этой зоне.

Преимущества новых зон перед RU и РФ:

- свободные для регистрации коммерческие ключи;
- привлекательность для брендинга.

2. На основании этих двух преимуществ и построена ценовая политика большинства новых зон — регистрация премиум-доменов по премиальным ценам. Однако число привлекательных доменов в зоне ограничено, и при достижении определенного числа регистраций он перестает быть фактором роста зоны. Поэтому на большинстве графиков динамики изменения числа доменов в новых зонах мы видим очень быстрый рост регистраций в самом начале.

3. Более быстрый рост новых доменных зон возможен, как на примере GDN и РУС, за счет снижения стоимости регистрации. Однако этот путь несет в себе риск потери репутации перед пользователями и поисковыми системами ввиду наличия большого числа низкокачественных сайтов.

#### Заключение

В представленной работе мы выделили три основных фактора, определяющих динамику роста числа доменных имен:

- пользователи, которые отдадут предпочтение коротким, запоминающимся доменам в известных доменных зонах;
- бизнес, который, подстраиваясь под потребности пользователей, регистрирует и покупает домены, соответствующие представлениям пользователей о хорошем домене;
- доменные инвесторы, которые понимают тренды пользователей, и обеспечивают количественный рост доменной зоны и ее продвижение среди бизнеса.

Поэтому увеличение числа регистраций будет происходить при активном маркетинговом продвижении зоны среди обычных пользователей, что по затратам сравнимо с созданием нового бренда федерального уровня. Но даже при отсутствии значительных маркетинговых вложений

экстенсивный рост доменных зон будет и дальше происходить за счет роста числа пользователей сети Интернет и предпринимателей.

#### Список литературы

1. **Ntldstats**. URL: <https://ntldstats.com/launch> (дата обращения: 10.09.16).

2. **Reg.ru**. URL: <https://www.reg.ru/domain/new-gtlds> (дата обращения: 10.09.16).

3. **CCTLD**. URL: [https://cctld.ru/files/stats/report\\_ru-2016\\_rus2.pdf](https://cctld.ru/files/stats/report_ru-2016_rus2.pdf) (дата обращения: 10.09.16).

4. **RIPE**. URL: <https://www.ripe.net> (дата обращения: 05.09.16).

5. **MaxMind**. URL: <http://www.maxmind.com> (дата обращения: 05.09.16).

**S. V. Maltseva**, Professor, e-mail: [smaltseva@hse.ru](mailto:smaltseva@hse.ru),

**D. V. Dumsky**, Assistant Professor, e-mail: [ddumsky@hse.ru](mailto:ddumsky@hse.ru),

**M. M. Komarov**, Assistant Professor, e-mail: [mmkomarov@hse.ru](mailto:mmkomarov@hse.ru),

National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000, Russia

## The Market Research of New gTLD

*The basic aim of this paper was to analyze and make a forecast for any changes on the market of top-level domain names by the results of the program implementation for introducing new domains (new gTLD) by ICANN. New domain names registration statistics is presented in this paper for the end of 2016. New criteria were proposed to describe changes and real usage of new domain names. We also studied users knowledge about information resources located within new domain names. Positive and negative aspects of implementation of new gTLD are presented in this paper.*

**Keywords:** domain names, new gTLD, ICANN

#### References

1. **Ntldstats**, available: <https://ntldstats.com/launch> (date of access 10.09.16).

2. **Reg.ru**, available: <https://www.reg.ru/domain/new-gtlds> (date of access 10.09.16).

3. **CCTLD**, available: [https://cctld.ru/files/stats/report\\_ru-2016\\_rus2.pdf](https://cctld.ru/files/stats/report_ru-2016_rus2.pdf) (date of access 10.09.16).

4. **RIPE**, available: <https://www.ripe.net> (date of access 05.09.16).

5. **MaxMind**, available: <http://www.maxmind.com> (date of access 05.09.16)

### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФГБОУ ВО

«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Факультет автоматизации производственных процессов

Кафедра вычислительной техники и инженерной кибернетики

**Уважаемые коллеги!**

Приглашаем вас принять участие

в VI Международной научно-практической конференции

## "ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ"

23–26 мая 2018 г.

Конференция будет проходить в рамках Российского нефтегазохимического форума.

Все участники конференции смогут также посетить XXVI международную выставку

«ГАЗ. НЕФТЬ. ТЕХНОЛОГИИ — 2018»

#### Секции работы конференции:

- Современная методика преподавания информатики
- Системы и методы защиты компьютерной информации
- Моделирование информационных систем
- Системы автоматизированного проектирования и ГИС-технологии
- Суперкомпьютеры, параллельные и облачные вычисления
- Системное программирование и техническая кибернетика
- Сети и телекоммуникации
- Информационные технологии в науке, образовании и производстве
- Информационные технологии в экономике, управлении и бизнесе
- Дистанционное обучение: концепция, методология, технология
- Информационные технологии глазами школьника
- Проектно-ориентированное обучение в области ИТ

#### Связь с организаторами:

+ 7 (927) 232-73-71, + 7 (347) 243-17-14

[katerina.sultanova@gmail.com](mailto:katerina.sultanova@gmail.com)

Султанова Екатерина Александровна

**Подробности на сайте конференции:**

<http://vtik.net/konferencii/8-3-mnk-itps.html>

УДК 371.3:681.51

Д. А. Печников, канд. техн. наук, доц., e-mail: 19pda72@bk.ru,  
Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова,  
г. Санкт-Петербург

### Модели обеспечения оперативности процесса критериально-ориентированного тестирования

*Рассматриваются модели обеспечения оперативности критериально-ориентированного оценивания в компьютерных системах тестирования, которые обеспечивают переход от точечных оценок эмпирической частоты успешного выполнения тестовых заданий к интервальным оценкам вероятности этой успешности, позволяющим определять погрешности и доверительные интервалы полученных оценок.*

**Ключевые слова:** системы тестирования, критериальный тест, интервальная оценка, доверительный интервал, тестовая задача, результаты испытаний

#### Введение

Под педагогическим контролем обычно понимается "функция управления образовательным процессом, осуществляемая с целью получения достоверной информации о ходе и результатах проводимой воспитательной и обучающей деятельности" [1]. В качестве перспективного методологического средства реализации контроля сегодня рассматриваются методы тестологии, а в качестве технического средства — компьютерные системы тестирования (КСТ).

Выделяют входной, текущий и итоговый виды педагогического контроля.

Входной и итоговый контроли предваряют и завершают учебный процесс. Их результаты могут и должны учитываться при проектировании обучения, но они не ориентированы на корректуру уже начавшегося процесса. Эти виды контроля могут быть реализованы как средствами нормативно-ориентированного, так и критериально-ориентированного тестирования.

В отличие от них текущий контроль реализуется непосредственно в процессе обучения, а его "важнейшей функцией является функция обратной связи, которая позволяет преподавателю получать сведения о ходе процесса усвоения у каждого учащегося и адаптировать процесс обучения к их потребностям" [2].

Адаптировать процесс обучения к потребностям обучаемых на основе данных нормативно-ориентированного тестирования (Петя знает лучше Вани, а Ваня — лучше Кати) невозможно. Для этого нужны оценки, идентифицирующие соотношения вида

"усвоил — не усвоил" между теми конкретными обучаемыми и теми конкретными познавательными объектами, в отношении которых реализуется рассматриваемый процесс обучения. Поэтому для решения задач текущего педагогического контроля могут использоваться только методы критериально-ориентированного тестирования.

В числе КСТ, представленных в Интернет, абсолютно преобладают программные средства, ориентированные на решение задач критериально-ориентированного тестирования (Adit Testdesk, M-Тест, EasyQuizzy, MultiTester System, RSP, The Examiner testing system, FastTEST professional, C-Quest, CONTEST, SunRav TestOfficePro, HyperTest, UniTest System, TestMaster, AVELife TestGold Studio, АСТ-Тест Plus, e-University, RichTest, Tester, Грамотей-КЛАСС, "Контроль знаний", "Система проверки знаний", "Универсальный тестовый комплекс", "Экзаменатор", "Аттестация", УСАТИК и т.д.). Преобладание критериально-ориентированных КСТ обусловлено тем, что "для педагогического контроля уровня обученности более привычной и естественной является задача, решаемая в рамках критериально-ориентированного тестирования" [3]. Однако именно этот вид тестирования не имеет развитых методов оценивания полученных результатов.

Методы классической теории тестов и современной тестовой теории IRT (*Item Response Theory*) преимущественно ориентированы на ранжировку обучаемых по уровню обученности вне зависимости от достаточности или недостаточности достигнутого ими уровня усвоения рассматриваемой предметной области. Вопросы

проектирования и оценки результатов выполнения критериально-ориентированных тестов, устанавливающих соотношение "усвоил — не усвоил" между обучаемым и конкретной совокупностью элементов содержания обучения, решаются по остаточному принципу. В результате "отсутствие стандарта или хотя бы общепринятых норм и правил создания компьютерных систем тестирования привело к тому, что практически каждая из них является "вещью в себе" и не имеет описания алгоритмов функционирования, в частности, описания реализуемых процедур оценивания результатов тестирования" [4].

Ориентированность на решение задач текущего педагогического контроля предъявляет к методам и средствам критериально-ориентированного тестирования ряд специфических требований. В числе этих требований одним из ведущих является требование оперативности.

Задачи текущего контроля имеют целью выработку адресных обучающих воздействий и в идеале должны решаться в реальном масштабе времени непосредственно в процессе обучения. Поэтому процесс критериально-ориентированного тестирования должен занимать минимум времени. Оперативность процедур обработки и отображения результатов действий обучаемых проблем не вызывает, поскольку полностью обеспечивается за счет быстрого действия аппаратно-программных средств КСТ. А вот оперативность самой процедуры тестирования в современных КСТ не обеспечивается.

Эти обстоятельства определяют необходимость разработки и внедрения в программное обеспечение КСТ методов и процедур, которые непосредственно направлены на выполнение требования обеспечения оперативности тестирования: "обязывать каждого обучаемого проходить полностью критериально-ориентированный тест не рационально, ... любой испытуемый должен продолжать тестирование до тех пор, пока не станет совершенно ясно, что его "истинный" уровень подготовленности (*true score*) выше или ниже критериального балла (стандарта оценивания)" [5].

Другими словами, для полноценного достижения целей текущего педагогического контроля необходимо минимизировать продолжительность процедуры критериально-ориентированного тестирования, обеспечивая при этом заданную достоверность получаемых результатов.

### Постановка задачи и анализ подходов к ее решению

Время выполнения теста определяется как произведение  $T = tn$  двух параметров:

- $t$  — "скорость теста (*test speededness*)" [2], оцениваемая временем выполнения одного тестово-

го задания (ТЗ), которое для заданий закрытой формы обычно составляет 30...40 с на ТЗ;

- $n$  — "длина теста (*test length*)", измеряемая числом ТЗ в тесте.

Скорость тестирования  $t$  обусловлена психофизиологическими возможностями обучаемых, а потому не может быть существенно сокращена. Сокращена может быть только длина  $n$  теста.

Поэтому выполнение требования оперативности процедур критериально-ориентированного тестирования связано, прежде всего, с "минимизацией числа тестовых заданий, которые должен выполнить испытуемый, за счет остановки процесса тестирования после выполнения очередного задания и получения текущих результатов, обеспечивающих принятие достоверного индивидуального решения "аттестован — не аттестован (зачет — не зачет)" [6].

На минимизацию числа выполняемых ТЗ ориентирован ряд методов и моделей, которые, по своей сути, базируются на двух подходах.

Суть первого подхода состоит в завершении процедуры тестирования после того, как соотношение "больше" или "меньше" между оценкой результатов тестирования и принятым критерием станет определяться с заданной (достаточной) достоверностью. В рамках этого подхода была сформулирована задача выбора такой длины теста, которая бы при сравнении достигнутой вероятности  $p$  успешного выполнения теста с критериальным значением  $p_0$  этой вероятности обеспечивала исключение заданных величин ошибок 1-го рода ( $\alpha$ ), когда знающий материал обучаемый получает отрицательный результат (незачет), и 2-го рода ( $\beta$ ), когда не знающий материал обучаемый получает зачет.

Наиболее совершенный вариант решения этой задачи был предложен в 1980—1982 гг. Р. А. Берком [7] и Ван дер Линденом [8], которые обратили внимание на то, что "в рамках принятой биномиальной модели имеет место линейная зависимость между проходным баллом и соответствующей ему длиной теста" [8] и эта зависимость "может быть использована в процедуре оптимизации длины теста в качестве нового критерия" [8]. Этими авторами было обосновано, что для такого показателя справедливо соотношение вида [8]

$$\frac{c_{1,2}}{n} = \frac{\ln \frac{1-p_1}{1-p_2}}{\ln \frac{p_2(1-p_1)}{p_1(1-p_2)}} + \frac{\ln \lambda_{1,2}}{n \ln \frac{p_2(1-p_1)}{p_1(1-p_2)}} \quad (1)$$

при  $\begin{cases} \lambda_1 = \frac{\beta}{1-\alpha} \text{ для } c_1; \\ \lambda_2 = \frac{1-\beta}{\alpha} \text{ для } c_2, \end{cases}$

где  $c_{1,2}$  — соответственно значения проходного балла для верхней ( $p_2$ ) и нижней ( $p_1$ ) границ зоны неопределенности (интервала безразличия),  $\alpha, \beta$  — соответственно значения значимости ошибок 1-го и 2-го рода принимаемых решений.

Как отметил Ван дер Линден, это "соотношение интересно тем, что левая его часть представляет собой относительную оценку проходного балла, а правая является константой, которая не зависит от длины теста и определяется только граничными значениями зоны безразличия. Всякий раз, когда устанавливаются границы зоны безразличия, мы получаем возможность узнать проходной балл для любой длины теста" [8]. Существо этого положения иллюстрирует рис. 1, на котором приведены зоны принятия решения вида "усвоил — не усвоил (зачет — не зачет, аттестован — не аттестован и т. п.)" для области безразличия с параметрами  $\alpha = \beta = 0,05, p_1 = 0,4, p_2 = 0,6$ .

Суть второго подхода, который частично представлен в работах [6, 8], состоит в прекращении тестирования после того, как ширина доверительного интервала (ДИ) оценки результатов тестирования станет меньше некоторого ее наперед заданного нормативного значения. Здесь задача выбора длины теста формулируется как задача прекращения тестирования после того, как фактическая ширина ДИ последней оценки  $p$  успешного выполнения теста становится меньше ее наперед заданного значения.

Если ТЗ теста формулируются в закрытой форме с единственным правильным ответом, то в соответствии с работами [8, 9] для решения задачи минимизации длины теста на основе данных о погрешности полученных оценок результатов тестирования могут быть использованы две модели.

Первая модель основана на биномиальном законе распределения и имеет вид [9]

$$\left. \begin{aligned} p_i &= \frac{i-k}{i}; \\ p_i^{\text{верх}} &= \frac{(i-k+1)F_{2(i-k+1), 2k, 1-\varepsilon/2}}{k+(i-k+1)F_{2(i-k+1), 2k, 1-\varepsilon/2}}; \\ p_i^{\text{низ}} &= \frac{(i-k)}{(i-k)+(k+1)F_{2(k+1), 2(i-k), 1-\varepsilon/2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) — число выполненных ТЗ;  $n$  — число ТЗ в тесте;  $k$  ( $k = \overline{0, i}$ ) — число ошибок;  $1 - \varepsilon/2$  — порядок квантиля распределения;  $p_i$  ( $p \in (0, 1)$ ) — оценка вероятности успеха после выполнения  $i$ -го ТЗ;  $p_i^{\text{верх}}, p_i^{\text{низ}}$  — соответственно верхняя и нижняя границы ДИ вероятности успеха после выполнения  $i$ -го ТЗ;  $F_{f, g, \alpha}$  — квантиль порядка  $\alpha$  распределения  $F$  с  $f, g$  степенями свободы;

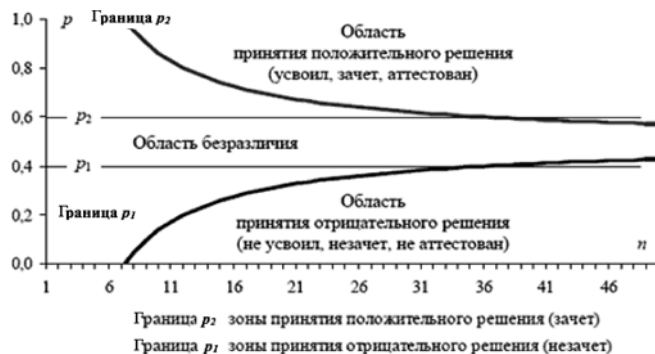


Рис. 1. Области принятия решений вида "аттестован — не аттестован"

Вторая модель базируется на геометрическом законе распределения и в работе [9] представлена в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} p_i &= \arg \max_p \left[ p^{(i-k)+(m-l)} (1-p)^{k+l} \right]; \\ p_i^{\text{верх}} &= \hat{p}_i + u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{i}}; \\ p_i^{\text{низ}} &= p_i - u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{i}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $(i-k)$  ( $(i-k) = \overline{0, i}$ ) — число правильно выполненных ТЗ;  $l, (m-l)$  — соответственно число векторов непрерывного успеха и непрерывной неудачи ( $m+l \leq i$ );  $p_i$  ( $p \in (0, 1)$ ) — результат тестирования после выполнения  $i$ -го ТЗ (оценка вероятности успеха, получаемая по методу правдоподобия);  $L_i = p^{(i-k)+(m-l)} (1-p)^{k+l}$  — функция правдоподобия;  $p_i^{\text{верх}}, p_i^{\text{низ}}$  — соответственно верхняя и нижняя границы ДИ вероятности успеха после выполнения  $i$ -го ТЗ;  $u_{1-\varepsilon/2}$  — квантили стандартного нормального распределения порядка  $1 - \varepsilon/2$ .

Оценки (2), (3) в достаточной мере согласованы. Экспериментально выявленная в работе [9] динамика этих оценок в общем случае имеет вид, приведенный на рис. 2.

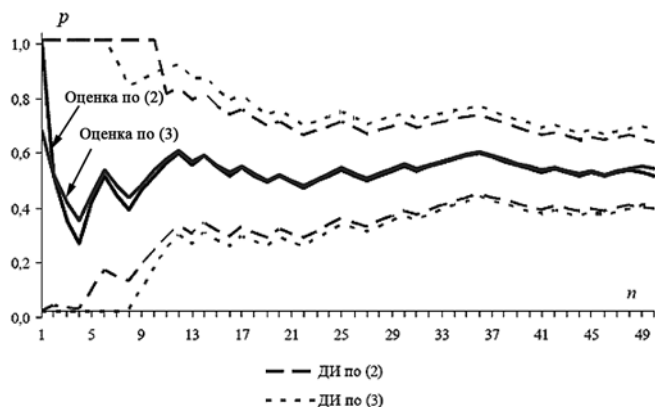


Рис. 2. Динамика изменения (ДИ) диапазона результатов среднего успешного обучающегося (результат оценивания  $0,376 < p = 0,500 < 0,624$  при  $\alpha = 0,1$ )



Кроме уже рассмотренных различий между первым и вторым подходами есть еще одно, на которое следует обратить внимание. Это различие состоит в том, что первый подход реализует процедуры измерения и оценивания, а второй подход — только процедуру измерения. Суть этого отличия требует определенного комментария.

Понятия "оценивание" и "измерение" формулируются в двух предметных областях квалитологии — в метрологии и в квалиметрии.

В метрологии измерение рассматривается как частный случай оценивания:

1) измерение — "сравнение измеряемой величины (конкретного проявления измеряемого свойства) со шкалой этого свойства в целях получения результата измерения (оценки свойства или значения величины)" [10];

2) оценивание — "аналог измерения, применяемый в тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины)".

В квалиметрии приняты другие трактовки:

1) измерение — "процедура определения единичного показателя качества" [11];

2) оценивание — "процедура определения численного значения уровня качества продукции" [11].

Единичный показатель качества — это "количественная характеристика одного из свойств продукции" [11], а уровень качества — "относительная характеристика качества, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемого объекта с базовыми значениями соответствующих показателей" [11]. Из последних дефиниций следует, что в квалиметрии понятия оценивания и измерения рассматриваются как неподчиненные.

Эталоны, используемые при измерении и оценивании, также имеют отличия: "В оценивании эталон имеет ценностный, системно-социальный характер и меняется вместе с социально-экономическим и научно-техническим прогрессом, т. е. имеет переходящее существование. В измерении же эталон постоянен и определяет шкалы измерения единичных показателей качества" [12].

Другими словами, в квалиметрии считается, что любое свойство нужно сначала измерить (получить его объективную оценку в некоторой неизменной шкале), а затем оценить полученный результат, т. е. сравнить его с тем значением рассматриваемого свойства, которое принято в качестве эталона, и сформулировать свое отношение к результатам этого сравнения.

Необходимость различения первого и второго подходов по признаку "измерение — оценивание"

определяется тем фактом, что во всех КСТ принят квалиметрический подход:

- функции измерения и оценивания разделены;
- функция измерения реализуется всегда одинаково в одной и той же шкале;
- параметры оценивания определяются разработчиком теста (преподавателем), который сам выбирает эталоны и шкалы их оценивания.

Далее следует отметить, что модели (2), (3) являются интервальными, а потому обеспечивают сравнение с эталонами как самих результатов тестирования, так и их погрешностей. Другими словами, они способны обеспечить реализацию обоих рассмотренных выше подходов. С учетом последнего всю процедуру управления критериально-ориентированным тестированием можно представить в виде, приведенном на рис. 3.

Эта процедура предполагает, что после выполнения испытуемым каждого ТЗ проводится

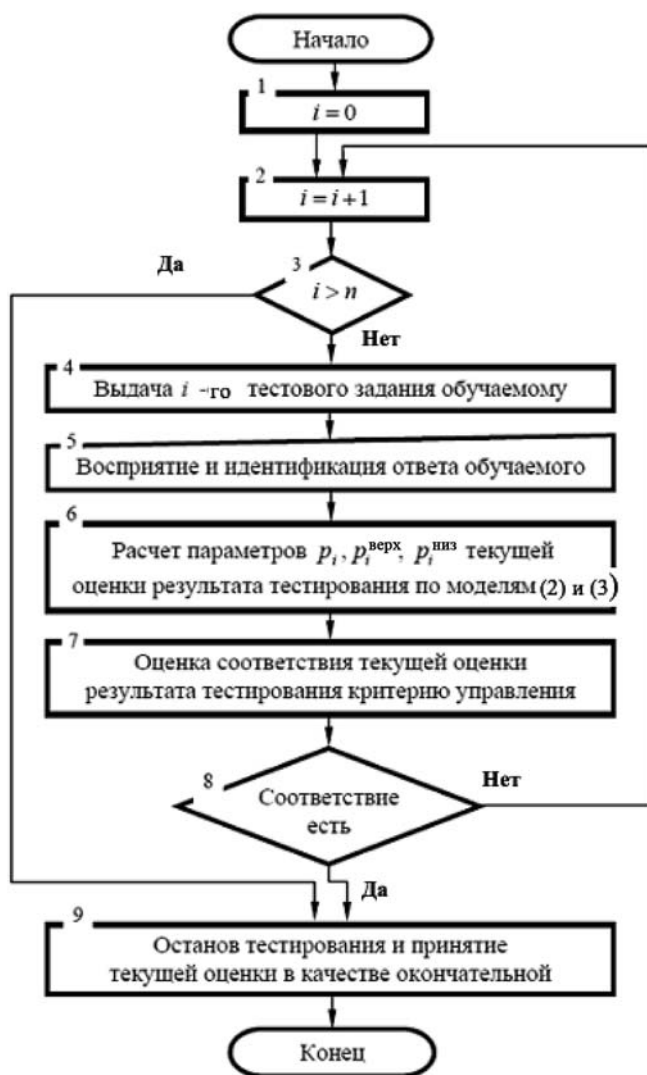


Рис. 3. Процедура управления критериально-ориентированным тестированием

проверка текущего результата тестирования на его соответствие принятому критерию управления. Если такое соответствие имеет место, то тестирование прекращается. В противном случае испытуемый вплоть до выполнения всего теста получает следующее ТЗ. В любом случае в качестве окончательного результата тестирования принимается последняя текущая оценка.

Различие в процедуре реализации рассмотренных подходов к минимизации длины теста сводится к различию в принятых критериях управления.

### Альтернативные критерии управления процессом критериально-ориентированного тестирования

Для реализации первого из рассматриваемых подходов вместо расчетов по модели (1) предлагается после выполнения обучаемым каждого ТЗ по моделям (2), (3) определять верхнюю границу  $p_i^{\text{верх}}$  и нижнюю границу  $p_i^{\text{низ}}$  ДИ оценки  $p_i$  и использовать эти данные для выработки управляющих воздействий по критерию

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \begin{cases} p_i^{\text{низ}} > p_0; \\ p_i^{\text{верх}} < p_0; \end{cases} \\ 0 & \text{в ином случае,} \end{cases} \quad (4)$$

где  $I_i$  — результаты сравнения верхней  $p_i^{\text{верх}}$  и нижней  $p_i^{\text{низ}}$  границ ДИ текущей оценки  $p_i$  с нормативным значением  $p_0$  результата тестирования ( $I_i = 1$  — останов тестирования;  $I_i = 0$  — продолжение тестирования).

Критерий (4) определяет наличие у текущего результата  $p_i$  требуемой достоверности, но функцию его оценивания не реализует. Формулировка в системе предпочтений преподавателя отношения к значению  $p_i$  ("зачет — не усвоил" и т. п.) здесь не проводится, поскольку функция оценивания во всех КСТ (см. пример на рис. 4) реализуется отдельно, причем не только в дихотомической, но и в других шкалах.



Рис. 4. Окно задания параметров процедуры оценивания в КСТ "Адаптивная система тестирования" (АСТ)

В соответствии со вторым подходом процесс тестирования должен быть остановлен после получения текущего результата  $p_i$  заданной точности  $\delta^{\text{зад}}$ , когда границы ДИ начинают располагаться внутри нормативного интервала ( $p_i \pm \delta^{\text{зад}}$ ), т. е. имеет место соотношение  $(p_i^{\text{верх}}, p_i^{\text{низ}}) \in (p_i + \delta^{\text{зад}}, p_i - \delta^{\text{зад}})$ . В этом случае остановку процесса тестирования следует осуществлять по критерию

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{при выполнении условий} \\ \begin{cases} p_i^{\text{верх}} < p_i + \delta^{\text{зад}}; \\ p_i^{\text{низ}} > p_i - \delta^{\text{зад}}, \end{cases} \\ 0 & \text{в ином случае,} \end{cases} \quad (5)$$

где  $I_i$  — результат сравнения заданной и достигнутой точности оценок тестирования ( $I_i = 1$  — останов тестирования;  $I_i = 0$  — продолжение тестирования).

### Оценка работоспособности альтернативных критериев управления

Группе из 129 испытуемых был предложен тест, который включал 50 закрытых ТЗ с выбором из пяти альтернатив единственного верного ответа. ТЗ предъявлялись в случайном порядке. Воздействия по управлению процессом тестирования по моделям (4), (5) вырабатывались и фиксировались апостериори. Для расчета управляющих воздействий были приняты следующие модели:

- модели (2), (3) с параметром  $\alpha = 0,05$ ;
- критерий (4) с параметром  $p_0 = 0,5$ ;
- критерий (5) с параметрами  $\delta_1^{\text{зад}} = 0,1$ ;  $\delta_2^{\text{зад}} = 0,15$ ;  $\delta_3^{\text{зад}} = 0,2$ . В табл. 1 приведены характеристики выработанных воздействий.

Наглядно результаты применения критериев (4), (5) представлены на рис. 5.

Таблица 1

Результаты применения критериев управления тестированием

Результаты применения способа управления	Управление по критерию (5) с допустимой погрешностью			Управление по критерию (4)
	$\delta^{\text{зад}} = 0,1$	$\delta^{\text{зад}} = 0,15$	$\delta^{\text{зад}} = 0,2$	
Число случаев останова тестирования	5	129	129	87
Процент случаев останова тестирования	3,9 %	100,0 %	100,0 %	67,4 %
Среднее отклонение результата от "истинного"	0,005	0,056	0,091	0,037

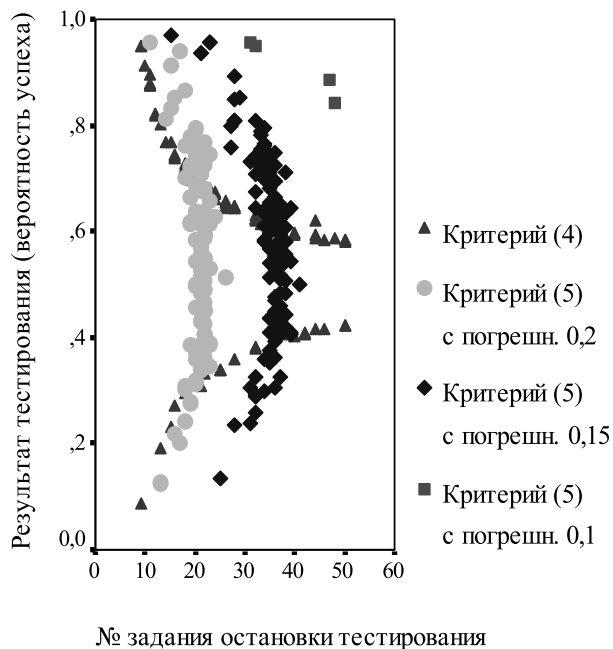


Рис. 5. Взаимосвязь результатов тестирования и длины теста при управлении по критериям (4), (5)

Для оценки эффективности альтернативных критериев управления (4), (5) использовались показатели эффективности, представляющие собой измеряемые на интервале (0, 1) показатели вида "чем больше, тем лучше":

1) частный показатель  $k_j^{(1)}$  оперативности управления

$$k_j^{(1)} = 1 - \frac{i_j^{\min}}{n}, k_j^{(1)} \in [0, 1], \quad (6)$$

где  $j (j = \overline{1, m})$  — номер испытуемого;  $i_j^{\min}$  — номер последнего ТЗ, выполненного  $j$ -м испытуемым (номер ТЗ, после выполнения которого тестирование было прекращено),  $n$  — длина теста (число ТЗ в тесте);

Таблица 2

Показатели эффективности критериев управления тестированием

Показатели эффективности	Управление по критерию (5) с допустимой погрешностью			Управление по критерию (4)
	$\delta^{\text{зад}} = 0,1$	$\delta^{\text{зад}} = 0,15$	$\delta^{\text{зад}} = 0,2$	
Оперативность управления (6)	0,007	0,313	0,593	0,313
Точности управления (7)	0,995	0,944	0,909	0,963
Интегральный (8)	0,006	0,294	0,538	0,292

2) частный показатель  $k_j^{(2)}$  точности оценки результатов тестирования

$$k_j^{(2)} = 1 - \Delta p_{i_j^{\min}} = 1 - |p_{i_j^{\min}} - p_j^*|, k_j^{(2)} \in [0, 1], \quad (7)$$

где  $j (j = \overline{1, m})$  — номер испытуемого;  $i_j^{\min}$  — номер последнего выполненного ТЗ;  $p_{i_j^{\min}}$  — окончатель-

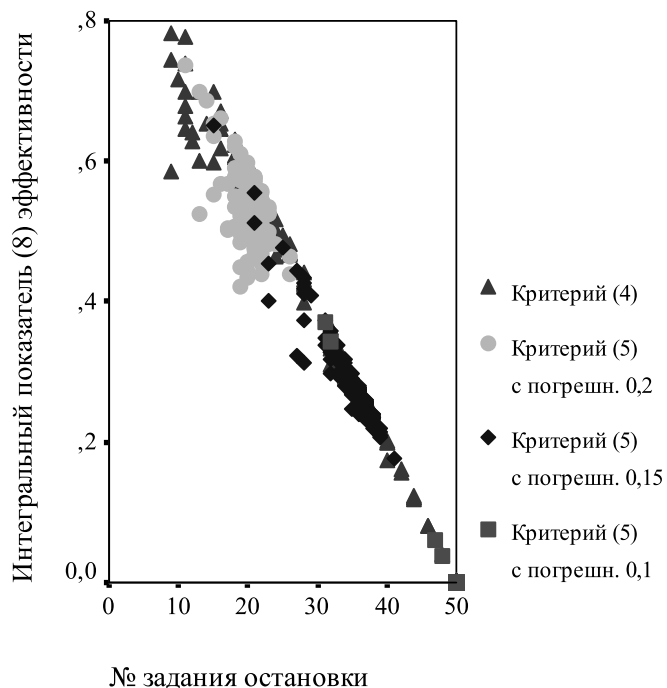


Рис. 6. Точечная диаграмма соответствия индивидуальных оценок интегральной эффективности управления тестированием длине теста

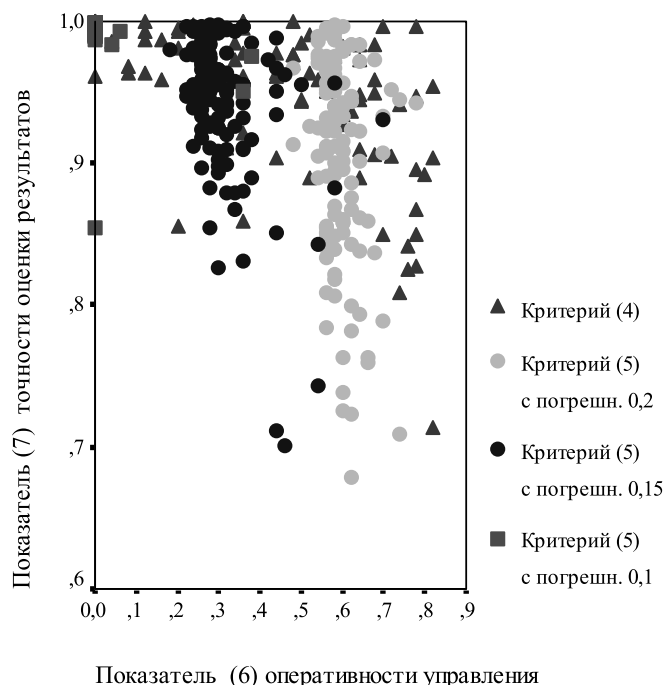


Рис. 7. Точечная диаграмма соответствия частных показателей (6), (7) эффективности управления тестированием

ный результат тестирования;  $p_j^*$  ( $p_j^* = p_{nj}$ ) — "истинный балл (true score)" (результат, полученный после выполнения всех ТЗ теста).

3) интегральный показатель  $K_j$  эффективности управления процессом тестирования

$$K_j = k_j^{(1)}k_j^{(2)} = \left(1 - \frac{i_j^{\min}}{n}\right) \left(1 - \Delta p_{i_j^{\min}}\right), K_j \in [0, 1]. \quad (8)$$

В табл. 2 приведены обобщенные результаты оценки эффективности критериев (4), (5) управления тестированием.

Наглядно эти результаты представлены на рис. 6 и рис. 7.

### Заключение

Критерии (4), (5) и реализующая их процедура управления критериально-ориентированным тестированием (см. рис. 1) работоспособны и обеспечивают приемлемую эффективность. Каждый из критериев (4), (5) имеет свои достоинства и недостатки, которые обусловлены общими закономерностями изменения используемых в них показателей. Последнее определяет целесообразность попытки синтеза этих критериев в один обобщенный критерий.

### Список литературы

1. Аванесова Т. П., Печников А. Н., Шиков А. Н. Электронное обучение: учебное пособие. СПб.: ВАС, 2014. 73 с. URL: [http://pedlib.ru/books.php?part=Books&dir=7/0297&num\\_page=1](http://pedlib.ru/books.php?part=Books&dir=7/0297&num_page=1) (дата обращения: 07.11.2016)
2. Коджаспирова Г. М., Коджаспиров А. Ю. Словарь по педагогике. М.: ИКЦ "МарТ"; Ростов н/Д: Изд. центр

"МарТ", 2005. 448 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/64113/> (дата обращения: 07.11.2016)

3. Тальзина Н. Ф. Педагогическая психология. М.: Изд. центр "Академия", 1998. 288 с. URL: <http://www.persev.ru/book/pedagogicheskaya-psihologiya> (дата обращения: 07.11.2016)

4. Карпов В. Э., Карпова И. П. Язык описания системы контроля знаний // Компьютеры в учебном процессе, 2000, № 4. С. 147—155.

5. Субетто А. И. Сочинения. Ноосферизм: В 13 томах. Том восьмой: Квалитативизм: философия и теория качества, квалитология, качество жизни, качество человека и качество образования. Книга 2 / Под ред. Л. А. Зеленова. Петербург—Кострома: КГУ им. Н. А. Некрасова, 2009. 726 с.

6. Палкин К. С., Печников А. Н. Метод интервальной оценки результатов выполнения системы одиночных тестовых заданий закрытого типа с единственным верным ответом // Образовательные технологии и общество (Educational Technology & Society). 2014. Т. 17, № 2. С. 491—501. URL: <http://ifets.ieee.org/russian/periodical/journal.html> (дата обращения: 07.11.2016).

7. Berk R. A. Criterion-referenced measurement: The state of art, Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1980.

8. Wim J. van der Linden. (1982). Passing score and length of a mastery test. Evaluation in Education. 1982, Vol. 5. P. 149—164. URL: <http://doc.utwente.nl/68993/1/Linden82passing.pdf> (дата обращения: 07.11.2016)

9. Палкин К. С., Печников А. Н., Печников Д. А. Метод управления длиной системы одиночных тестовых заданий с единственным верным ответом // Образовательные технологии и общество (Educational Technology & Society). 2015. Т. 18, № 1. С. 544—560. URL: [http://ifets.ieee.org/russian/depository/v18\\_i1/pdf/16.pdf](http://ifets.ieee.org/russian/depository/v18_i1/pdf/16.pdf) (дата обращения: 07.11.2016)

10. Балыхина Т. М. Словарь терминов и понятий тестологии. М.: РУДН, 2000. 86 с. URL: <http://www.psyoffice.ru/slovar-s174.htm> (дата обращения: 07.11.2016)

11. ГОСТ 15467—79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением № 1). М.: Стандартинформ, 2009. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-15467-79> (дата обращения: 07.11.2016)

12. РМГ 29—2013. Метрология. Основные термины и определения (введен с 01.01.2015). М.: Стандартинформ, 2014. 121 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115154> (дата обращения: 07.11.2016)

D. A. Pechnikov, Associate Professor, e-mail: 19pda72@bk.ru,  
Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union  
N. G. Kuznetsova, St. Petersburg, Russia 197045, St. Petersburg

## Model Ensure Efficiency of Process Criteria-Oriented Testing

*The article considers models of criterially-oriented estimation in computer testing systems that provide the transition from point estimates of the empirical frequency of successful execution of test tasks to interval estimates of the probability of this success, allowing to determine the errors and confidence intervals of the estimates obtained.*

**Keywords:** criterion-based test, a test task, the test results, point estimate, interval estimate, confidence interval, the given error

### References

1. Avanesova T. P., Pechnikov A. N., Shikov A. N. *Elektronnoe obuchenie*, SPb., VAS, 2014, 73 p., available at: [http://pedlib.ru/books.php?part=Books&dir=7/0297&num\\_page=1](http://pedlib.ru/books.php?part=Books&dir=7/0297&num_page=1) (date of access: 07.11.2016) (in Russian).

2. Kodzhaspirova G. M., Kodzhaspirov A. Ju. *Slovar' po pedagogike*, Moscow, IKC "MarT"; Rostov n/D: Izd. centr "MarT", 2005. 448 p., available at: <http://www.twirpx.com/file/64113/> (date of access: 07.11.2016) (in Russian).

3. Talyzina N. F. *Pedagogicheskaja psihologija*, Moscow, Izd. centr "Akademija", 1998, 288 p., available at: <http://www.persev.ru>

ru/book/pedagogicheskaya-psihologiya (date of access: 07.11.2016) (in Russian).

4. **Karpov V. Je., Karpova I. P.** Jazyk opisanija sistemy kontrolja znaniy, *Kompjutyery v Uchebnom Processe*, 2000, no. 4, pp. 147–155.

5. **Subetto A. I.** Sochinenija. Noosferizm. Tom vos'moj: Kvalitativizm: filosofija i teorija kachestva, kvalitologija, kachestvo zhizni, kachestvo cheloveka i kachestvo obrazovanija. Kniga 2 / Pod red. L. A. Zelenova S.-Peterburg—Kostroma, KGU im. N. A. Nekrasova, 2009, 726 p. (in Russian).

6. **Palkin K. S., Pechnikov A. N.** Metod interval'noj ocenki rezultatov vypolnenija sistemy odinochnyh testovyh zadaniy zakrytogo tipa s edin-stvennym vernym otvetom, *Obrazovatel'nye tehnologii i obshhestvo* (Educational Technology & Society), 2014, vol. 17, no. 2, pp. 491–501, available at: <http://ifets.ieee.org/russian/periodical/journal.html> (date of access: 07.11.2016).

7. **Berk R. A.** Criterion-referenced measurement: The state of art, Baltimore, MD, Johns Hopkins University Press, 1980.

8. **Wim J. van der Linden.** Passing score and length of a mastery test, *Evaluation in Education*, 1982, vol. 5, pp. 149–164,

available at: <http://doc.utwente.nl/68993/1/Linden82passing.pdf> (date of access: 07.11.2016)

9. **Palkin K. S., Pechnikov A. N., Pechnikov D. A.** Metod upravlenija dlinoj sistemy odinochnyh testovyh zadaniy s edinstvennym vernym otvetom, *Obrazovatel'nye Tehnologii i Obshhestvo* (Educational Technology & Society), 2015, vol. 18, no. 1, pp. 544–560, available at: [http://ifets.ieee.org/russian/depository/v18\\_i1/pdf/16.pdf](http://ifets.ieee.org/russian/depository/v18_i1/pdf/16.pdf) (date of access: 07.11.2016) (in Russian).

10. **Balyhina T. M.** *Slovar' terminov i ponjatij testologii*. Moscow, RUDN, 2000, 86 p., available at: <http://www.psyoffice.ru/slovar-s174.htm> (date of access: 07.11.2016) (in Russian).

11. **GOST 15467—79.** *Upravlenie kachestvom produkcii. Osnovnye ponjatija. Terminy i opredelenija* (s Izmeneniem № 1), Moscow, Standartinform, 2009., available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-15467-79> (date of access: 07.11.2016) (in Russian).

12. **RMG 29—2013.** Metrologija. Osnovnye terminy i opredelenija (vve-den s 01.01.2015), Moscow, Standartinform, 2014. 121 p., available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200115154> (date of access: 07.11.2016) (in Russian).

УДК 004.942

**Т. В. Тимофеева**, ст. преподаватель, e-mail: timofeeva\_tv@pfur.ru,

**М. А. Нестеренко**, ст. преподаватель, e-mail: nesterenko\_ma@pfur.ru,

Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Россия, Москва

## Параметризация кривых в AutoCAD на примере овалов Кассини

*Предложен новый подход к интегрированному изучению курсов начертательной геометрии и компьютерной графики для инженерных направлений подготовки в учебных заведениях высшего профессионального образования на основе углубленного изучения отдельных тем. Методика продемонстрирована на практическом примере, в котором рассмотрены возможности создания и исследования свойств овалов Кассини на базе создания параметрического блока по аналитической формуле в AutoCAD. В процессе исследования проанализированы особенности кривых четвертого порядка как результата пересечения тора плоскостями, параллельными оси вращения тора, зависимость формы кривых от соотношения параметров. В работе рассматривается задача воссоздания метрики торов по контурам полученных сечений методами начертательной геометрии и с помощью 3D-моделирования. На основе полученных кривых построены поверхности с образующими или направляющими, являющимися овалами Кассини.*

**Ключевые слова:** кривые четвертого порядка, овалы Кассини, лемниската Бернулли, сечения тора, фокусы, AutoCAD Autodesk, параметризация, параметрический блок, геометрические зависимости, размерные зависимости, начертательная геометрия, компьютерная графика

### Введение

Модернизация образования ставит на повестку дня вопрос поиска новых форм и методов преподавания графических дисциплин в вузах. Вопросы реорганизации учебного курса инженерной графики в вузе путем слияния или совместного изучения некоторых тем начертательной геометрии и компьютерной графики, а также инженерной и компьютерной графики активно обсуждаются последние несколько лет [1–3], написаны программы обучения, пособия и учебники [4]. Использование системы автоматизированного проектирования AutoCAD Autodesk только в качестве чертежного инструмента

при выполнении учебных заданий студентами кажется авторам непродуктивным. Более эффективно использовать AutoCAD как инструмент для студенческого исследования. При этом необходимо научить студентов активно применять эффективные возможности параметризации чертежа и параметрических блоков.

Автоматическая параметризация чертежа позволяет ускорить и облегчить процесс его создания, значительно повысить уровень сложности решаемых задач [5, 6]. Параметризация — это процесс, представляющий собой создание связей и ограничений, применяемых к группе геометрических объектов. Параметризация отчасти берет на себя функции программирования в AutoLISP,

однако параметрическая модель создается интерактивно, без программирования. Параметрический чертеж содержит информацию о связях между объектами и о наложенных на объекты ограничениях. Связи между объектами — это зависимость между параметрами, например координатами точек этих объектов. Ограничения — это зависимость между параметрами одного объекта или равенство параметра константе. Связи и ограничения формируют параметрическую модель, элементы которой непрерывно выполняют заданные математические зависимости. Такая модель может менять свою форму без нарушения связей между элементами.

### Цель исследования

Плоские кривые широко используются в качестве фрагментов очертаний машиностроительных деталей, а также элементов архитектурных форм и строительных конструкций. В AutoCAD отсутствуют средства автоматического построения алгебраических кривых, кроме окружности и эллипса. Авторы задались целью предложить удобный и общедоступный метод построения плоских алгебраических кривых в AutoCAD с помощью создания параметрических блоков. В качестве примера выбраны линии, полученные сечением тора плоскостью — овалы Кассини. В данной работе рассматривается также задача восстановления поверхности тора по сечению с применением методов начертательной геометрии и средств компьютерного моделирования. Материалы статьи можно использовать для учебно-исследовательской работы студентов, а также как методику совместного изучения некоторых разделов начертательной геометрии и компьютерной графики. Предлагаемая методика направлена на углубление знаний основных законов геометрического формирования, необходимых для выполнения и чтения чертежей, в том числе с использованием систем автоматизированного проектирования.

### Метод исследования

При изучении темы "Пересечение поверхностей плоскостью" в курсе начертательной геометрии особое внимание уделяется лишь сечениям конуса, однако сечения поверхности тора являются не менее интересными [7–9].

Линии пересечения поверхности тора с плоскостями, параллельными его оси, имеют разную форму: а) в зависимости от формы тора (открытый, закрытый и самопересекающийся), т. е. от соотношения радиуса образующей окружности и

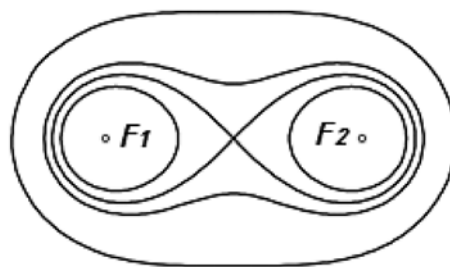


Рис. 1. Овалы Кассини

расстояния центра этой окружности до оси вращения; б) в зависимости от расстояния секущей плоскости до оси вращения тора (рис. 1).

В планиметрии такие кривые рассматривают как алгебраические кривые 4-го порядка, симметричные относительно осей координат. Геометрическое место точек  $M$ , принадлежащих таким кривым, определяется произведением расстояний  $F_2M \times F_1M = \text{const}$ , где  $F_1$  и  $F_2$  — фокусы [1]. Все эти линии имеют общее название — овалы Кассини (рис. 1), которые описываются уравнением

$$r^2 = c^2 \cos 2\varphi \pm \sqrt{c^4 \cos^2 2\varphi + a^4 - c^4}, \quad (1)$$

и после преобразований:

$$r = c \times \sqrt{\cos 2\varphi \pm \sqrt{\cos^2 2\varphi + \frac{a^4}{c^4} - 1}}, \quad (2)$$

где  $r$  и  $\varphi$  — полярные координаты точек кривой,  $a$  и  $c$  — независимые параметры, определяющие форму и размеры кривой,  $c$  —  $1/2$  расстояния между фокусами  $F_1$  и  $F_2$ ,  $a^2 = F_2M \times F_1M$ . На форму кривой влияет отношение этих параметров, а на размер при неизменном отношении — их значения.

Используя формулу и возможности создания параметрических блоков в AutoCAD, создадим основные типы этих кривых. Для этого необходимо создать параметрический блок, включающий базовый отрезок (радиус-вектор), которому присваиваются два параметра  $r$  и  $\varphi$ , являющиеся полярными координатами точек кривых Кассини и три вспомогательных отрезка. На вспомогательные отрезки накладываются геометрические зависимости симметрии с основным отрезком при фиксированном положении точки начала координат. Затем накладываются размерные зависимости равенства вспомогательных отрезков с базовым отрезком (рис. 2).

Для параметра  $\varphi$  в "Таблице свойств блока" (рис. 3, а) необходимо задать ряд значений от 0 до  $90^\circ$  с шагом  $5-10^\circ$ . В поле значения параметра  $d_1$  вводится правая часть уравнения (2) с заранее посчитанным значением  $b = \frac{a^4}{c^4} - 1$  (см. рис. 2).

Накладывая параметрические блоки с различ-

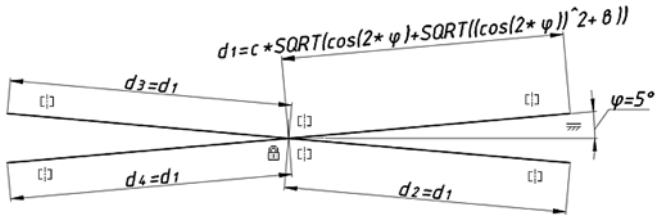


Рис. 2. Параметрический блок

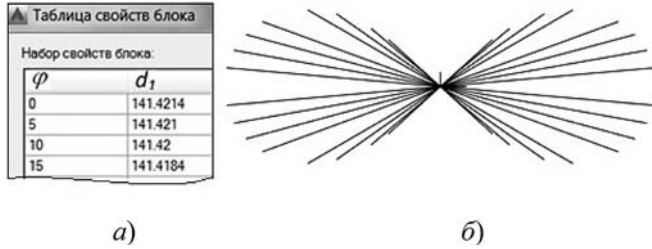


Рис. 3. Результат наложения блоков с различными параметрами  $\varphi$

ными значениями углов  $\varphi$ , получаем контуры искомого кривых (рис. 3, б).

Форма кривой зависит от соотношения значений  $a$  и  $c$ . Рассмотрим разновидности формы кривой.

**Кривая с параметрами  $a \geq c\sqrt{2}$ .** Эта кривая подобна эллипсу (рис. 4). Оси координат служат осями симметрии. В формуле (2) используем знак "+", так как в противном случае  $r$  не определено. В предложенном примере  $c = 100$ , для значения  $a$  взято граничное  $a = c\sqrt{2} = 141$ .

Параметр  $d_1$  будет равен

$$d_1 = 100\sqrt{\cos 2\varphi + \sqrt{\cos^2 2\varphi + 2,95}}.$$

**Кривая с параметрами  $c < a < c\sqrt{2}$ .** На кривой появляются два вогнутых участка и четыре точки перегиба (рис. 5). В формуле (2) используем знак "+". Принимаем  $c = 100$ ,  $a = 110$ .

Параметр  $d_1$  определяем по формуле

$$d_1 = 100 \times \sqrt{\cos 2\varphi + \sqrt{\cos^2 2\varphi + 0,46}}.$$

**Кривая с параметрами  $a = c$ .** Этому случаю соответствует кривая, называемая лемниската Бернулли (рис. 6), являющаяся частным случаем овала Кассини. В отличие от первых двух случаев угол  $\varphi$  ограничивается  $45^\circ$ , так как AutoCAD выдает предупреждение о недопустимости вычисления выражения  $d_1$  при больших углах. Формула (2) принимает более простой вид:  $r = 100\sqrt{2}\cos 2\varphi$ , и действительно, при значении  $\varphi > 45^\circ$  значение  $r$  не определено. В примере  $a = c = 100$ ,  $d_1 = c\sqrt{2}\cos 2\varphi$ .

**Кривая с параметрами  $a < c$ .** Кривая Кассини распадается на две замкнутые непересекающиеся кривые (рис. 7). Для построения внешней части

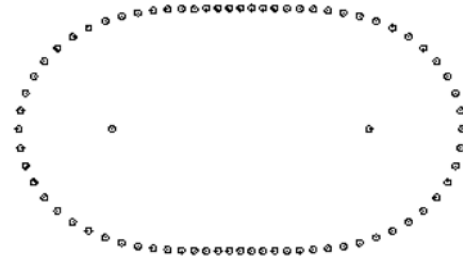


Рис. 4. Кривая с параметрами  $a \geq c\sqrt{2}$



Рис. 5. Кривая с параметрами  $c < a < c\sqrt{2}$



Рис. 6. Кривая с параметрами  $a = c$



Рис. 7. Кривая с параметрами  $a < c$

кривой используем знак "+" в формуле (2), а для внутренней части кривой — знак "-". Граничное допустимое значение  $\varphi$  зависит от отношения  $a/c$ .

В примере принято  $c = 100$ ,  $a = 90$ ,

$$d_1 = 100\sqrt{\cos 2\varphi \pm \sqrt{\cos^2 2\varphi - 0,34}}.$$

Угол, выше которого функция не определена, для этого случая оказался  $\varphi \geq 28^\circ$ .

## Результаты исследования

По полученным сечениям графическими методами можно получить метрику тора — положение оси, радиус образующей окружности, расстояние от оси до центра этой окружности и положение секущей плоскости (рис. 8). Для наглядности созданы 3D-модели поверхности тора с сечениями для каждого случая и показано совпадение этих сечений с кривыми, построенными с помощью параметрических блоков.

Использование принципа параметрического моделирования в обучении студентов превращает

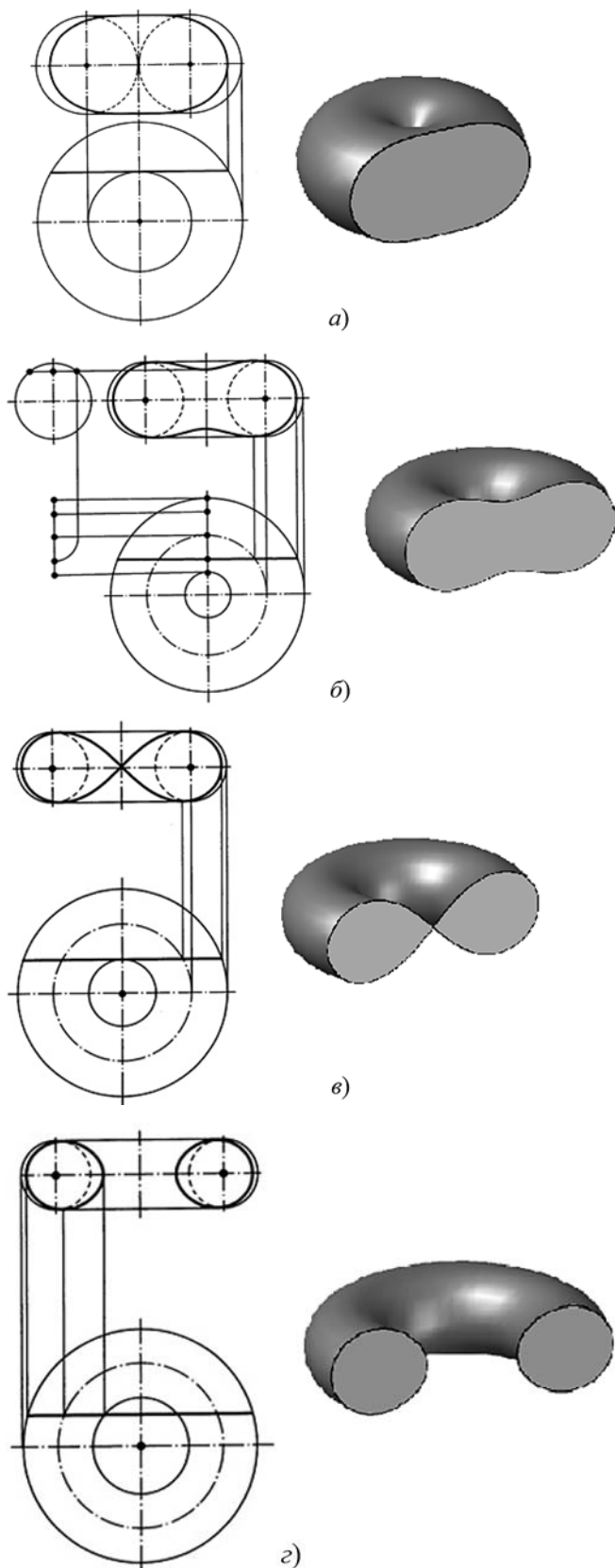


Рис. 8. Воссоздание метрики тора по его сечениям:

$a - a > c, a = c\sqrt{2} = 141, c = 100; б - a = c = 100; в - c\sqrt{2} >$   
 $> a > c, a = 110, c = 100; г - a < c, a = 90, c = 100$

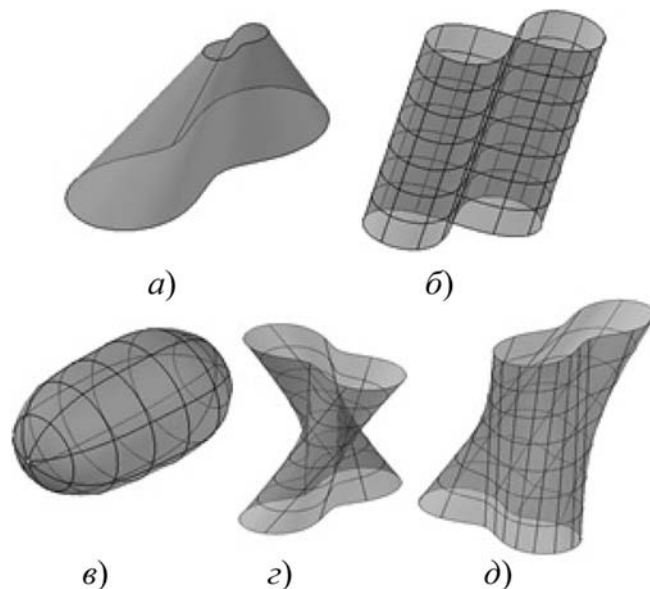


Рис. 9. Примеры поверхностей с элементами кривых Кассини

AutoCAD в руках обучающихся из "электронного кульмана" в инструмент для исследования. Выполнение подобного задания стимулирует студентов к изучению тем "Поверхности вращения", "Сечения тора", "Создание параметрических блоков", "3D-моделирование", погружает в работу с учебниками и справочными материалами. Построение хотя бы одного овала Кассини в аудитории с дальнейшим построением по этому сечению проекции тора, готовит студентов к самостоятельной проработке остальных случаев получения сечений, вызывает интерес к исследованию вариантов построения 3D-моделей на их основе, стимулирует познавательную-исследовательскую деятельность.

На основе полученных кривых возможно построение различных поверхностей с образующими или направляющими, являющимися овалами Кассини [10, 11]. На рис. 9 представлены примеры таких поверхностей, как коническая поверхность общего вида с направляющей — кривой Кассини (рис. 9, а), цилиндрическая поверхность общего вида с направляющей — лемнискатой Бернулли (рис. 9, б), оваллоид вращения (рис. 9, в), каналовые поверхности с поворотом образующей — кривой Кассини вокруг центра кривой (рис. 9, г) и вокруг одного из фокусов (рис. 9, д).

### Заключение

Метод построения точек кривых четвертого порядка, заданных в аналитической форме с помощью параметризации в AutoCAD, является простым и универсальным, использование параметрических блоков возможно для построения любых плоских кривых. Предложенный алго-



ритм изучения сечений тора поможет преподавателям начертательной геометрии и компьютерной графики дополнить свой курс конкретным заданием. Исследование свойств кривых стимулирует интерес студентов к математике, развивает математическое и инженерное мышление, устанавливает междисциплинарные связи.

#### Список литературы

1. Тимофеева Т. В., Нестеренко М. А. Об интеграции курсов компьютерной и инженерной графики для инженерных специальностей // Вестник РУДН. Серия "Инженерные исследования". 2012. № 4. С. 81–83.

2. Нестеренко М. А. Влияние синтеза дисциплин инженерной и компьютерной графики на формирование профессиональных компетенций у студентов машиностроительных направлений подготовки вузов // Труды VIII международной научно-практической конференции "Инженерные системы — 2015". М.: РУДН. 2015. С. 359–361.

3. Хейфец А. Л. Реорганизация курса начертательной геометрии как актуальная задача развития кафедр графики // Геометрия и графика. 2013. Т. 1, № 2. С. 21–23.

4. Хейфец А. Л., Логиновский А. Н., Буторина И. В., Васильева В. Н. Инженерная 3D-компьютерная графика: учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. А. Л. Хейфеца. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2015. 602 с.

5. Nesterenko M., Strashnov S. Design Automation Based on Parametrization of Second Order Curves in CAD Software // 2017 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. 2017. Vol. 2. P. 368–371.

6. Тимофеева Т. В., Казеннова Н. В., Горшкова Е. С. Использование принципа параметрического моделирования для выполнения сборочных чертежей // Успехи современной науки. 2016. Т. 2, № 10. С. 98–102.

7. Бурлов В. В., Косолапов В. В., Косолапова Е. В. Моделирование кривой и поверхностей второго порядка в системе КОМПАС-3D // Информационные технологии. 2017. № 10. Том 23. С. 742–749.

8. Савелов А. А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применения. Справочное руководство. М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1960. 294 с.

9. Математическая энциклопедия. Т. 1–5. / гл. ред. И. М. Виноградов. М.: Советская энциклопедия, 1984.

10. Иванов В. Н. Овал Кассини, лемниската и лемнискатные поверхности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 5. С. 3–9.

11. Кривошапко С. Н., Иванов В. Н. Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: Либроком. 2015. 260 с.

T. V. Timofeeva, Senior Lecturer, e-mail: timofeeva\_tv@pfur.ru,

M. A. Nesterenko, Senior Lecturer, nesterenko\_ma@pfur.ru,  
Academy of Engineering RUDN University, Moscow, Russia

## Parametrization of Curves in AutoCad by the Example of Cassini's Ovals

*A new approach to the integrated study of descriptive geometry and computer graphics in a higher educational institution on the basis of in-depth study of some topics is proposed. The technique is demonstrated in a practical example devoted to the consideration of the possibility of quick creation and investigation of the properties of Cassini ovals on the basis of creating a parametric block using the analytical formula in the system of automated design AutoCAD Autodesk. In the process of investigation, the features of fourth-order curves are analyzed as a result of the intersection of the torus by planes parallel to the axis of rotation of the torus, the dependence of the shape of the curves on the ratio of the parameters. 3D-models of torus surfaces and their sections corresponding to the conditions for constructing curves are constructed. The method of reconstructing the metric of tori along the contours of the obtained sections in the form of Cassini ovals is considered.*

**Keywords:** curve of degree 4, Cassini ovals, lemniscate of Bernoulli, section of the torus, focal points, AutoCAD Autodesk, parametrization, parametric block, geometric relationships, dimensional relationships, descriptive geometry, computer graphics

#### References

1. Timofeeva T. V., Nesterenko M. A. Ob integracii kursov komp'yuternoj i inzhenernoj grafiki dlya inzhenernyh special'nostej, *Vestnik RUDN. Seriya "Inzhenernye issledovaniya"*, 2012, no. 4, pp. 81–83 (in Russian).

2. Nesterenko M. A. Vliyaniye sinteza disciplin inzhenernoj i komp'yuternoj grafiki na formirovaniye professional'nyh kompetencij u studentov mashinostroitel'nyh napravlenij podgotovki VUZov, *Trudy VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Inzhenernye sistemy — 2015"*, Moscow, RUDN, 2015, pp. 359–361 (in Russian).

3. Hejfec A. L. Reorganizaciya kursa nachertatel'noj geometrii kak aktual'naya zadacha razvitiya kafedr grafiki, *Geometriya i grafika*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 21–23 (in Russian).

4. Hejfec A. L., Loginovskij A. N., Butorina I. V., Vasil'eva V. N. *Inzhenernaya 3D-komp'yuternaya grafika: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata*. Ed. Hejfec A. L. Moscow, Yurajt, 2015. 602 p. (in Russian).

5. Nesterenko M., Strashnov S. Design Automation Based on Parametrization of Second Order Curves in CAD Software,

*2017 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, 2017, vol. 2, pp. 368–371.

6. Timofeeva T. V., Kazennova N. V., Gorshkova E. S. Ispol'zovanie principa parametricheskogo modelirovaniya dlya vypolneniya sborochnyh chertezhej, *Uspexi sovremennoj nauki*, 2016, vol. 2, no. 10, pp. 98–102 (in Russian).

7. Burlov V. V., Kosolapov V. V., Kosolapova E. V. Modelirovaniye krivoy i poverhnostej vtorogo poriyadka v sisteme KOMPAS-3D, *Informacionnye tekhnologii*, 2017, vol. 23, no. 10, pp. 742–749 (in Russian).

8. Savelov A. A. *Ploskie krivye. Sistematika, svojstva, primeneniya. Spravochnoe rukovodstvo*, Moscow, Gos. izd. fiz.-mat. Literaturny, 1960, 294 p.

9. *Matematicheskaya ehnciklopediya*, gl. ed. I. M. Vinogradov. vol. 1–5. Moscow, Sovetskaya ehnciklopediya, 1984 (in Russian).

10. Ivanov V. N. Oval Kassini, lemniskata i lemniskatnye poverhnosti, *Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*, 2014, no. 5, pp. 3–9 (in Russian).

11. Krivoshapko S. N., Ivanov V. N. *Ehnciklopediya analiticheskikh poverhnostej*, Moscow, Librokom, 2015, 260 p. (in Russian).

УДК 004.75; 004.657

**И. П. Карпова**, канд. техн. наук, доц., e-mail: karpova\_ip@mail.ru,  
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",  
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва

### Хранение и обработка распределенных данных в группе мобильных роботов

*Рассматривается способ организации обработки распределенных данных, носителями и потребителями которых являются мобильные роботы. Введены определения неточных и противоречивых данных применительно к данным, которыми обмениваются роботы в группе. Предложен способ работы с неточными и противоречивыми данными, основанный на мультимножествах, нечетких множествах и оценке степени достоверности данных, полученных от разных роботов.*

**Ключевые слова:** групповая робототехника, статический рой, база данных, обработка неточных и противоречивых данных

#### Введение

Основная идея групповой робототехники заключается в том, что группа относительно простых роботов может решать сложные задачи за счет объединения своих усилий [1]. Под "простотой" понимается ограниченность сенсорных, вычислительных и когнитивных возможностей робота. Одним из механизмов, позволяющих роботам согласовывать свои действия, является обмен данными. Он может быть явным, когда роботы обмениваются сообщениями, и неявным, когда взаимодействие осуществляется посредством влияния на окружающую среду или наблюдением за действиями друг друга. Нас в первую очередь интересует явный обмен данными как наиболее эффективный способ коммуникации.

Каждый робот обладает некоторыми данными, которые могут включать в себя: показания датчиков робота; сведения о задачах, которые он решал или решает в настоящий момент; описание текущего состояния робота и т. п. Объединение этих данных можно рассматривать как общую (коллективную) базу данных (БД) группы роботов.

Общая постановка задачи формирования и функционирования базы данных в группе роботов приведена в работе [2]. Она включает в себя необходимость решения таких вопросов, как определение структуры БД, разработка формата хранения данных, формулирование правил организации запросов к БД и создание протокола обмена сообщениями.

Цель данной работы — рассмотреть структуру общей БД для группы роботов, логическую организацию запросов и теоретические основы обработки неточных и противоречивых данных, которые могут быть получены в ответ на запрос робота к общей БД.

Структура статьи следующая. Сначала кратко описывается понятие статического роя, приводится перечень отличий общей базы данных для группы роботов от распределенной БД в классическом представлении, приводятся сведения о работах по аналогичной тематике. Затем описывается структура хранимых данных и подход к логической организации запросов в общей базе данных группы роботов. Далее вводятся понятия неточных и противоречивых данных и предлагается подход, позволяющий на основе таких данных получить единственное значение с учетом особенностей рассматриваемой предметной области.

#### Общая база данных в статическом рое

Группу роботов будем рассматривать как статический рой [2]. Под статическим роем понимается однородная группа роботов, для которой выполняются два условия: 1) каждый робот имеет фиксированное число коммуникационных портов и может общаться с ограниченным числом своих ближайших соседей; 2) связи между членами группы — роя — могут считаться постоянными на некотором интервале времени.

Таким образом, взаимное расположение роботов определяет также и схему их соединения, которую можно рассматривать как сеть.

Общая база данных группы роботов существенно отличается от распределенной БД в классическом понимании. Она не требует глобального каталога данных, в котором хранится информация о местоположении фрагментов БД, так как на каждом узле (роботе) структура фрагмента БД одинакова. Эта структура может быть отражена в справочной таблице, которая загружается в память робота при его инициализации и фактически является каталогом данных. Таким образом, обращение к данным других узлов может происходить на основе локального каталога. Также не требуется поддержка распределенных транзакций. Процессы записи данных в общей БД носят локальный характер, так как в БД каждого робота хранятся только те данные, которые робот собрал самостоятельно, и неважно каким образом: считал с датчиков или получил в результате запроса к другому узлу и сохранил в локальной БД.

Очевидно, что нецелесообразно использовать для организации БД в группе роботов обычные СУБД, поддерживающие распределенные базы данных, так как они требуют большого объема памяти, надежных и высокоскоростных каналов связи и т. д. Но существует специализированный программный инструмент для хранения и обмена данными в распределенной БД: СУБД TinyDB, которая создана специалистами Калифорнийского университета в Беркли [3]. Она работает под управлением операционной системы TinyOS [4], предназначена для организации обмена данными в беспроводных сенсорных сетях (БСС) и адаптирована к потребностям и ограничениям БСС, в том числе по объему памяти на устройствах и по затратам энергии при передаче данных. TinyDB настраивается на датчики, которые находятся на устройстве, расположенном в узле сети. Недостатком этой системы является централизованный характер сбора и обработки данных: по запросу центрального узла TinyDB собирает с узлов данные и передает их на центральный узел. К сожалению, по условиям нашей задачи применение TinyDB невозможно, так как в однородной группе роботов никакой централизации или иерархии быть не должно, и инициатором запроса может быть любой робот.

Из работ по аналогичной тематике стоит остановиться на работе [5], в которой предлагается подход, подразумевающий наличие общей базы данных в группе роботов (агентов). Эта БД содержит прецеденты — наборы ситуаций, в которых побывал агент, выполненных в каждой ситуации действий и полученных за эти действия оценок. Ситуация характеризуется набором наблюдае-

мых объектов, представленным в виде мультимножества, а действия агента определяются стохастическими векторами. Агенты могут обмениваться этими прецедентами, усваивая чужой "жизненный опыт". Агент-новичок сравнивает ситуацию, в которой он оказался, с ситуациями из баз прецедентов, сформированных другими агентами, используя для качественного сравнения мультимножеств метрику Хэмминга. Если при сравнении выявлены противоречивые совпадения, т. е. текущее мультимножество обнаружено в базах нескольких агентов, но экстремумы стохастических векторов найденных прецедентов не совпадают, то сравнивается весь "жизненный опыт" нового агента с "жизненным опытом" тех агентов, с которыми были совпадения. Новым агентом будут использованы действия того агента, с чьей базой прецедентов было выявлено больше совпадающих или похожих ситуаций.

Но перед нами стоит иная задача — предложить структуру для хранения данных более общего вида и разработать способы работы с такими данными, возможно неточными и противоречивыми, которые могут поступить в ответ на запрос одного робота к другим.

### Логическая организация общей базы данных и запросов к ней

В самом общем виде данные, хранящиеся в БД робота, могут быть представлены в виде множества элементов следующей структуры:

*(<имя факта> <значение> <атрибуты>).*

Именем факта является название параметра (например, имя соответствующего датчика), а атрибут может содержать любую дополнительную информацию: состояние узла, временную метку и др. [2]. Атрибут представляет собой пару *(<имя атрибута>, <значение>).*

Концептуальная схема общей БД приведена на рис. 1.

Справочная таблица содержит перечень показателей, в первую очередь, датчиков, которыми оснащен робот. Каждый датчик имеет название, для него определены единица измерения, погрешность измерения и границы допустимых значений. В качестве первичного ключа справочной таблицы целесообразно использовать число-

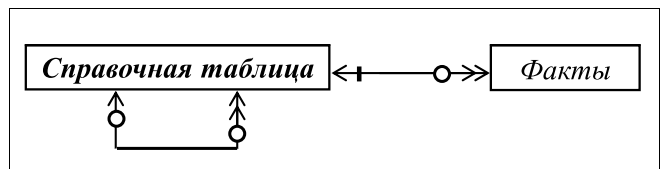


Рис. 1. Концептуальная схема общей БД

вой идентификатор, а не название, так как это сократит издержки памяти для таблицы фактов.

Структура факта и структура атрибута похожи, поэтому имеет смысл хранить общие данные об атрибутах в той же справочной таблице, а связь атрибута с показателем отражается с помощью внешнего ключа из справочной таблицы на саму себя. Это даст возможность и для атрибута (при необходимости) указать единицу измерения, погрешность измерения и границы допустимых значений.

Обсуждение возможных физических форматов хранения данных выходит за рамки данной статьи, так как конкретная реализация схемы хранения зависит от характера данных и решаемых задач. Можно сделать только одно замечание: в условиях ограничений на объем памяти, выделенной под хранение БД, память целесообразно организовать как кольцевой буфер, способ записи — стек. Это позволит начинать поиск с последних добавленных значений, которые, естественно, востребованы чаще других.

С учетом приведенных выше ограничений на организацию каналов связи в статическом роле и принципиально низкую пропускную способность этой сети в общей БД должны поддерживаться элементарные запросы. Это запросы на получение некоторого факта по его имени и, в общем случае, по атрибуту. При выполнении запросов могут возникнуть следующие ситуации: робот, запросивший данные, 1) не получил ответа; 2) получил один ответ; 3) получил несколько ответов, и полученные данные одинаковы; 4) получил несколько ответов, и полученные данные разные.

Для начала определим, что будет подразумеваться под понятиями *одинаковые* и *разные* данные. Данными в первую очередь являются значения, полученные с датчиков (сенсоров) робота, т. е. скалярные величины. Далее речь пойдет именно о них. Каждый датчик имеет погрешность измерения  $\varepsilon$ , поэтому одинаковыми будут считаться значения  $x_i$  и  $x_j$ , отличающиеся друг от друга не более чем на эту погрешность:

$$|x_i - x_j| \leq \varepsilon. \quad (1)$$

В противном случае данные считаются разными.

Упорядочим по значениям данные, полученные от  $N$  роботов. Если для упорядоченного множества значений  $X = \{x_j\}$  выполняются условия

$$\begin{aligned} |x_i - x_{i+1}| \leq \varepsilon, \quad i = \overline{1, N-1} \\ \exists i, j : |x_i - x_j| > \varepsilon \end{aligned}, \quad (2)$$

то (2) описывает отношение нестрогого равенства.

В соответствии с особенностями функционирования группы роботов каждое значение может

иметь временную отметку и привязку к координатам. Эти данные также невозможно определить с абсолютной точностью. Следовательно, и для этих показателей необходимо определить окрестности (будем также называть это погрешностью  $\varepsilon$ ), в пределах которых временные отметки и координаты считаются совпадающими. При определении этих окрестностей необходимо учитывать как физические параметры роботов, так и степень достоверности используемых ими методов определения собственных координат и времени. Эти показатели зависят от конкретных робототехнических устройств и от решаемых ими задач, поэтому они не всегда могут быть заданы заранее и должны являться параметрами запросов. Но для упрощения запросов необходимо предусмотреть некоторые значения по умолчанию, которые сохраняются в справочной таблице БД.

Теперь рассмотрим, каковы могут быть действия узла (робота), запрашивающего данные, в вышеприведенных ситуациях.

1. Робот не получил ответа за некоторый промежуток времени — тайм-аут. Значение тайм-аута зависит от времени обмена данными и от того периода, на протяжении которого связи между членами группы — роя — могут считаться постоянными. Эти значения могут быть определены только экспериментально, так как зависят от физических характеристик конкретных роботов и условий, в которых они функционируют. Но можно привести некоторые общие соображения относительно дальнейших действий робота в этой ситуации. Они зависят от того, насколько критичным для робота является отсутствие запрашиваемых данных. Например, если эти данные требуются для уточнения принимаемого решения, то он может начать выполнять принятое решение, не дожидаясь ответа, а при его получении скорректировать свои действия. Если робот не может принять решение без запрашиваемых данных, то по истечении тайм-аута робот может послать повторный запрос. Дальнейшие действия робота, например, если он и на повторный запрос не получил ответа, определяются общим алгоритмом его поведения.

2. Робот получил один ответ. Этот вариант тривиален.

3. Робот получил несколько ответов, и полученные данные одинаковы (с учетом погрешности измерения). Этот вариант также не требует действий, касающихся дополнительной обработки данных и/или обмена данными.

4. Робот получил несколько ответов, и полученные данные разные. В этом случае речь идет о работе с неточными или противоречивыми данными.

## Обработка неточных и противоречивых данных

Рассмотрим наиболее распространенную ситуацию, при которой из всех полученных роботом разных значений определенного  $r$ -го показателя он должен выбрать одно наиболее правдоподобное (достоверное) значение  $Z^r$ .

Существуют различные подходы к обработке неточных и противоречивых данных. В области БД наиболее частой причиной появления таких данных являются синтаксические или семантические ошибки (при ручном вводе, при некачественной автоматизации ввода и обработки данных и т. д.) [6]. Проблема обработки неточных данных в БД чаще всего решается путем использования усредненных значений. Последовательность обработки противоречивой информации в БД обычно такая: сначала ошибки необходимо выявить, затем либо исключить из обработки, либо исправить. Один из подходов, основанный на удалении противоречивых данных, описан в работе [7], а обзор методов по очистке данных можно найти в работе [8]. Эти подходы подразумевают знание специфики предметной области и чаще всего предполагают использование различных статистических методов, позволяющих обнаружить ошибки путем поиска отклонений в данных, затем игнорировать ошибочные значения или, если это возможно, исправить их. Для нашей задачи этот подход не даст удовлетворительных результатов, так как его точность при небольшом объеме выборки невелика, а объем выборки определяется ограничениями статического роя, в котором каждый робот может общаться только со своими ближайшими соседями.

Вместе с тем большое внимание проблеме работы с противоречивыми данными уделяется в системах поддержки принятия решений (СППР). Например, в работе [9] авторы предлагают использовать для работы с такими данными аппарат аргументации, а в работе [10] — подход на основе использования мультимножеств и систем нечеткого вывода. Но в СППР в качестве противоречивых данных выступают субъективные оценки критериев или альтернатив, которые дают эксперты или лица, принимающие решения.

При решении проблемы противоречивых данных применительно к групповой робототехнике надо учитывать следующее. Во-первых, нет возможности воспользоваться экспертным мнением для выявления более правдоподобного значения показателя. Во-вторых, метод обработки противоречивых данных должен быть вычислительно простым, так как робот работает в режиме реального времени, а длительные вычисления могут приводить к недопустимым задержкам.

Будем считать, что при записи значений показателей в БД проверяются ограничения целостности, которым должны удовлетворять эти показатели. Например, если датчик температуры имеет рабочий диапазон от  $-60$  до  $+100$  °С, то значения, выходящие за этот диапазон, будут признаны ошибочными и не будут записаны в БД. Перечень ограничений целостности должен храниться в справочной таблице на каждом узле (роботе), поэтому ограничения целостности могут быть разными на разных узлах.

### Неточные данные

Для начала рассмотрим самый простой вариант. Обозначим полученные в ответ на запрос данные как  $U^r = \{x_i^r\}$ ,  $0 < i < N$ , где  $x_i^r$  — значения  $r$ -го показателя, снятые в одно время в одном и том же месте датчиками  $N$  разных роботов. Естественно, время и место определяются также с учетом погрешностей, которые даны в справочной таблице.

Пусть для  $U^r = \{x_i^r\}$  выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} &\text{для } \forall i \exists j : |x_i^r - x_j^r| \leq \varepsilon_{\max}^r ; i = \overline{1, N}, j = \overline{1, N}, \\ &\text{и } \exists m, l : |x_m^r - x_l^r| > \varepsilon_{\max}^r ; m = \overline{1, N} ; l = \overline{1, N}, \quad (3) \\ &\varepsilon_{\max}^r = \max(\varepsilon_1^r, \dots, \varepsilon_N^r), \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_n^r$  — погрешность  $r$ -го показателя, полученного от  $n$ -го робота;  $\varepsilon_{\max}^r$  — максимальная погрешность измерения  $r$ -го показателя среди  $N$  роботов. Будем называть данные, удовлетворяющие условию (3), *неточными*, так как разброс значений превышает погрешность измерения. Все результаты измерения конкретного показателя можно представить как точки на числовой оси. Эти точки  $x_i^r$ ,  $1 \leq i \leq N$ , можно рассматривать как реализации дискретной случайной величины  $X$  и использовать методы математической статистики для определения центра группировки и разброса точек. При вычислении математического ожидания  $M[X] = \sum_{i=1}^N x_i^r p_i$  возникает вопрос с определением вероятностей  $p_i$ . Естественным образом в отсутствие дополнительных данных можно предположить, что все полученные значения равновероятны, и тогда математическое ожидание превращается в среднее значение. В подобных задачах для оценки достоверности полученного значения обычно вычисляют среднее квадратическое отклонение или используют метод доверительных интервалов. Но этот метод дает удовлетворительные по точности результаты при наличии выборки хотя

бы в 20—30 значений [11], а в наших условиях этого нельзя гарантировать ввиду специфики предметной области.

Откажемся от предположения о равновероятности полученных значений  $x_i^r$  и оценим степень достоверности данных, полученных от разных роботов. В соответствии с ГОСТ Р 51170—98 под достоверностью подразумевается свойство данных не иметь скрытых ошибок. Здесь можно провести аналогию с хорошо известным методом Дельфи, который используется для определения значения прогнозируемой величины на основе многократного опроса экспертов. Одним из этапов применения этого метода является расчет коэффициента компетентности эксперта с точки зрения всей группы:

$$w_i = \frac{Z_i - \bar{Z}}{\bar{Z}},$$

где  $\bar{Z}$  — среднее значение оценок прогнозируемой величины, а  $Z_i$  — значение прогнозируемой величины, которое дал  $i$ -й эксперт. Этот коэффициент предъявляется эксперту при повторных опросах для того, чтобы он мог изменить свое мнение относительно прогнозируемой величины, если ранее данное им значение отличается от мнения других экспертов. В некоторых модификациях метода Дельфи (например, [12]) коэффициент компетентности интерпретируется как вес эксперта, и среднее значение  $\bar{Z}$  рассчитывается как взвешенная сумма оценок всех экспертов, деленная на их число. Фактически, на основе достоверности ранее полученных данных можно рассчитать аналогичный по своей сути коэффициент и учитывать его при определении результирующего значения  $Z^r$ .

Будем учитывать опыт предыдущих обменов данными и рассчитаем *степень достоверности* данных  $W_n^r$  для  $n$ -го узла (робота), с которого поступает  $r$ -й показатель. Предлагается определять  $W_n^r$  для  $n$ -го робота как отношение числа достоверных значений  $r$ -го показателя к общему числу полученных от него значений  $r$ -го показателя:

$$W_n^r = \frac{I_n^{r+}}{I_n^r}. \quad (4)$$

Значение  $r$ -го показателя считается достоверным, если оно отличается от значения  $Z^r$  не более чем на значение погрешности измерения  $r$ -го показателя  $\varepsilon_{\max}^r$ . (Заметим, что значение  $\varepsilon_{\max}^r$  — переменная величина, которая рассчитывается заново для каждого запроса, на который пришло несколько ответов). Проблема заключается в том, что при первом получении значения  $r$ -го показателя от  $n$ -го узла степень достоверности по формуле (4) не может быть вычислена, так как  $I_n^{r+}$

еще неизвестно. Кроме того, если полученное значение не будет признано достоверным, то степень достоверности для  $n$ -го робота будет равна 0, и его показания просто не будут учитываться. Поэтому предлагается оценивать степень достоверности  $W_n^r$  следующим образом:

$$W_n^r = \frac{1 + I_n^{r+}}{1 + I_n^r}. \quad (5)$$

То есть изначально будем считать, что полученные от узла данные абсолютно достоверны ( $W_n^r = 1$ ). Окончательно значение  $Z^r$  при условии (3) можно определить так:

$$Z^r = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^r w_n^r, w_n^r}{\sum_{n=1}^N W_n^r}, \quad (6)$$

где  $w_n^r$  — коэффициент достоверности значения  $r$ -го показателя, полученного с  $n$ -го узла.

### Противоречивые данные

Более сложным является вариант, при котором элементы в упорядоченном по значениям множестве  $U^r = \{x_i^r\}$ ,  $1 \leq i \leq N$ , не образуют компактную группу точек, т. е. существуют хотя бы два соседних элемента, разница между которыми больше погрешности. Пусть для  $U^r$  выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} &\exists m, l: |x_m^r - x_l^r| > \varepsilon_{\max}^r; \quad m = \overline{1, N}; \quad l = \overline{1, N}, \\ &\text{и } \forall j: |x_m^r - x_j^r| > \varepsilon_{\max}^r \text{ или } |x_l^r - x_j^r| > \varepsilon_{\max}^r; \quad j = \overline{1, N}, \quad (7) \\ &\varepsilon_{\max}^r = \max(\varepsilon_1^r, \dots, \varepsilon_N^r). \end{aligned}$$

Тогда множество  $U^r$  можно разбить на два подмножества, причем разность значений любых двух элементов разных подмножеств превысит максимальную погрешность измерений. Будем называть данные, удовлетворяющие условию (7), *противоречивыми*. Рассмотрим вариант, при котором упорядоченное по значениям элементов множество  $U^r$  можно разбить на подмножества  $U_1^r = \{x_1, \dots, x_d\}$  и  $U_2^r = \{x_{d+1}, \dots, x_N\}$  следующим образом (рис. 2):

$$\begin{aligned} |x_1 - x_d| &\leq \varepsilon_{\max}^r; \\ |x_{d+1} - x_N| &\leq \varepsilon_{\max}^r; \\ |x_{d+1} - x_d| &> \varepsilon_{\max}^r. \end{aligned}$$

Так как среди элементов этих подмножеств могут быть равные значения, их можно рассматривать как мультимножества или множества с повторяющимися элементами [13]. Более того, мы

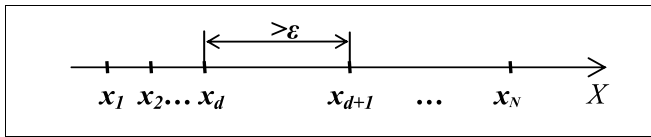


Рис. 2. Пример разбиения множества значений на два подмножества

договорились считать два значения одинаковыми, если разность между ними не превышает погрешности измерений. Если в упорядоченном подмножестве значений  $U_i^r$  разница между двумя крайними элементами не превышает погрешности, то элементы этого подмножества неразличимы. Величины  $d$  и  $(N - d)$  являются мощностью мультимножеств  $U_1^r$  и  $U_2^r$  соответственно (обозначим  $d$  как  $d_1$  и  $(N - d)$  как  $d_2$ ). При условии, что каждое из этих мультимножеств состоит из одинаковых элементов, их размерность (т. е. число различных элементов) равна 1, а  $d_1$  и  $d_2$  являются как кратностью вхождения элементов в соответствующие мультимножества ( $k(U_1^r) = d_1$ ,  $k(U_2^r) = d_2$ ), так и их высотой:  $h U_1^r = \max k(U_1^r) = d_1$ ,  $h U_2^r = \max k(U_2^r) = d_2$ . При этом возможны следующие варианты:

- 1)  $d_1 = 1$ ;  $d_2 = 1$ ;
- 2)  $d_1 > 1$ ;  $d_2 = 1$  или  $d_2 > 1$ ;  $d_1 = 1$ ;
- 3)  $d_1 > 1$ ;  $d_2 > 1$ .

В случае варианта 1 рациональным является выбор того значения, достоверность которого выше. Тривиальной является ситуация 2, когда мощность одного подмножества равна 1, а мощность другого — больше 1. Например, если  $d_1 = 1$  и  $d_2 > 1$ , то можно считать, что противоречивое значение  $x_1$  возникло вследствие ошибки измерения или ошибки передачи данных, и игнорировать это значение.

Если мощность обоих мультимножеств больше 1, то нельзя просто выбрать в качестве  $Z^r$  значение из того подмножества, чья мощность (высота) больше. Необходимо учитывать наличие противоречивых данных, поэтому предлагается ввести дополнительную характеристику  $W_{U_i}^r$  — общую степень достоверности подмножества  $U_i^r$ . Рассмотрим степень достоверности  $W_n^r$  (5) как функцию принадлежности нечеткого множества. Если считать каждый из элементов подмножества свидетельством в пользу того, что данный параметр принадлежит этому подмножеству, то общую степень достоверности данных подмножества  $U_i^r$  можно рассчитать, например, как алгебраическую сумму  $W_n^r$ . Для случая, когда подмножество  $U_i^r$  состоит из двух значений, алгебраическая сумма вычисляется так:

$$W_{U_i}^r = W_1^r + W_2^r - W_1^r \cdot W_2^r. \quad (8)$$

Далее  $Z^r$  будет рассчитываться по формуле (6) на основе данных того мультимножества, для которого величина  $W_{U_i}^r$  больше.

Аналогичным образом проводят расчеты в случае, когда число подмножеств больше двух.

## Неточные и противоречивые данные

Противоречивые данные также могут быть неточными, если разница между двумя крайними значениями подмножества  $U_i^r$  превышает максимально допустимую погрешность (условие (3)). Высота такого подмножества будет меньше его мощности, так как не все элементы подмножества являются одинаковыми в соответствии с (1). Здесь для выбора подмножества также может быть рассчитана общая степень достоверности (8). Если же оба подмножества имеют одинаковую общую степень достоверности, то в качестве основного целесообразно брать подмножество с большей высотой, а при одинаковых высотах — с большей мощностью.

В том случае, если полученные по запросу данные таковы, что оба подмножества имеют одинаковые общую степень достоверности, мощность и высоту, то возможны как минимум два варианта действий:

1) послать повторный запрос для уточнения данных;

2) отказаться от возможности получить единственное значение вместо множества и применить, например, метод недоопределенных вычислений.

Об особенностях применения метода недоопределенных вычислений в робототехнике более подробно рассказано в работе [14].

Аналогичные рассуждения могут быть применены к ситуации, когда данные разбиваются более чем на два подмножества.

Таким образом, в работе были предложены подходы к решению проблемы обработки неточных и противоречивых данных в группе мобильных роботов с помощью оценки степени достоверности данных, которая основана на учете ранее полученных значений. При этом степень достоверности (8) может выступать в качестве атрибута значения  $Z^r$  и в дальнейшем использоваться роботом при принятии решений.

## Заключение

Важная особенность предложенного подхода к работе с неточными и противоречивыми данными заключается в том, что он является вычислительно простым и не требует большого объема

памяти у робота для хранения вспомогательной информации.

Недостатком этого подхода является возможная несогласованность сведений о достоверности данных, полученных от одних и тех же источников разными роботами. Это связано с тем, что степень достоверности вычисляется локально и на основе тех данных, которые запросил и получил конкретный узел (робот). Никакой процедуры согласования не предусматривается, так как это сильно увеличит трафик и, кроме того, это сложно выполнить технически. Группа роботов время от времени может распадаться на несвязанные подгруппы, между которыми прерывается обмен данными; в этой ситуации согласование невозможно в принципе.

В ходе дальнейших исследований планируется разработать необходимое алгоритмическое и программное обеспечение и провести эксперименты на реальных робототехнических устройствах.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 16-29-04412 (метод работы с неточными и противоречивыми данными) и РФФИ 16-01-00018 (выявление отличительных характеристик общей базы данных для группы роботов и описание структуры хранимых данных).*

#### Список литературы

1. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
2. **Карпов В. Э.** Управление в статических рядах. Постановка задачи // "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". Сб. научных

трудов VII-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 20–22 мая 2013). В 3 томах. М.: Физматлит, 2013. Т. 2. С. 730–739.

3. **Madden S., Hellerstein J., Hong W.** TinyDB: In-Network Query Processing in TinyOS: Version 0.4. 2003. 46 p.

4. **TinyOS Documentation Wiki** [Electronic resource]. URL: [http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TinyOS\\_Documentation\\_Wiki](http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TinyOS_Documentation_Wiki).

5. **Воробьев В. В., Паршикова Е. А.** Применение мультимножеств для оценки ситуации мобильным агентом // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 6. С. 421–426.

6. **Singh R., Singh K.** A Descriptive Classification of Causes of Data Quality Problems in Data Warehousing // IJCSI Int. J. Comput. Sci. Issues. 2010. Vol. 7, N. 2. P. 41–50.

7. **Горбатков С. А., Белолипец И. И., Мурзина Е. А.** Удаление противоречивых наблюдений как процедура предрегуляризации нейросетевой модели налогового контроля // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 5. С. 110–114.

8. **Rahm E., Do H.** Data cleaning: Problems and current approaches // IEEE Data Eng. Bull. 2000. Vol. 23, N 4. P. 3–13.

9. **Вагин В. Н., Фомина М. В.** Аргументация в индуктивном формировании понятий // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. Вып. 2, № 5. С. 34–39.

10. **Гусева М. В., Демидова Л. А.** Генерирование решающих правил классификации инвестиционных проектов на основе систем нечеткого вывода и мультимножеств // Системы управления и информационные технологии. 2006. № 4. С. 46–53.

11. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: учеб. для вузов. 6-е изд. стер. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

12. **Беляевский И. К.** Маркетинговое исследование: информация, анализ, прогноз. М.: Финансы и статистика, 2014. 320 с.

13. **Петровский А. Б.** Пространства множеств и мультимножеств. М.: Едиториал УРСС, 2003. 248 с.

14. **Карпов В. Э.** О некоторых особенностях применения недоопределенных моделей в робототехнике // Международная научно-практическая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте" (28–30 мая 2009) Сб. научных трудов. Т. 1. М.: Физматлит, 2009. С. 520–532.

**I. P. Karpova**, Associate Professor, [karpova\\_ip@mail.ru](mailto:karpova_ip@mail.ru),  
National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia,  
National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## Distributed Data Storage and Processing for Mobile Robotic Groups

*This paper discusses a problem of distributed data processing in mobile robot's group. The robot's group is typified as a static swarm. Static swarm is a model, which is characterized by the absence of a control center and is represented by the network with fixed topology at some time interval which consists of locally interacting agents. The main features that distinguish the robot's group general database from the classic distributed database are described. It is shown that the database does not require the global data dictionary storing information about the location of the database fragments. The data structure on each node is the same and can be described in the reference table. This table is loaded into robot's memory when robot is initialized and, in fact, is the data dictionary. This database does not require distributed transactions, because data is written in the general database locally. The approach of logical queries organization in general database is offered. Definitions of imprecise and inconsistent data conformably to data which robots in the group are exchanging with are given. The approach of processing imprecise and inconsistent data which come to robot is proposed. This approach is based on elements of multisets theory, fuzzy sets theory and on evaluation of data reliability degree. The reliability degree is based on the experience of the previous data exchanges between robots. An important feature of the proposed method of imprecise and inconsistent data processing is that it is computationally simple and does not require much memory to store auxiliary information.*

**Keywords:** group robotics, static swarm, database, processing of imprecise and inconsistent data



## References

1. Kaljaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov*, (Models and algorithms of collective control in robots groups), Moscow, Fizmatlit, 2009. 280 p. (in Russian).
2. Karpov V. E. Upravlenie v staticheskikh rojakh. Postanovka zadachi (Control in static swarms. Problem statement), *Integrirovannye modeli i mjagkie vychislenija v iskusstvennom intellekte. Sb. nauchnyh trudov VII-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* (Kolomna, 20.05–22.05.2013), In 3 vol. Moscow, Fizmatlit, 2013, vol. 2, pp. 730–739 (in Russian).
3. Madden S., Hellerstein J., Hong W. *TinyDB: In-Network Query Processing in TinyOS: Version 0.4*. 2003. 46 p.
4. TinyOS Documentation Wiki, available at: [http://tinynos.stanford.edu/tinynos-wiki/index.php/TinyOS\\_Documentation\\_Wiki](http://tinynos.stanford.edu/tinynos-wiki/index.php/TinyOS_Documentation_Wiki).
5. Vorob'ev V. V., Parshikova E. A. Primenenie mul'timnozhestv dlja ocenki situacii mobil'nym agentom (Application of multisets for assessment of the situation by the mobile agent), *Informacionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 6, pp. 421–426 (in Russian).
6. Singh R., Singh K. A Descriptive Classification of Causes of Data Quality Problems in Data Warehousing, *IJCSI Int. J. Comput. Sci. Issues.*, 2010, vol. 7, no. 2, pp. 41–50.
7. Gorbatkov S. A., Belolipcev I. I., Murzina E. A. Uдалenie protivorechivyh nabljudenij kak procedura predreguljarizacii nejrosetevoj modeli nalogovogo kontrolja (Removal of inconsistent observations as the procedure of prerequisite neural network model of tax control), *Vestnik UGATU*, 2013, vol. 17, no. 5, pp. 110–114 (in Russian).
8. Rahm E., Do H. Data cleaning: Problems and current approaches, *IEEE Data Eng. Bull.*, 2000, vol. 23, no. 4, pp. 3–13.
9. Vagin V. N., Fomina M. V. Argumentacija v induktivnom formirovanii ponjatij (The argument in the inductive formation of concepts), *Obrazovatel'nye resursy i tehnologii*, 2014, vol. 2, no. 5, pp. 34–39 (in Russian).
10. Guseva M. V., Demidova L. A. Generirovanie reshajushhijh pravil klassifikacii investicionnyh proektov na osnove sistem nechetkogo vyvoda i mul'timnozhestv (Decision rules generating for the investment projects classification based on fuzzy inference systems and multisets), *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*, 2006, no. 4, pp. 46–53 (in Russian).
11. Ventcel' E. S. *Teorija verojatnostej* (Probability theory): Ucheb. dlja vuzov. 6-e izd. ster., Moscow, Vyssh. shk., 1999. 576 p. (in Russian).
12. Beljaevskij I. K. *Marketingovoe issledovanie: informacija, analiz, prognoz* (Marketing research: information, analysis, forecast). Moscow, Finansy i statistika, 2014, 320 p. (in Russian).
13. Petrovskij A. B. *Prostranstva mnozhestv i mul'timnozhestv* (Spaces of sets and multisets), Moscow, Editorial URSS, 2003. 248 p. (in Russian).
14. Karpov V. E. O nekotoryh osobennostjakh primenjenija nedoopredelennyh modelej v robototekhnike (Some features of the application of subdefinite models in robotics), *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija "Integrirovannye modeli i mjagkie vychislenija v iskusstvennom intellekte"* (28.05–30.05.2009), sb. nauchnyh trudov, vol. 1, Moscow, Fizmatlit, 2009, pp. 520–532 (in Russian).

УДК 004.94, 620.91

Д. Н. Кобзаренко, д-р техн. наук, зав. лаб., e-mail: kobzarenko\_dm@mail.ru,

А. М. Камилова, вед. специалист, e-mail: anna702@mail.ru,

Н. Ш. Газанова, вед. специалист, e-mail: dyuzuza@gmail.com,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем геотермии  
Дагестанского научного центра Российской академии наук, г. Махачкала, Россия,

А. М. Дадашев, начальник, e-mail: daggidromet@mail.ru,

Дагестанский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды —  
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения "Северо-Кавказское управление  
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды", г. Махачкала, Россия

## Применение непрерывного вейвлет-преобразования в изучении временных рядов ветромониторинга на примере Дагестана

Рассмотрены результаты частотно-временного анализа временных рядов — скоростей ветра с помощью информационных технологий и вейвлет-преобразования вейвлетом Morlet.

Идея пространственно-временного анализа данных ветромониторинга состоит в том, чтобы показать наличие или отсутствие закономерностей во временных рядах — скоростях и направлениях ветра. При этом анализ выполняется как по пространству (сопоставление данных ветромониторинга за один временной период), так и по времени (несколько лет).

Для выполнения анализа получены достоверные данные ветромониторинга, выполняемого в Дагестане метеорологическими станциями. Данные охватывают временной период 2011–2015 гг. и получены с метеостанций: "Ахты", "Дербент", "Махачкала" и "Кочубей". На основе исходных данных подготовлены по четыре временных ряда для каждой метеостанции. Каждый временной ряд охватывает два календарных года (2011–2012, 2012–2013, 2013–2014, 2014–2015). Данные представлены частотой 8 измерений в сутки.

**Ключевые слова:** скорость ветра, ветроэнергетика, вейвлет-преобразование, частотно-временной анализ

## Введение

Исследования по применению вейвлет-преобразования для анализа данных метеорологи-

ческих временных рядов известны как в России [1, 2], так и за рубежом [3]. Причем в работах [1, 2] приведены идеи о применении вейвлет-преобразования для восстановления промежуточных

значений сигнала и прогнозирования с помощью вейвлет-преобразования.

Первый этап анализа состоит в изучении визуальной информации картин вейвлет-преобразования, которые могут дать определенное представление о динамике частотных характеристик ряда во времени. Этому посвящена текущая работа. Далее предполагается изучить значения вейвлет-коэффициентов в целях выявления основных гармоник, составляющих временной ряд в разные временные периоды. Данные результаты позволят разработать модели годового хода ветра для различных районов и выполнить оценку ресурсного потенциала на ближайшие годы.

Данная работа начата в 2014 г. и за это время проведены исследования вейвлет-преобразования функциями *Mexican hat* [4] и *Morlet* [5] для временных рядов скоростей ветра, полученных на основе метеонаблюдений станций "Ахты", "Дербент", "Кочубей" и "Махачкала" в 2010–2011 гг. Так как информация бралась из открытых источников сервера "Погода России" и содержала некоторые пропуски в измерениях, была проблема гарантии

ее достоверности. К этому стоит добавить, что временной период в два календарных года недостаточный, чтобы делать обобщения и выводы о каких-либо временных закономерностях.

Благодаря научному сотрудничеству с Дагестанским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды нами получены достоверные данные ветромониторинга в Дагестане за период 2011–2015 гг. со станций "Ахты", "Дербент", "Махачкала" и "Кочубей". Географически наблюдения данных станций охватывают северный равнинный Дагестан (ст. "Кочубей"), приморский центральный Дагестан (ст. "Махачкала"), приморский южный Дагестан (ст. "Дербент") и южный горный Дагестан (ст. "Ахты"). Таким образом, имеются достаточные для полноценных исследований период наблюдения и пространственный территориальный охват (рис. 1).

Для предварительной обработки исходных данных было использовано программное обеспечение, разработанное ранее, — система управления базой данных ветромониторинга [6]. Для выполнения вейвлет-преобразования и визуализации его результатов использовано программное обеспечение (с некоторыми доработками), написанное еще в 1999 г. [7], так как оно является для нас более удобным вариантом по сравнению с тем же MathCAD.

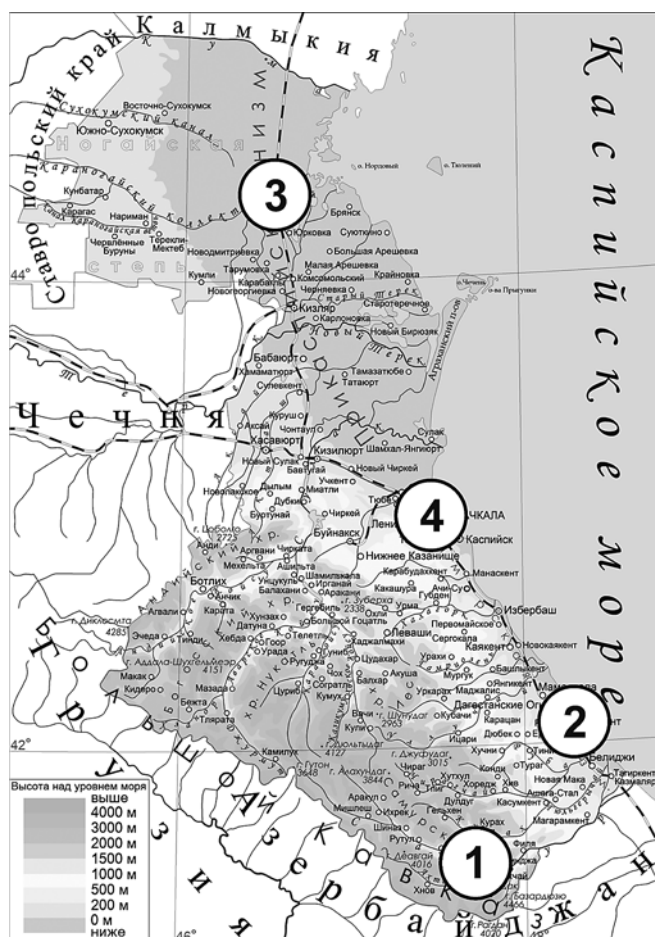


Рис. 1. Географическое расположение метеостанций:

1 — "Ахты", 2 — "Дербент", 3 — "Кочубей", 4 — "Махачкала"

## 1. О непрерывном вейвлет-преобразовании функцией *Morlet*

Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала состоит в его разложении по базису, построенному из специальной производящей функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов:

$$W(x, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi \left[ \frac{t-x}{a} \right] dt, \quad (1)$$

где  $W(x, a)$  — коэффициенты вейвлет-преобразования;  $f(t)$  — исследуемая функция;  $t$  — время;  $\psi$  — вейвлет;  $a$  — значение масштаба;  $x$  — параметр сдвига по временной оси.

Для анализа временного ряда взята вейвлет-функция *Morlet*. *Morlet*-вейвлет — комплексный, он хорошо приспособлен для анализа сигналов, для которых важен принцип причинности: этот вейвлет сохраняет направление времени и не создает паразитной интерференции между прошлым и будущим.

Информацию из массива вейвлет-преобразования  $W(x, a)$  представим в виде вейвлет-картины коэффициентов, где каждую точку можно показывать в определенном цвете, в зависимости

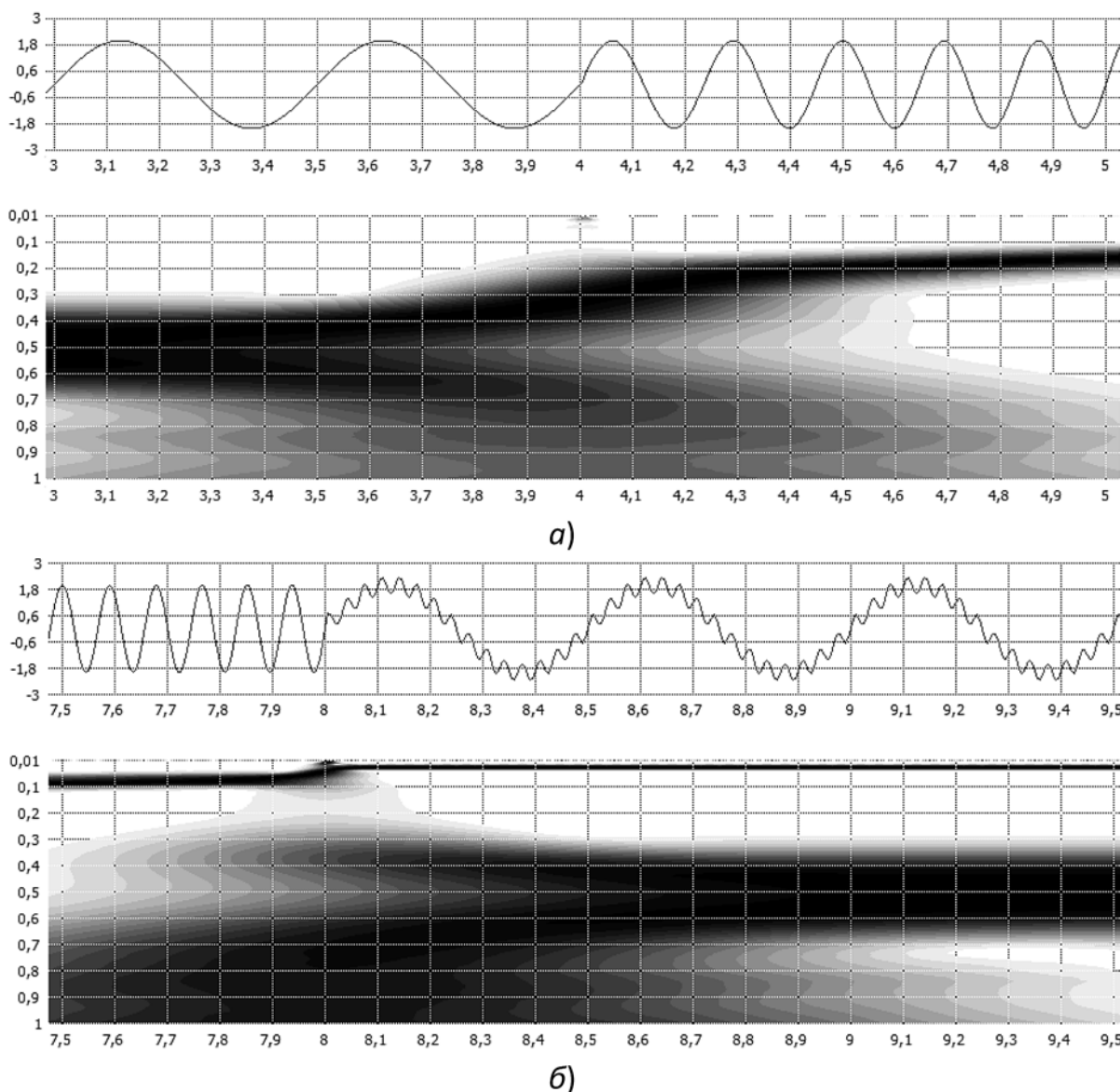


Рис. 2. Фрагменты картины коэффициентов модуля вейвлет-преобразования функцией *Morlet* для модельного сигнала

от значения  $W(x, a)$ . Картина коэффициентов демонстрирует, что процесс составляют компоненты разных масштабов: экстремумы  $Wf(x, a)$  наблюдаются на разных масштабах, интенсивность их меняется и со временем, и с масштабом.

Лучше всего понять, какую информацию можно получить с помощью вейвлет-преобразования на базе функции *Morlet* позволяет картина вейвлет-коэффициентов модуля для модельного сигнала, представленная на рис. 2. Для фрагмента сигнала с постоянным периодом 0,5 с (рис. 2, а) на картине вейвлет-коэффициентов можно наблюдать сплошную черную полосу, соответствующую масштабу 0,5 (период колебания) по горизонтали. Для следующего участка сигнала, начиная с временного отсчета 4, период колебаний плавно уменьшается, что отражается на вейвлет-кар-

тине — черная полоса также плавно устремляется к нулевому значению. Начиная с временного отсчета 8, модельный сигнал состоит из суммы двух гармоник (рис. 2, б) с постоянными периодами. На вейвлет-картине это проявляется двумя черными полосами, соответствующими периодам этих гармоник.

Таким образом, вейвлет-преобразование временного ряда с помощью вейвлета *Morlet* и картина коэффициентов модуля вейвлет-преобразования дают возможность оценить его частотные свойства для различных временных периодов. Относительно данных ветромониторинга локализация данных по времени дает возможность проанализировать изменчивость характеристик ветра по декадам, месяцам, сезонам, полугодиям — на временных масштабах порядка 1—50 дней.

## 2. Обработка информации и анализ

На основе исходных данных были подготовлены по четыре временных ряда для каждой метеостанции. Каждый временной ряд охватывает два календарных года (2011—2012, 2012—2013, 2013—2014, 2014—2015) и основывается на частоте восемь измерений в сутки.

Для всех рядов выполнено вейвлет-преобразование функцией *Morlet* в диапазоне периодов от 1 до 51 дня и построены картины коэффициентов модуля. Картины вейвлет-преобразования доработаны таким образом, что двухлетний временной период усекается до 1 года по датам 01 июля — 30 июня, например 01.07.2011—30.06.2012. Кроме того, во временную шкалу введены обозначения месяцев. На основе 16 подготовленных картин коэффициентов модуля выполнена компоновка окончательных восьми рисунков для анализа.

**Пространственный анализ.** Для пространственного анализа сформированы соответствующие компоновки картин вейвлет-преобразования. В компоновках представлены картины от

четырёх станций для одного временного периода (рис. 3—6). Черные пятна на картинах показывают наличие во временном ряде периодичностей определенного (по шкале) масштаба.

Анализ всех четырех компоновок показывает, что периодичности на крупных масштабах, которые соответствуют циклическим проявлениям повышения/снижения ветровой активности, в основном присутствуют в зимний и весенний периоды. Реже крупномасштабные периодичности имеются в осенний период (в основном поздней осенью). Относительно светлая картина (рис. 3, два нижних сигнала) говорит о том, что в течение года отсутствуют существенные колебания в скорости ветра на длительных периодах.

Выполним сопоставление картин вейвлет-преобразования от разных станций с точки зрения выявления пространственных закономерностей. Это приводит к следующим выводам.

1. Картины, полученные на основе данных станции "Ахты", по всем четырем временным периодам имеют существенные отличия от картин, полученных на основе данных других станций.

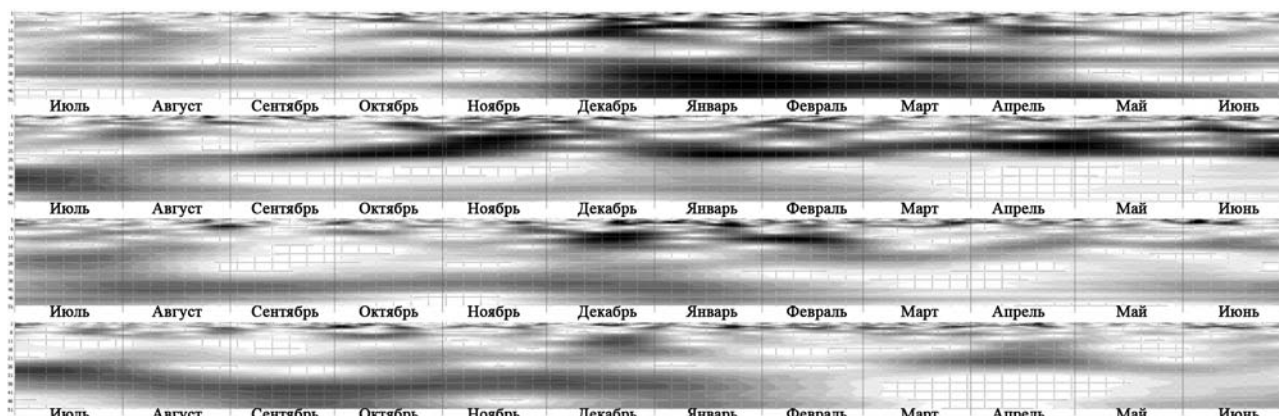


Рис. 3. Компоновка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станциям (сверху вниз) "Ахты", "Дербент", "Кочубей", "Махачкала" за временной период 01.07.2011—30.06.2012

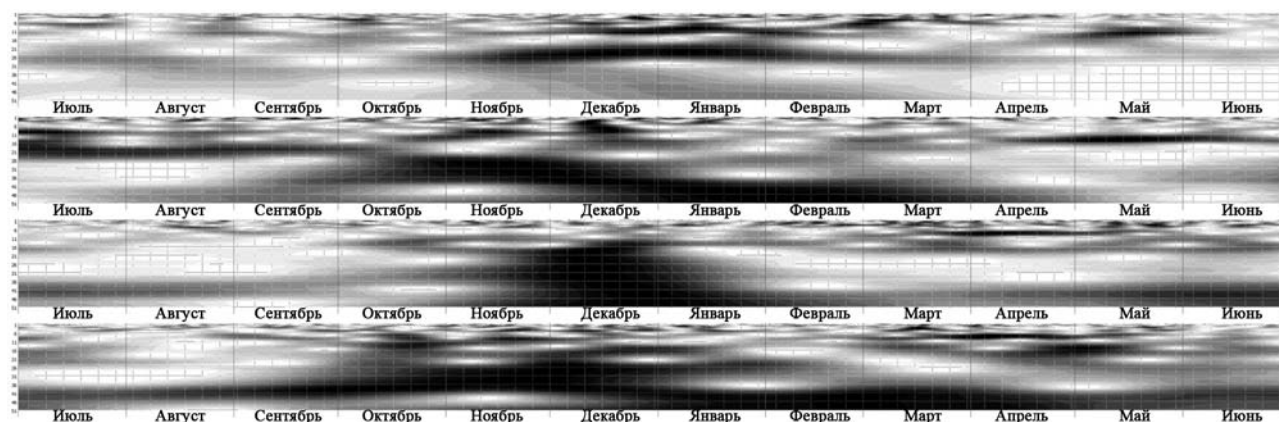


Рис. 4. Компоновка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станциям (сверху вниз) "Ахты", "Дербент", "Кочубей", "Махачкала" за временной период 01.07.2012—30.06.2013

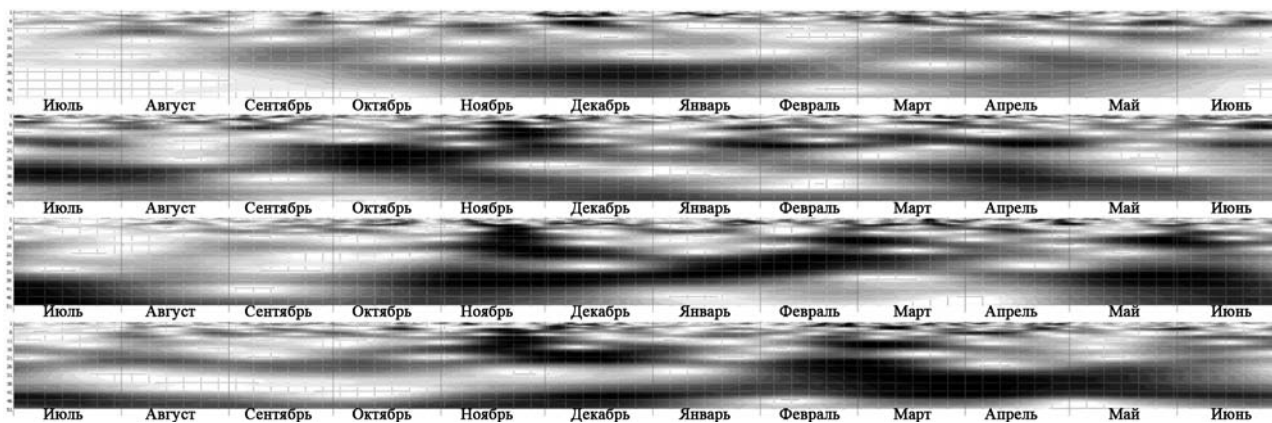


Рис. 5. Компоновка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станциям (сверху вниз) "Ахты", "Дербент", "Кочубей", "Махачкала" за временной период 01.07.2013—30.06.2014

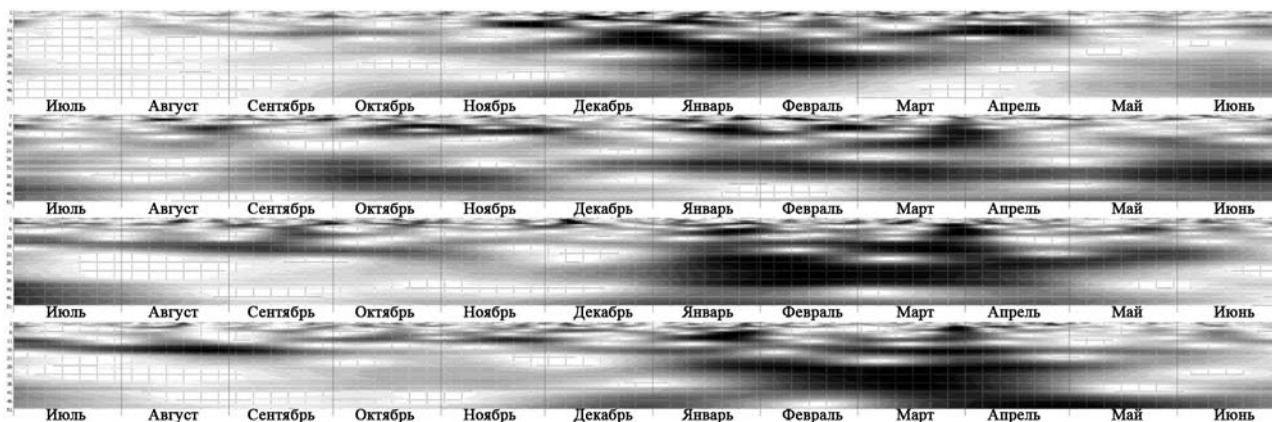


Рис. 6. Компоновка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станциям (сверху вниз) "Ахты", "Дербент", "Кочубей", "Махачкала" за временной период 01.07.2014—30.06.2015

Это имеет объяснения — горный ландшафт и удаленность от Каспийского моря дают отличающийся ветровой режим.

2. Картины, полученные на основе данных станции "Дербент", имеет смысл сопоставлять с картинами, полученными на основе данных станции "Махачкала". Можно наблюдать, что в двух временных периодах 2012—2013 (см. рис. 4) и 2014—2015 (см. рис. 6) имеются схожие элементы на картинах вейвлет-преобразования, относящихся к станциям "Дербент" и "Махачкала". Вместе с тем видно, что в большей степени ветровой режим района Дербента отличается от ветрового режима района Махачкалы, несмотря на то что обе станции находятся на берегу Каспийского моря.

3. При сопоставлении картин вейвлет-преобразования на всех компоновках (см. рис. 3—6) видно, что картины, полученные на основе данных станций "Кочубей" и "Махачкала" идентичны, за некоторыми исключениями. Это говорит о том, что частотно-временную изменчивость ветра в Северном Дагестане до предгорий можно считать одинаковой.

**Временной анализ.** Для данного анализа возьмем полученные картины вейвлет-преобразования на основе данных по каждой станции в различные временные периоды. Это позволяет сделать выводы о том, как меняются периодичности изменения скорости ветра на одной и той же территории от сезона к сезону.

Анализ картин вейвлет-преобразования по данным четырех сезонов станции "Ахты" (рис. 7) показывает, что в период с июля по ноябрь практически отсутствуют частотные всплески (темные пятна) по всей масштабной шкале. Колебания во временном ряду на средних периодах (20—30 дней) начинаются в ноябре, продолжают в основном всю зиму и заканчиваются в весенний период. Это говорит о том, что на данной территории ярко выражено отсутствие периодичности изменчивости скорости ветра в осенний и летний периоды.

Анализ картин вейвлет-преобразования по данным четырех сезонов станции "Дербент" (рис. 8) показывает, что в этом регионе изменчивость в скорости ветра на средних и крупных

масштабах наблюдается практически в течение всего календарного сезона, а не только в зимний и весенний периоды, как в предыдущем случае. Получается, что побережье Каспия, с одной стороны, и горный ландшафт, с другой стороны, обеспечивают подобную динамику изменчивости ветровой активности.

Анализ картин вейвлет-преобразования по данным четырех сезонов станции "Кочубей"

(рис. 9) показывает следующее. В течение сезона может случиться относительное затишье с отсутствием во временном ряде колебаний на средних и крупных масштабах (сезон 2011—2012). Но в основном яркое проявление крупномасштабных периодичностей начинается в ноябре (сезоны 2012—2014), либо позднее (сезон 2014—2015) и может продолжаться 2—4 месяца. Также видно, что в сезоне 2013—2014 проявление

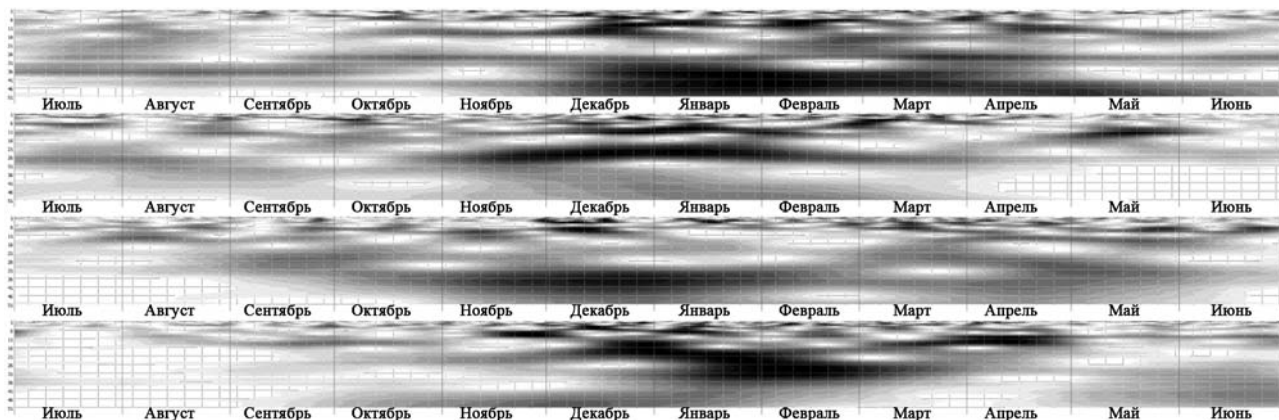


Рис. 7. Компонка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станции "Ахты" для временных периодов (сверху вниз): 2011—2012, 2012—2013, 2013—2014, 2014—2015

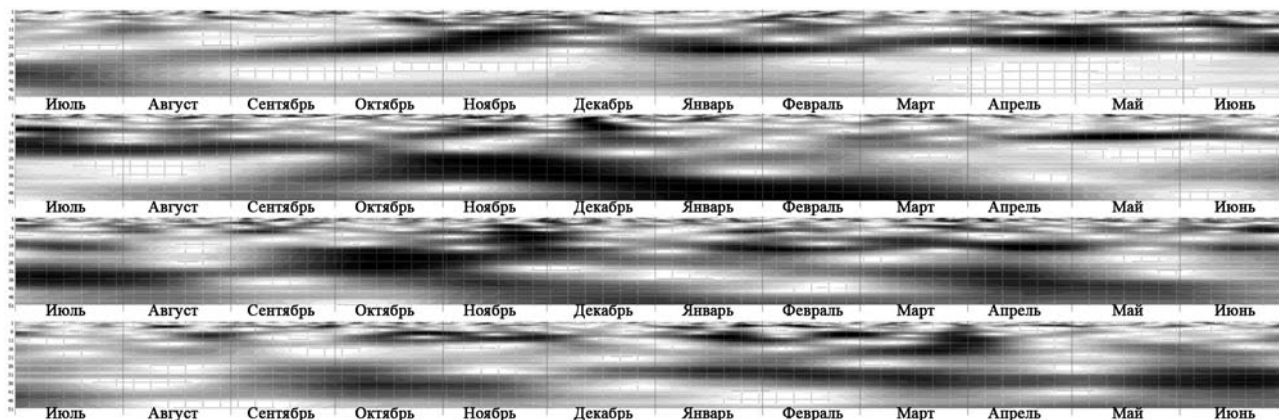


Рис. 8. Компонка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станции "Дербент" для временных периодов (сверху вниз): 2011—2012, 2012—2013, 2013—2014, 2014—2015

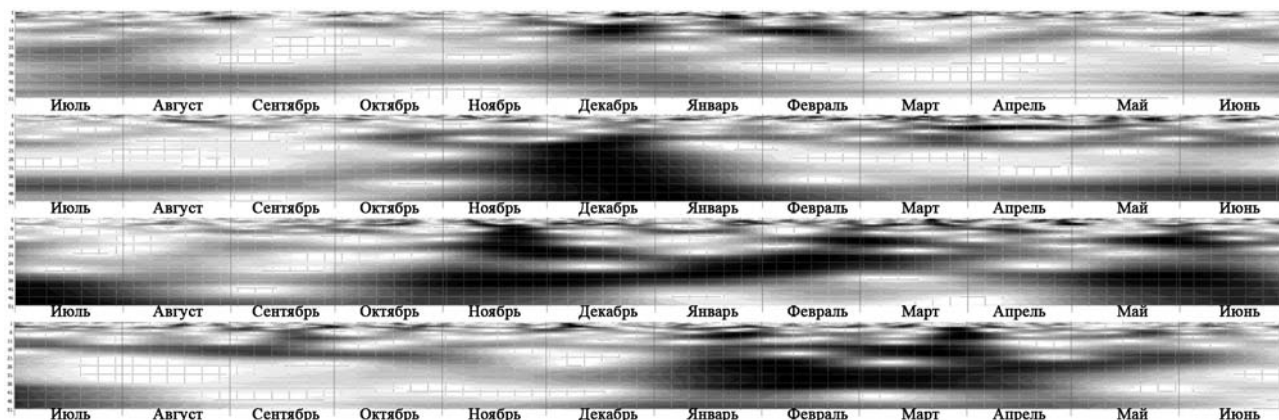


Рис. 9. Компонка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станции "Кочубей" для временных периодов (сверху вниз): 2011—2012, 2012—2013, 2013—2014, 2014—2015

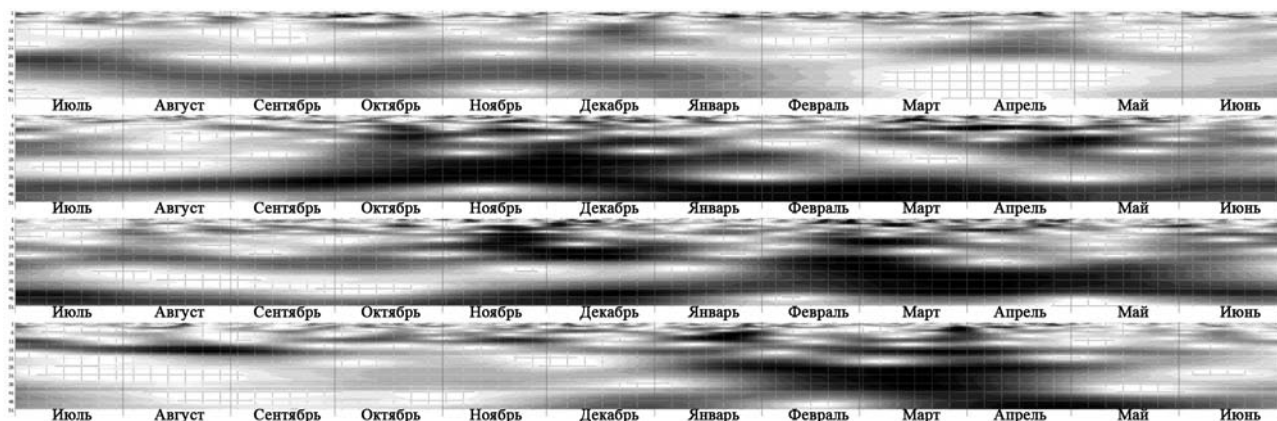


Рис. 10. Компоновка картин вейвлет-преобразования временных рядов — скоростей ветра по станции "Махачкала" для временных периодов (сверху вниз): 2011—2012, 2012—2013, 2013—2014, 2014—2015

ние крупномасштабной периодичности зафиксировано в мае — июне.

Анализ картин вейвлет-преобразования по данным четырех сезонов станции "Махачкала" (рис. 10) показывает, что на частотную характеристику временного ряда, так же, как и в случае с временным рядом на основе данных станции "Дербент", оказывает влияние Каспийское море. Однако в отличие от временного ряда станции "Дербент", во временном ряде станции "Махачкала" присутствуют ярко выраженные периодичности на средних и крупных масштабах в осенний, зимний и весенний периоды.

### Заключение

Частотный анализ временных рядов — скоростей ветра на основе вейвлет-преобразования с помощью вейвлета *Morlet* и представление результатов в виде картин модуля, в которых цветовыми оттенками показано значение вейвлет-функции на определенных масштабах, позволяет сделать предварительные выводы о пространственных и временных закономерностях динамики скорости ветра. На примере частотно-временного анализа данных от четырех метеостанций Дагестана показано, что существуют как пространственные, так и временные закономерности во временных рядах — скоростях ветра.

Более детальное изучение временных рядов — скоростей ветра с помощью дополнительных функций программного обеспечения на предмет выявления конкретных значений периодичности во временном ряду по результатам вейвлет-преобразования по сезонам позволит разработать модели, описывающие ветровой режим региона. С помощью данных моделей можно будет рассчитывать и классифицировать ветроэнергетические ресурсы региона в целях выдачи рекомендаций по их освоению.

### Список литературы

1. Золотов С. Ю., Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Логинов С. В. Прогнозирование климатических характеристик с помощью метода вейвлет-преобразования // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 4. С. 349—351.
2. Золотов С. Ю., Ипполитов И. И., Логинов С. В. Прогнозные оценки изменения температуры приземного воздуха с использованием метода вейвлет-преобразования // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 5. С. 471—475.
3. Chellali F., Khellaf A., Belouchrani A. Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar, Algeria // Renewable Energy. 2010, Vol. 35. P. 1214—1219.
4. Кобзаренко Д. Н., Камилова А. М., Газанова Н. Ш. К возможностям применения вейвлет-функции Mexican Hat в частотно-временном анализе временных рядов — скоростей ветра // Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. Материалы III Международной конференции. 6—8 октября 2014 г. / Под ред. д. т. н. А. Б. Алхасова. Махачкала: АЛЕФ, 2014. С. 288—294.
5. Кобзаренко Д. Н., Камилова А. М., Газанова Н. Ш. Изучение вейвлет-преобразования функцией *Morlet* временных рядов — скоростей ветра для решения задачи пространственно-временного моделирования распределения ветроэнергетических ресурсов // Материалы IV Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы" и VIII Школы молодых ученых "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов" имени Э. Э. Шпильрайна. Том 2. 21—24 сентября 2015 г. / Под ред. д. т. н. А. Б. Алхасова — Махачкала: АЛЕФ, 2015. С. 274—280.
6. Кобзаренко Д. Н. К созданию средств автоматизации выборки данных ветромониторинга с сервера "Погода России" // Программная инженерия. 2014. № 2. С. 27—32.
7. Гаджиев А. А., Гаджиев Р. А., Кобзаренко Д. Н. Вейвлет-анализ колебаний уровня Каспийского моря и влияния на сейсмический режим Дагестанского клина // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2000. № 3. С. 230—236.

**D. N. Kobzarenko**, D.Sc., Head of laboratory, kobzarenko\_dm@mail.ru,  
**A. M. Kamilova**, Leading Specialist, anna702@mail.ru, **N. Sh. Gazanova**, Leading Specialist, anna702@mail.ru,  
Federal State Budgetary Institution of Science "Institute for Geothermal Research of Dagestan Scientific  
Center of Russian Academy of Sciences", Makhachkala, Russia,  
**A. M. Dadashev**, Chief, daggidromet@mail.ru,  
Dagestan Center of Environment Hydrometeorology and Monitoring —  
Branch of Federal State Budgetary Institution "Northern-Caucasus Control  
for Environment Hydrometeorology and Monitoring ", Makhachkala, Russia

## Application of Continuous Wavelet-Transformation in the Study of Time Series of Wind Monitoring on the Example of Dagestan

*The paper considers the results of time-frequency analysis of time series — wind speeds with the help of information technologies and wavelet transform by the Morlet wavelet.*

*The idea of spatial and temporal analysis of wind monitoring data is to show the presence or absence of patterns in time series — wind speeds and wind directions. At the same time, the analysis is performed both in space (comparing wind monitoring data for one time period) and in time (several years).*

*To perform the analysis, reliable data of wind monitoring, carried out in Dagestan by meteorological stations, were obtained. The data cover the time period of 2011–2015 and received from meteorological stations: "Akhty", "Derbent", "Makhachkala" and "Kochubei". Based on the initial data, four time series for each meteorological station have been prepared. Each time series covers two calendar years (2011–2012, 2012–2013, 2013–2014, 2014–2015). Data are represented by a frequency of 8 measurements per day.*

*Spatial analysis of the obtained wavelet transform patterns showed that the periods on a large scale that correspond to cyclical manifestations of increasing (or decreasing) wind activity is mainly present in the winter and spring times. More rarely, large-scale periods exist in the autumn time (mainly in late autumn).*

*The time analysis of the obtained wavelet transforms showed the following: 1) in the southern mountainous Dagestan area (the area of the settlement Akhty), the absence of periodic variability of wind speed in the autumn and summer times is strongly pronounced; 2) on the territory of southern coastal Dagestan (the district of the settlement Derbent) variability of wind speed on medium and large scale is observed practically during the whole calendar season; 3) on the territory of the central seaside Dagestan (the district of the settlement of Makhachkala) there are pronounced periodicity on medium and large scale in the autumn, winter and spring times; 4) in the territory of the northern plain Dagestan (the district of the settlement Kochubey) during the season there can be a relative calm with no fluctuations on medium and large scale, but the brightest manifestation of large-scale periodicity begins in November or later and can last 2–4 months, and in one of the seasons the manifestation of large-scale period is observed in May–June.*

**Keywords:** wind speed, wind energy, wavelet transform, frequency-time analysis

### References

1. **Zolotov S. Yu., Ippolitov I. I., Kabanov M. V., Loginov S. V.** Prognozirovanie klimaticheskikh harakteristik s pomoshch'yu metoda vejvlet-preobrazovaniya (Prediction of climatic characteristics using the wavelet transform method), *Optika atmosfery i okeana*, 2005, vol. 18, no. 4, pp. 349–351 (in Russian).
2. **Zolotov S. Yu., Ippolitov I. I., Loginov S. V.** Prognoznyye ocenki izmeneniya temperatury prizemnogo vozduha s ispol'zovaniem metoda vejvlet-preobrazovaniya (Forecast estimates of the change in surface air temperature using the wavelet transform method), *Optika atmosfery i okeana*, 2009, no. 5, vol. 22, pp. 471–475 (in Russian).
3. **Chellali F., Khellaf A., Belouchrani A.** Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar, Algeria, *Renewable Energy*, 2010, vol. 35, pp. 1214–1219.
4. **Kobzarenko D. N., Kamilova A. M., Gazanova N. Sh.** K vozmozhnostyam primeneniya vejvlet-funkcii "Mexican Hat" v chastotno-vremennom analize vremennykh ryadov — skorostej vetra (To the possibilities of using the wavelet function "Mexican Hat" in the time-frequency analysis of time series — wind speeds), *Vozobnovlyayemaya ehnergetika: problemy i perspektivy. Aktual'nye problemy osvoeniya vozobnovlyayemykh ehnergoresursov — Materialy III Mezhdunarodnoj konferencii. 6–8 oktyabrya 2014 g.* Ed A. B. Alhasov, Makhachkala: ALEF, 2014, pp. 288–294 (in Russian).
5. **Kobzarenko D. N., Kamilova A. M., Gazanova N. Sh.** Izuchenie vejvlet-preobrazovaniya funkciej "Morlet" vremennykh ryadov — skorostej vetra dlya resheniya zadachi prostranstvenno-vremennogo modelirovaniya raspredeleniya vetroehnergeticheskikh resursov (The study of the wavelet transform by the function "Morlet" of time series — wind speeds for solving the problem of spatio-temporal simulation of the distribution of wind energy resources), *Materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii Vozobnovlyayemaya ehnergetika: problemy i perspektivy i VIII Shkoly molodykh uchenykh Aktual'nye problemy osvoeniya vozobnovlyayemykh ehnergoresursov imeni E. E. Shpil'rajna. 21–24 sentyabrya 2015 g.* Ed. A. B. Alhasov, Makhachkala: ALEF, 2015, vol. 2, pp. 274–280 (in Russian).
6. **Kobzarenko D. N.** K sozdaniyu sredstv avtomatizacii vyborki dannykh vetromonitoringa s servera "Pogoda Rossii" (To the creation of automation tools for sampling wind data from the server "Weather of Russia"), *Programmnyaya inzheneriya*, 2014, no. 2, pp. 27–32 (in Russian).
7. **Gadzhiev A. A., Gadzhiev R. A., Kobzarenko D. N.** Vejvlet-analiz kolebanij urovnya Kaspijskogo morya i vliyaniya na sejsmicheskij rezhim Dagestanskogo klina (Wavelet analysis of fluctuations in the level of the Caspian Sea and influence on the seismic regime of the Dagestan wedge), *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2000, no. 3, pp. 230–236 (in Russian).



**С. И. Савин**, канд. техн. наук, доц., e-mail: savinswsu@mail.ru,  
**Л. Ю. Ворочаева**, канд. техн. наук, доц., e-mail: mila180888@yandex.ru,  
**А. В. Мальчиков**, канд. техн. наук, доц., e-mail: zveroknnp@gmail.com,  
**А. В. Ворочаев**, аспирант, e-mail: sasha-vorochev@yandex.ru,  
 ФГБОУ ВО Юго-Западный государственный университет, г. Курск

## Метод генерации последовательности шагов для шестиногого внутритрубного робота, перемещающегося по пространственно-изогнутым трубам, с использованием развертки трубы

*Представлен алгоритм генерации походок для шестиногого внутритрубного робота, перемещающегося по пространственно-изогнутым трубам, заключающийся в формировании последовательности точек на внутренней поверхности трубы, в которых контактные элементы робота должны взаимодействовать с этой поверхностью. Алгоритм выполняет развертку трубы на двумерную поверхность (ее отображение на карту высот), генерирует последовательность шагов на данной поверхности и переносит их обратно на трехмерную поверхность трубы (свертка трубы).*

**Ключевые слова:** внутритрубный робот, генерация походок, пространственно-изогнутые трубы, карта высот, развертка и свертка трубы

### Введение

В последние десятилетия происходит все более широкое использование внутритрубных роботов для решения различных инженерных задач, в том числе для мониторинга состояния труб, выявления участков трубопроводов, нуждающихся в ремонте, очистки труб и т. д. [1–4]. Значительная часть существующих трубопроводов имеет пространственно-изогнутые участки, ответвления и переменный диаметр. Задача перемещения по таким трубам в настоящее время актуальна и требует эффективного решения. Одним из вариантов ее решения является разработка роботов специально для трубопроводов определенной геометрии. Примеры таких разработок показаны в работах [5–8]. В [9–11] предложен робот с упругими элементами, предназначенный для перемещения по трубам с изменяющимся диаметром.

Одна из основных сложностей управления шагающими внутритрубными роботами заключается в генерации походки, т. е. в формировании последовательности точек, в которых робот должен контактировать с опорной поверхностью, что находит отражение в современных работах. В [12–13] представлен алгоритм генерации походки для девятизвенного шагающего робота, перемещающегося в изогнутых трубах, лежащих в одной плоскости. Данный алгоритм формирует последовательность шагов, расстояние между которыми зависит от радиуса изгиба трубы и ба-

зируется на специальном геометрическом описании трубопроводов, лежащих в одной плоскости.

В данной работе рассматривается более общая задача генерации походки для внутритрубного шагающего робота, перемещающегося в пространственно-изогнутых трубах. Предложено геометрическое описание трубы, позволяющее применять достаточно простые процедуры для генерации походки. Заметим, что данная работа ограничивается вопросами генерации последовательностей шагов робота и не затрагивает такие вопросы реализации этих походок, как решение обратной задачи кинематики, построение и настройка системы управления роботом, определение точного положения робота и формы трубопровода по данным бортовых датчиков и др. Часть этих задач была рассмотрена в предшествующих работах, например, в [12, 14] решена обратная задача кинематики для плоской и пространственной конструкции шагающего внутритрубного робота, а в [15] предложен регулятор, основанный на квадратичном программировании и позволяющий управлять нормальной реакцией между стопами робота и внутренней поверхностью трубы с учетом ограничений на момент, генерируемый электроприводами.

### Описание шестиногого внутритрубного робота

В статье рассматривается шагающий внутритрубный робот с шестью ногами, каждая из кото-

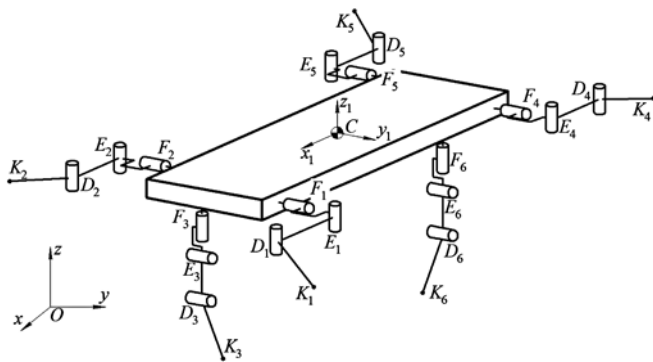


Рис. 1. Конструктивная схема шагающего внутритрубного робота

рых состоит из трех звеньев, соединенных между собой активными вращательными шарнирами. Ноги расположены относительно корпуса таким образом, что они образуют две симметричных "тройки", одна за другой. Каждая "тройка" при полностью выпрямленных ногах имеет форму буквы Т. Звенья, периодически взаимодействующие с внутренней поверхностью трубы, оснащены контактными элементами. На рис. 1 показана конструктивная схема робота.

На рис. 1 точки  $F_i$ ,  $E_i$  и  $D_i$  — активные шарниры,  $K_i$  — контактные элементы на концах ног робота,  $C$  — центр масс корпуса,  $Ox_1y_1z_1$  — неподвижная и связанная с корпусом робота системы координат. Кинематика данного робота была рассмотрена в работе [14], где дано аналитическое решение обратной задачи кинематики для каждой ноги робота и предложен аналитический способ нахождения одного из множества возможных решений этой задачи для всего робота.

## Геометрическое описание трубопровода

### Описание трубы с помощью центральной линии.

Алгоритм генерации походки, описываемый в этой работе, основывается на геометрическом описании трубопровода, в котором происходит движение. Будем рассматривать трубопроводы круглого сечения без ответвлений. Данный тип труб можно описать, введя понятие центральной линии  $\xi$ , под которой будем понимать кривую, точки которой соответствуют центрам сечений трубы. На рис. 2 (см. четвертую сторону обложки) показано сечение прямого участка трубы.

Дадим определение понятию "трубопровод круглого сечения".

**Определение 1.** Пусть задана связная гладкая поверхность  $\Xi$  и гладкая (непрерывная и дифференцируемая) параметрически заданная пространственная кривая  $\xi(s) = [\xi_x(s) \ \xi_y(s) \ \xi_z(s)]^T$ ,

где  $s \in [s_0 \ s_f]$  — параметр кривой  $\xi$  такой, что через произвольно выбранную точку  $P \in \xi$  может быть построена нормальная плоскость  $\Omega(P)$  к  $\xi(s)$ . Тогда будем называть поверхность  $\Xi$  *трубопроводом круглого сечения*, если выполняются следующие условия:

1) для  $\forall P \in \xi$  можно построить круг  $K(P) \in \Omega(P)$  с центром в точке  $P$  такой, что пересечение круга и поверхности  $\Gamma = K \cap \Xi$  является окружностью с центром в точке  $P$ , и такая окружность называется *сечением трубы* в точке  $P$ ;

2) если  $P_1 = \xi(s)$  и  $P_2 = \xi(s + \delta)$  и  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  — окружности с центрами в точках  $P_1$  и  $P_2$ , построенные указанным выше способом, то

$$\forall Q \in \Gamma_1, \exists \delta, B_\varepsilon(Q) \cap \Gamma_2 \neq \emptyset,$$

где  $B_\varepsilon$  — это  $\varepsilon$ -окрестность точки  $Q$ .

Наложим дополнительное ограничение на производную функции  $\xi(s)$ :

$$\|d\xi/ds\| = 1. \quad (1)$$

Формула (1) позволяет рассматривать параметр  $s$  как расстояние вдоль осевой линии, при этом для прямых участков трубы пройденное роботом расстояние  $s$  будет равно пройденному им расстоянию в декартовом пространстве. Положение точки на внутренней поверхности трубы можно описать значениями  $s$  и  $\varphi$ , где  $\varphi \in [0, 2\pi]$  — угол, определяющий положение точки в заданном сечении трубы относительно локальной системы координат. Сама труба при этом полностью описывается функциями  $\xi(s)$  и  $d(s)$ , где последняя определяет диаметр трубы.

**Преобразование поверхности трубы в карту высот.** Выбранное геометрическое описание трубы позволяет выполнить преобразование, отображающее трубу на так называемую карту высот — математический объект, применяемый для описания опорной поверхности как скалярной функции двух переменных при построении последовательностей шагов для двуногих роботов [16]. Будем задавать карту высот следующим образом:

$$h(s, \varphi) = -d(s). \quad (2)$$

Карта высот  $h(s, \varphi)$  является функцией двух переменных, которые используются в качестве локальных координат на поверхности трубы. В данном случае  $h(s, \varphi)$  не зависит от  $\varphi$ , потому что труба имеет круглое сечение.

Процедуру построения карты высот для заданной трубы можно представить как развертку трубы. На рис. 3 изображены труба и ее карта высот.

Рис. 3 иллюстрирует, как использование карты высот позволяет упростить геометрию трубо-

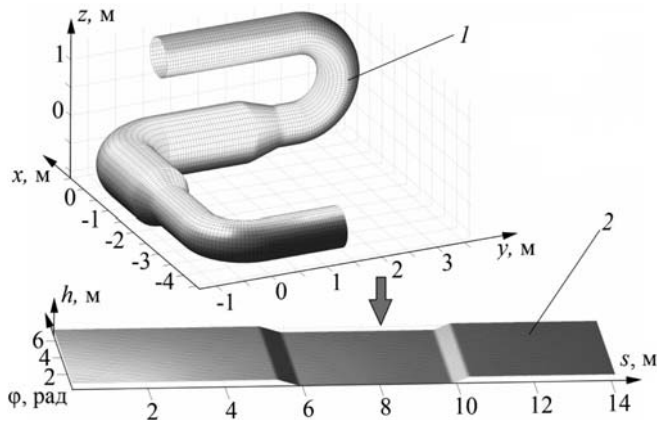


Рис. 3. Труба 1 и ее карта высот 2

провода. Сгенерированная на карте высот последовательность отображается обратно на исходную трубу с помощью другого преобразования, которое можно назвать сверткой трубы.

Для выполнения свертки необходимо ввести локальные системы координат в каждой точке центральной линии. Пусть  $\mathbf{e}_1(s)$ ,  $\mathbf{e}_2(s)$  и  $\mathbf{e}_3(s)$  — ортогональные единичные векторы, образующие систему координат для заданной точки на центральной линии (определенной значением  $s$ ), причем  $\mathbf{e}_1(s)$  является касательным к центральной линии. Потребуем, чтобы  $\mathbf{e}_1(s)$ ,  $\mathbf{e}_2(s)$  и  $\mathbf{e}_3(s)$  были непрерывными и дифференцируемыми функциями. На рис. 4 показана центральная линия трубы с локальными системами координат на ней.

Так как вектор  $\mathbf{e}_1(s)$  — касательный к центральной линии, то  $\mathbf{e}_2(s)$  и  $\mathbf{e}_3(s)$  образуют систему координат на плоскости  $\Omega(P)$ , ортогональной к центральной линии  $P = \xi(s)$ . Сечение трубы  $\Gamma(P)$  лежит в этой плоскости. Тогда точку  $Q$  на внутренней поверхности трубы можем записать как функцию  $s$ ,  $\varphi$  и  $h$ :

$$Q(s, \varphi, h) = \xi(s) - h\mathbf{T}(\mathbf{e}_1, \varphi)\mathbf{e}_2, \quad (3)$$

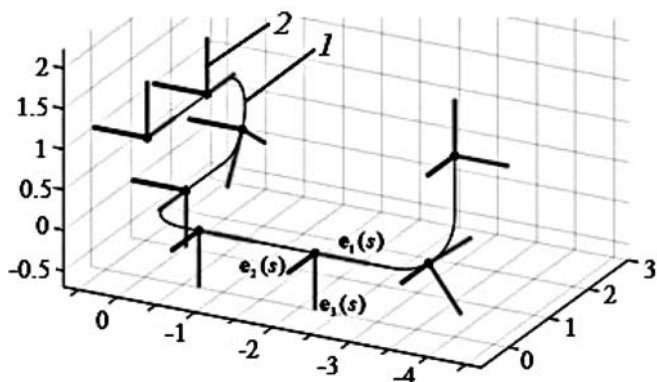


Рис. 4. Центральная линия 1 трубы с локальными системами координат 2 на ней

где  $\mathbf{T}(\mathbf{e}_1, \varphi)$  — матрица поворота на угол  $\varphi$  вокруг оси  $\mathbf{e}_1$ ;  $h$  — высота точки  $(s, \varphi)$  на карте высот, определяемая выражением (2).

#### Соответствие трубопровода и карты высот.

В предыдущем разделе был представлен практический алгоритм для нахождения соответствия между точками на карте высот и на поверхности трубы. В этом разделе дадим формальное обоснование соответствия трубопровода  $\Xi$  и его карты высот  $h(s, \varphi)$ .

Согласно определению 1, для произвольно выбранных  $P_1 = \xi(s)$  и  $P_2 = \xi(s + \delta)$  можем получить сечения  $\Gamma(P_1)$  и  $\Gamma(P_2)$ , являющиеся окружностями. Выберем на окружности  $\Gamma(P_1)$   $n$  точек  $G_{1,i}$ , разбивающих окружность на  $n$  равных частей. Согласно определению, в сколь угодно малой окрестности каждой из точек  $G_{1,i}$  есть точки, принадлежащие  $\Gamma(P_2)$ . Тогда выберем на  $\Gamma(P_2)$   $n$  точек  $G_{2,i}$  так, чтобы в окрестности точки  $G_{1,1}$  находилась точка  $G_{2,1}$ , в окрестности точки  $G_{1,2}$  находилась точка  $G_{2,2}$  и т. д. Таким же образом можем построить набор из  $n$  точек  $G_{3,i}$  на окружности  $\Gamma(P_3)$ , где  $P_3 = \xi(s + 2\delta)$  и т. д. Указанным способом можем получить решетку из  $n \times m$  точек на поверхности  $\Xi$ .

Аналогичную решетку можно задать на карте высот, разбив прямоугольную область определения функции  $h(s, \varphi)$  на нужное число одинаковых прямоугольников. На рис. 3 на трубе и ее карте высот показаны эти решетки. Ячейке с номером  $i, j$  на карте высот (назовем ее  $\Xi_{i,j}$ ) можем сопоставить ячейку с аналогичным номером на поверхности трубопровода (назовем ее  $H_{i,j}$ ). Для того чтобы установить изоморфизм этих ячеек, спроецируем  $\Xi_{i,j}$  на касательную плоскость к поверхности  $\Xi$  в точке  $G_{i,j}$ . При  $n \rightarrow \infty$  и  $\delta \rightarrow 0$  указанная проекция  $\Xi_{i,j}$  будет стремиться к прямоугольнику, который обозначим  $\tilde{\Xi}_{i,j}$ . Заметим, что между  $\Xi_{i,j}$  и  $\tilde{\Xi}_{i,j}$  имеется взаимно однозначное соответствие. Следующее выражение устанавливает взаимно однозначное отображение между ячейкой  $H_{i,j}$  и некоторым прямоугольником в пространстве параметров  $s, \varphi$ :

$$H(s, \varphi) = [s \ \varphi]^T.$$

Тогда можем задать карту между этим прямоугольником и  $\tilde{\Xi}_{i,j}$  и получить биекцию между ячейками  $H_{i,j}$  и  $\Xi_{i,j}$  (рис. 5). Прделав указанные операции со всеми парами ячеек, получим биективное отображение между трубопроводом и его картой высот.

Заметим, что ячейка  $\Xi_{i,n}$  будет граничить с ячейкой  $\Xi_{i,1}$ , тогда как ячейки  $H_{i,n}$  и  $H_{i,1}$  не граничат, таким образом карта высот не полностью сохраняет структуру поверхности  $\Xi$ . Также заме-

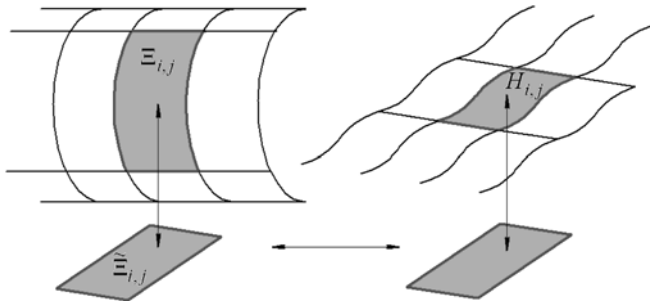


Рис. 5. Биективное отображение между ячейками трубопровода и карты высот

тим, что на практике для нас достаточно иметь однозначное соответствие между описанными выше ячейками  $H_{i,j}$  и  $\Xi_{i,j}$  в связи с тем, что перемещение робота осуществляется с конечной точностью, и задание желаемого положения его стоп возможно "с точностью до ячейки".

### Генерация походки

Алгоритм генерации походок формирует последовательность шагов ног робота и определяет положение точек контакта в начале каждого шага. Для простоты будем рассматривать генерацию походок для передней "тройки" ног, так как генерация походок для задней "тройки" осуществляется аналогичным образом.

Пусть  $\mathbf{p}_{A0}$ ,  $\mathbf{p}_{B0}$  и  $\mathbf{p}_{C0}$  — начальные положения точек контакта  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$ , а  $\mathbf{k}_{A0}$ ,  $\mathbf{k}_{B0}$  и  $\mathbf{k}_{C0}$  — их отображения на карту высот, представленные через  $s$ ,  $\varphi$  и  $h$ :

$$\mathbf{k}_{A0} = [s_{A0} \quad \varphi_{A0} \quad h_{A0}]^T,$$

где  $s_{A0}$ ,  $\varphi_{A0}$  и  $h_{A0}$  выбираются таким образом, чтобы при их подстановке в формулу (3) правая часть выражения стала равной  $\mathbf{p}_{A0}$ . Выражения для  $\mathbf{k}_{B0}$  и  $\mathbf{k}_{C0}$  задаются аналогичным образом.

Тогда можем записать функцию шага, в которой в качестве аргумента используется положение точки контакта в начале шага и которая определяет положение точки контакта после вы-

полнения шага:  $\mathbf{k}_{A,i+1} = f_{step}(\mathbf{k}_{A,i})$ , где  $i$  — номер шага. Данная функция имеет вид

$$\mathbf{k}_{A,i+1} = \begin{bmatrix} s_{A,i} + \Delta s \\ \varphi_{A,i} + \Delta \varphi \\ h(s_{A,i} + \Delta s, \varphi_{A,i} + \Delta \varphi) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\Delta s$  и  $\Delta \varphi$  — постоянные, характеризующие последовательность шагов, а  $h(s, \varphi)$  — функция, вычисляемая по формуле (2). После этого можем перейти к формированию последовательности шагов для точек контакта  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  с помощью этой функции, как показано на рис. 6.

Будем использовать выражение (3) для отображения этих последовательностей с карты высот на реальную трехмерную трубу (выполнения свертки трубы). В итоге получим последовательности положений требуемых точек контакта ног робота  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  с внутренней поверхностью трубы (рис. 7, см. четвертую сторону обложки).

На основании анализа результатов работы алгоритма генерации походок можно отметить, что он формирует последовательности шагов на карте высот, определяемые функцией желаемого шага (4), в которой можно варьировать значения параметров  $\Delta s$  и  $\Delta \varphi$ . Однако при отображении этих последовательностей на трехмерную поверхность трубы видно, что расстояние между соседними контактными точками зависит от геометрии трубы. В частности, при преодолении L-образных и U-образных поворотов расстояние между соседними точками контакта будет больше для ноги, расположенной на стороне трубы, более удаленной от оси поворота. Благодаря этому одна нога не будет "опережать" другие. Этот эффект является естественным следствием генерации последовательностей шагов на карте высот, а затем использования выражения (3) для их отображения обратно на трубу. Похожий эффект был отмечен в работе [13], где рассматривается аналогичная последовательность генерации походок для плоских труб.

Отметим, что алгоритмы походки, описанные в этой статье, справедливы для широкого диапазона конструкций шагающих роботов и могут быть легко адаптированы для роботов с разным числом ног.

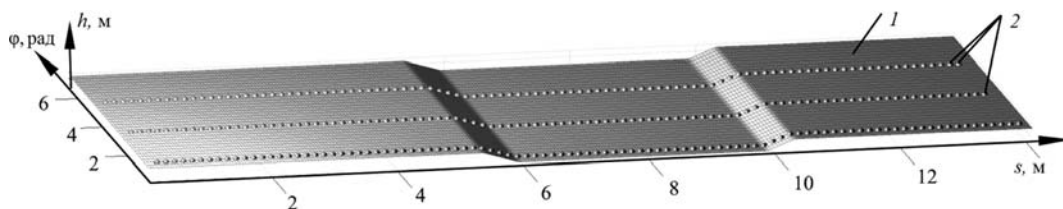


Рис. 6. Карта высот с последовательностью шагов на ней:

1 — поверхность, заданная функцией (2); 2 — точки контакта

## Выбор шага с учетом геометрических свойств робота

**Рабочая область стопы.** Предложенный способ генерации походки позволяет изменять длину шага, варьируя параметры  $\Delta s$  и  $\Delta \varphi$ . Выбор длины шага должен осуществляться исходя из геометрических характеристик робота (длин его звеньев), его конструктивных особенностей (ограничений на относительные углы повтора отдельных пар звеньев), особенностей работы системы управления, режимов движения робота, особенностей взаимодействия с опорной поверхностью. В этом разделе остановимся на первых двух факторах, влияющих на выбираемую длину шага робота. Для упрощения дальнейших рассуждений предположим, что параметр  $\Delta \varphi$  равен нулю, и робот движется "прямо вдоль трубы". Тогда длину шага определяет параметр  $\Delta s$ .

Допустимая длина шага непосредственно связана с геометрией двухзвенного механизма  $E_i D_i K_i$  (см. рис. 1 и рис. 8).

На рис. 8  $l_1$  и  $l_2$  — длины звеньев  $E_i D_i$  и  $D_i K_i$  соответственно,  $c_i$  — расстояние от шарнира  $E_i$  до стенки трубы, а  $\theta_i$  и  $\psi_i$  — углы, определяющие ориентацию звеньев ноги.

Введем понятие *рабочей области стопы* как множества всех точек, достижимых для контактного элемента  $K_i$ . Пусть на углы  $\theta_i$  и  $\psi_i$  наложены ограничения:  $\theta_i \in [\theta_{\min} \theta_{\max}]$  и  $\psi_i \in [\psi_{\min} \psi_{\max}]$ . Заметим, что ориентация корпуса робота будет оказывать влияние на форму рабочей области стопы. На рис. 9 (см. четвертую сторону обложки) показана рабочая область этого механизма при  $\theta_i \in [\pi/4 \ 3\pi/4]$  и  $\psi_i \in [-2\pi/3 \ 2\pi/3]$ ,  $l_1 = l_2 = 0,25$  м для случая, когда корпус робота направлен параллельно стенке трубы.

На рис. 9 синими кружками обозначены точки, достигаемые, когда шарнир  $D_i$  "выгнут влево", а красными квадратами — достигаемые, когда шарнир  $D_i$  "выгнут вправо". Точка  $E_i$  помещена в начало координат.

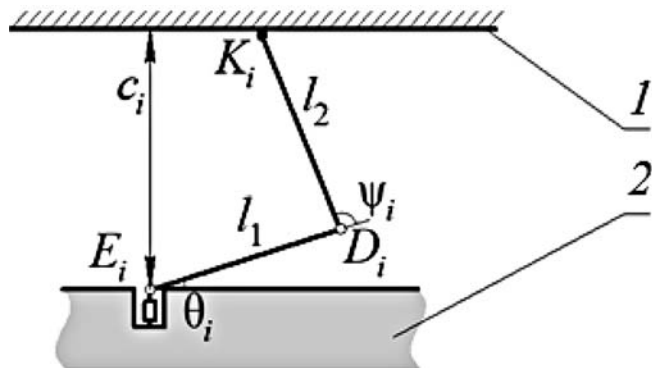


Рис. 8. Схема двухзвенного механизма ноги:  
1 — стенка трубы; 2 — корпус робота

В начале и конце выполнения шага точка  $K_i$  касается внутренней стенки трубы. Таким образом, максимально возможная длина шага  $\sigma_{\max}$  определяется формой рабочей области стопы робота и расстоянием от точки  $E_i$  до трубы  $c_i$ . Фактически пересечение внутренней поверхности трубы и рабочей области стопы задает пространство возможных положений точки  $K_i$  в конце шага. На рис. 9 это пространство показано красной штриховой линией для случая, когда  $c_i = 0,4$  м.

Наконец, максимально возможный шаг для робота также зависит от положения точки  $K_i$  относительно шарнира  $E_i$  в начале совершения шага. Так, если  $E_i K_i = [0,2 \ 0,4]$ , то максимально возможный шаг в положительном направлении вдоль оси  $Ox$ , согласно рис. 9, составит 0,1 м несмотря на то, что пространство возможных положений точки  $K_i$  для  $c_i = 0,4$  м является отрезком длиной 0,6 м. На практике допустимая длина шага может быть дополнительно ограничена в связи с тем, что при перемещении точки  $K_i$  к границе рабочей области стопы нога робота переходит в особое положение.

Рассмотренный подход к определению максимальной длины шага не учитывает подвижности в шарнире  $F_i$  (см. рис. 1). Рабочую область стопы робота в трехмерном пространстве можно получить вращением рабочей области двухзвенного механизма с учетом ограничения подвижности в шарнире  $F_i$ . Пространство возможных положений точки  $K_i$  будет получено тем же образом и будет представлять собой двухмерную поверхность.

**Изгиб трубопровода.** В предшествующем разделе было показано, как максимально возможная длина шага  $\sigma_{\max}$  для шагающего робота может быть найдена путем анализа рабочей области стопы робота. При этом алгоритм использует параметр  $\Delta s$  для задания длины шага. В этом разделе мы укажем, каким образом может быть выбрано максимально допустимое значение параметра  $\Delta s$  исходя из  $\sigma_{\max}$  с учетом геометрических свойств трубопровода.

В случае, когда робот движется по прямому участку трубы, величина  $\Delta s$  равна получаемой длине шага  $\sigma$  робота (рис. 10, а). Длина шага  $\sigma$  будет отличаться от величины  $\Delta s$ , если центральная линия трубы имеет кривизну на участке, по которому происходит перемещение (рис. 10, б).

Заметим, что отличия между  $\sigma$  и  $\Delta s$  будут тем больше, чем ближе к центральной линии трубы располагается ее центр кривизны. Наиболее значительные отличия между  $\sigma$  и  $\Delta s$  будут достигнуты, когда центр кривизны центральной линии лежит на внутренней поверхности трубы. Он не может находиться внутри трубы в связи с ограничениями, накладываемыми определением 1. Также отличия между  $\sigma$  и  $\Delta s$  зависят от того, вдоль какой линии на внутренней поверхности

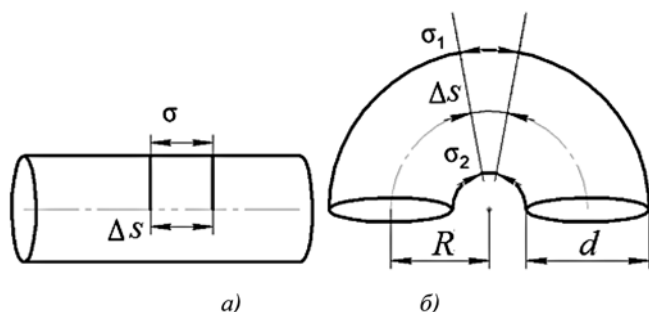


Рис. 10. Связь между длиной шага и параметром  $\Delta s$ :

*a* — для прямого участка трубы, *б* — для криволинейного участка трубы

трубы "шагает" робот. На рис. 10, *б* показаны два возможных шага  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , соответствующих одному значению  $\Delta s$ , при этом  $\sigma_1 > \Delta s > \sigma_2$ .

Пусть радиус кривизны на некотором участке трубопровода является постоянным и равен  $R$ , а диаметр трубы равен  $d$ . Тогда можем найти такие линии, что соответствующие им длины шага  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  будут удовлетворять условиям

$$\begin{cases} \Delta s = R\Delta\alpha; \\ \sigma_1 = (R + d/2)\Delta\alpha; \\ \sigma_2 = (R - d/2)\Delta\alpha, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Delta\alpha$  — шаг вдоль центральной линии в радианах. При условии, что центр кривизны центральной линии трубы располагается на внутренней поверхности трубы, т. е.  $R = d/2$ , величины  $\sigma_1 = 2\Delta s$  и  $\sigma_2 = 0$ . Таким образом, возможен случай, когда шаг робота оказывается вдвое большим, чем заданное значение  $\Delta s$ . Если о геометрии трубы нет никаких данных, можно использовать этот факт для задания дополнительных ограничений на величину шага робота, требуется чтобы  $\Delta s_{\max}$  было вдвое меньше  $\sigma_{\max}$ . Если известен минимальный радиус кривизны  $R$ , то можно непосредственно найти соотношение между  $\Delta s_{\max}$  и  $\sigma_{\max}$ , используя (5).

### Вычислительная сложность и точность позиционирования

Формально выражение (3) может быть использовано для задания желаемого положения стопы робота на внутренней поверхности трубопровода с произвольной точностью. При этом, как было указано в разделе "Соответствие трубопровода и карты высот", на практике можно задавать это положение "с точностью до ячейки". Пусть каждая ячейка на карте высот имеет размеры  $\delta s$  на  $\delta\varphi$ , а функция  $\xi(s)$  представлена в виде таблицы (с шагом  $\delta s$ ), и каждому значению функции сопоставлен базис  $e_1(s)$ ,  $e_2(s)$ ,  $e_3(s)$ . В таком случае можно показать, что для вычисления положения

точки на внутренней поверхности трубы достаточно выполнить 46 операций умножения, 32 сложения, найти значения двух тригонометрических функций и выполнить одну операцию поиска в отсортированной таблице. Последний имеет сложность  $O(\log(n))$ , где  $n$  в данном случае — длина таблицы, задающей  $\xi(s)$ .

Используя рассуждения, аналогичные приведенным в разделе "Изгиб трубопровода", можно показать, что при задании положения на карте высот с точностью  $\delta s$  и  $\delta\varphi$  ошибка на поверхности трубы составит  $2\delta s$  в продольном,  $R\delta\varphi$  в поперечном направлениях и  $\sqrt{(R\delta\varphi)^2 + (2\delta s)^2}$  в абсолютном выражении при условии, что ячейки достаточно малы, чтобы их кривизной можно было пренебречь.

### Заключение

В статье представлен алгоритм генерации последовательности шагов для шестиногого шагающего робота, основанный на специальном описании трубы, в которой происходит движение. Данное геометрическое описание позволяет отобразить трубу на карту высот с более простой геометрией (провести "развертку" трубы) и использовать достаточно простую процедуру генерации последовательности шагов на карте высот, а затем отобразить карту высот со сформированной походкой обратно на трубу (провести "свертку" трубы). Таким образом, возможна генерация последовательностей шагов ног робота в пространственно изогнутых трубах с использованием относительно простых вычислений. Это важно в связи с тем, что на практике данный алгоритм выполняется на бортовом компьютере внутритрубных роботов, не обладающем высокой вычислительной мощностью. Заметим, что для оценки вычислительной сложности алгоритма требуется провести анализ вычислительной сложности методов распознавания формы трубопровода на основе данных, получаемых сенсорной системой робота. Это составляет самостоятельную задачу, которая будет рассмотрена в дальнейших работах авторского коллектива.

В статье рассмотрены ограничения, накладываемые на длину шага робота с учетом геометрии робота и конструктивных ограничений подвижности в его шарнирах. Также был предложен способ использования данных о геометрии трубопровода при выборе максимальной допустимой длины шага. При этом выработка практических рекомендаций по выбору длины шага и других, не рассмотренных в этой работе параметров походки робота, является частью дальнейшей работы коллектива и требует исследования динамики описанного механизма.

Исследование выполнено за счет средств гранта Президента Российской Федерации МК-2577.2017.8, договор № 14.Z56.17.2577-МК.

#### Список литературы

1. Roh S. G., Choi H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines // IEEE transactions on robotics. 2005. Vol. 21, N 1. P. 1–17.
2. Mirats Tur J. M., Garthwaite W. Robotic devices for water main in-pipe inspection: A survey // Journal of Field Robotics. 2010. Vol. 27, N. 4. P. 491–508.
3. Roslin N. S., Anuar A., Jalal M. F. A., Sahari K. S. M. A review: hybrid locomotion of in-pipe inspection robot // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 1456–1462.
4. Roman H. T., Pellegrino B. A., Sigrist W. R. Pipe crawling inspection robots: an overview // IEEE transactions on energy conversion. 1993. Vol. 8, N. 3. P. 576–583.
5. Roh S. G., Ryew S., Yang J. H., Choi H. R. Actively steerable in-pipe inspection robots for underground urban gas pipelines // Proc. IEEE International Conference In Robotics and Automation, ICRA. 2001. Vol. 1. P. 761–766.
6. Horodincă M., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots // Proc. Int. Colloq. Mobile, Autonomous Systems. 2002. P. 61–64.
7. Scholl K. U., Kepplin V., Berns K., Dillmann R. An articulated service robot for autonomous sewer inspection tasks // Proc. IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, IROS'99. 1999. Vol. 2. P. 1075–1080.
8. Choi H. R., Ryew, S. M. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines // Mechatronics. 2002. Vol. 12, N. 5. P. 713–736.
9. Jatsun S., Yatsun A., Savin S. Pipe inspection parallel-link robot with flexible structure // Proc. of the 15th International

Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. 2012. Vol. 23. P. 26.

10. Яцун С. Ф., Савин С. И. Экспериментальные исследования вертикального перемещения робота для мониторинга трубопроводных систем // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 5 (44). Ч. 2. С. 199–202.

11. Савин С. И., Яцун С. Ф., Рублев С. Б. Экспериментальные исследования управляемого движения робота с внешними актуаторами для мониторинга трубопроводов малого диаметра // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (5). С. 1277–1279.

12. Савин С. И., Ворочаева Л. Ю., Ворочаев А. В. Моделирование движения четырехного шагающего робота в трубопроводах с изменяющимся диаметром и изгибами // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 1 (321). С. 39–46.

13. Савин С. И., Ворочаева Л. Ю., Ворочаев А. В. Алгоритм генерации походок для робота, осуществляющего движение в трубопроводах // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. "Техника и технологии". 2017. Т. 7, № 1 (22). С. 90–97.

14. Savin S., Jatsun S. and Vorochaeva L. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes // In MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2017, Vol. 113. P. 1–5.

15. Savin S., Vorochaeva L. Yu. Nested Quadratic Programming-based Controller for In-pipe Robots, In Proceedings of the International Conference On Industrial Engineering 2017, Saint Petersburg (препринт).

16. Gutmann J. S., Fukuchi M., Fujita, M. A floor and obstacle height map for 3D navigation of a humanoid robot // Proc. of the IEEE International Conference In Robotics and Automation, ICRA 2005. 2005. P. 1066–1071.

S. I. Savin, PhD, Associate Professor, e-mail: savinswsu@mail.ru,

L. Yu. Vorochaeva, PhD, Associate Professor, e-mail: mila180888@yandex.ru,

A. V. Malchikov, PhD, Associate Professor, e-mail: zveroknnp@gmail.com,

A. V. Vorochaev, Postgraduate Student, e-mail: sasha-vorochaev@yandex.ru,

Southwest State University, Kursk

## An Approach to Step Sequence Generation Problem for an In-Pipe Robot with Six Legs Designed to Move in Spatially-Curved Pipes, Based on Unwrapping of the Pipe

*The paper discusses the step sequence generation algorithm for a in-pipe walking robot moving in spatially curved pipes with circular cross section. The robot consists of a body and six legs, each of which includes two links connected to each other and to the body via an actuated pin joint. The legs are connected to the body in the following way: four legs are installed on the sides of the robot (two legs for each side), and the remaining two are installed on the bottom of the robot's body. There are two leg triplets (formed by one leg from each side of the robot), the frontal triplet and the backside triplet. When the legs are stretched out each triplet assumes a T shape.*

*The proposed in the paper step sequence generation algorithm determines the positions of the points on the inner surface of the pipe where the contact elements on the end of each of the robot's legs come in contact with it. The algorithm consists of three parts. First, an unwrapping of the pipe takes place, converting the pipe into a two-dimensional height map (a scalar function of two variables). Then, using the height map the algorithm generates a sequence of steps on it. The last step is wrapping the height map back into the pipe, effectively mapping the generated step sequence back onto the inner surface of the original pipe. We assume that the inverse kinematics algorithm can then generate a sequence of robot's poses that would allow the robot to take all these steps.*

*The algorithm is based on a particular geometric description of the pipe, that describes its centerline and diameter as scalar functions of one variable. This variable has an interpretation as a distance that the robot travels through the pipe to arrive at the current cross section. The main advantage of the algorithm is that it uses simple numerical operations and it does not produce excessive computational load, which means it can be successfully implemented on an on-board computer of the in-pipe robot, even if that computer has very moderate computational capabilities.*

**Keywords:** in-pipe robot, generation of gaits, spatial-curved tube, height map, unfolding and folding of pipe

## References

1. Roh S. G., Choi H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines, *IEEE transactions on robotics*, 2005, vol. 21, no. 1, pp. 1–17.
2. Mirats Tur J. M., Garthwaite W. Robotic devices for water main in-pipe inspection: A survey, *Journal of Field Robotics*, 2010, vol. 27, no. 4, pp. 491–508.
3. Roslin N. S., Anuar A., Jalal M. F. A., Sahari, K. S. M. A review: hybrid locomotion of in-pipe inspection robot, *Procedia Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 1456–1462.
4. Roman H. T., Pellegrino B. A., Sigrist, W. R. Pipe crawling inspection robots: an overview, *IEEE transactions on energy conversion*, 1993, vol. 8, no. 3, pp. 576–583.
5. Roh S. G., Ryew S., Yang J. H., Choi H. R. Actively steerable in-pipe inspection robots for underground urban gas pipelines, *Proc. IEEE International Conference In Robotics and Automation, ICRA*, 2001, vol. 1, pp. 761–766.
6. Horodincu M., Doroftei I., Mignon E., Preumont A. A simple architecture for in-pipe inspection robots, *Proc. Int. Colloq. Mobile, Autonomous Systems*, 2002, pp. 61–64.
7. Scholl K. U., Kepplin V., Berns K., Dillmann R. An articulated service robot for autonomous sewer inspection tasks, *Proc. IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, IROS'99*, 1999, vol. 2, pp. 1075–1080.
8. Choi H. R., Ryew, S. M. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines, *Mechatronics*, 2002, vol. 12, no. 5, pp. 713–736.
9. Jatsun S., Yatsun A., Savin S. Pipe inspection parallel-link robot with flexible structure, *Proc. of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2012, vol. 23, P. 26.
10. Jatsun S. F., Savin S. I. Jeksperimental'nye issledovanija vertikal'nogo peremeshhenija robota dlja monitoringa truboprovodnyh system (Studying of the vertical movements of an in-pipe inspection robot), *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 5 (44), part 2, pp. 199–202 (in Russian).
11. Savin S. I., Jatsun S. F., Rublev S. B. Jeksperimental'nye issledovanija upravljaj mogo dvizhenija robota s vneshnimi aktuatorami dlja monitoringa truboprovodov malogo diametra (Experimental researches of operated movement at robot with external actuators for monitoring the small diameter pipelines), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (5), pp. 1277–1279 (in Russian).
12. Savin S. I., Vorochaeva L. Yu., Vorochaev A. V. Modelirovanie dvizhenija chetyrehnogogo shagajushhego robota v truboprovodah s izmenjajushhimsja diametrom i izgibami (Modelling of the movement quadruped walking robot in pipelines with the changing diameter and bends), *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii*. 2017, no. 1 (321), pp. 39–46 (in Russian).
13. Savin S. I., Vorochaeva L. Yu., Vorochaev A. V. Algoritm generacii pohodok dlja robota, osushestvlyajushhego dvizhenie v truboprovodah (Algorithm to generate gaits for robots moving in pipelines), *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Tehnika i tehnologii"*, 2017, no. 1 (22), pp. 90–97 (in Russian).
14. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Yu. Trajectory generation for a walking in-pipe robot moving through spatially curved pipes, *In MATEC Web of Conferences, EDP Sciences*, 2017, vol. 113, pp. 1–5.
15. Savin S. I., Vorochaeva L. Yu. Nested Quadratic Programming-based Controller for In-pipe Robots, *In Proceedings of the International Conference On Industrial Engineering 2017*, Saint Petersburg (preprint).
16. Gutmann J. S., Fukuchi M., Fujita M. A floor and obstacle height map for 3D navigation of a humanoid robot, *Proc. of the IEEE International Conference In Robotics and Automation, ICRA 2005*, 2005, pp. 1066–1071.

---

---

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 10.01.2018. Подписано в печать 21.02.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ318. 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.

---