

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 21  
2015  
№ 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Левин В. И. Анализ поведения неточно заданных функций с помощью интервально-дифференциального исчисления . . . . . 163  
Мочалов И. А., Хрисат М. С., Шихаб Еддин М. Я. Нечеткие дифференциальные уравнения в задачах управления. Часть I . . . . . 171

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю. Иерархическая система математических моделей процесса теплопроводности в композиционном материале . . . 179  
Вдовин А. Н., Четырбоцкий А. Н., Четырбоцкий В. А. Компьютерное моделирование динамики роста рыб (на примере южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus*). Часть II . . . . . 187

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И СЕТИ

- Рзаев Р. Р., Гоюшов А. И., Алмасов А. Ш. Оценка качества услуг телекоммуникационной сети связи на основе метода нечеткого моделирования. . . . . 193

### ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

- Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Соколов Д. В. Методический подход на основе концепции Model-Driven Engineering и онтологий к разработке программного обеспечения для проектирования теплоснабжающих систем. . . . . 201

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

- Берчун Ю. В., Загидуллин Р. Ш. Комплексный подход к организации удаленного доступа к лабораторному оборудованию в учебном процессе . . . . . 210  
Лаптев В. В., Грачев Д. А. Семантическая модель программы и ее реализация . 217

### ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Дулин С. К., Дулина Н. Г., Никишин Д. А. Особенности моделей геоданных и методов их обработки в аспекте обеспечения семантической геоинтероперабельности . . . . . 224

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

#### В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Таран В. В. Информационно-коммуникационные технологии и их социально-экономическое и культурологическое влияние на инновационно-ориентированное развитие . . . . . 236

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.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
РУСАКОВ С. Г.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
РЯБОВ Г. Г.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
СОЙФЕР В. А.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
СОКОЛОВ И. А., акад.  
РАН, д. т. н., проф.  
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.  
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
ШАХНОВ В. А.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.  
ШОКИН Ю. И.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.  
ЮСУПОВ Р. М.,  
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

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

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

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.  
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.  
Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

**CONTENTS**

**INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES**

- Levin V. I.** The Analysis of Inexactly Specified Functions by Interval-Differential Calculus . . . . . 163  
**Mochalov I. A., Khrisat M. S., Shihab Eddin M. Ya.** Fuzzy Differential Equations in Control. Part I . . . . . 171

**MODELING AND OPTIMIZATION**

- Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savelyeva I. Yu.** Hierarchical System of Mathematical Models of Heat Conduction in Composite Materials . . . . . 179  
**Vdovin A. N., Chetyrbotsky A. N., Chetyrbotsky V. A.** The Computer Simulation of the Dynamics of the Length and Weight of Fish (on the Example of South Odnooperogo of Atka Mackerel *Pleurogrammus Azonus*). . . . . 187

**COMPUTING SYSTEMS AND NETWORKS**

- Rzayev R. R., Goyushov A. I., Almasov A. Sh.** Estimation of the Telecommunication Services Quality on the Base of the Fuzzy Modeling Method . . . . . 193

**SOFTWARE ENGINEERING**

- Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Sokolov D. V.** A Methodological Approach on the Basis of Model-Driven Engineering and Ontologies for the Development of a Software for Heat Supply System Design . . . . . 201

**INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION**

- Berchun Yu. V., Zagidullin R. S.** Complex Approach to the Organization of Remote Access to the Labware in Educational Process . . . . . 210  
**Laptev V. V., Grachev D. A.** Semantic Model of the Program and its Realization. . . . . 217

**GEOINFORMATION SYSTEMS**

- Dulin S. K., Dulina N. G., Nikishin D. A.** Features of Models of Geodata and Methods of Their Processing in Aspect of Maintenance Semantic Geointeroperability . . . . . 224

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

- Taran V. V.** Information and Communication Technologies and their Socioeconomic and Culturological Impact on the Innovation — Oriented Development . . . . . 236

**Editor-in-Chief:**

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

**Deputy Editor-in-Chief:**

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

**Chairman:**

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

**Editorial Board Members:**

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

**Editors:**

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

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

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

## Анализ поведения неточно заданных функций с помощью интервально-дифференциального исчисления

*Рассмотрены существующие подходы к оптимизации систем в условиях неопределенности. Сформулирована задача вычисления и анализа поведения заданной с точностью до интервала функции. Для решения задачи она сводится к соответствующим задачам для верхней и нижней граничных функций исходной функции. Используется аппарат интервальной математики и интервально-дифференциального исчисления.*

**Ключевые слова:** оптимизация систем, неопределенность, детерминированная функция, интервальная функция, анализ поведения функций, граничная функция

### Введение

Современная наука и практика обработки информации успешно справляется с задачами исследования различных систем с полностью определенными (детерминированными) параметрами. Эти задачи обычно формулируются как задачи расчета, анализа и синтеза тех или иных функций с детерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками изучаемых систем. Но на практике часто встречаются другие системы — системы с неточно известными, т. е. неполностью определенными (недетерминированными) параметрами. Причины появления таких систем заключаются в естественной неопределенности, свойственной многим реальным процессам, происходящим в системах; в неточном задании параметров большинства систем вследствие неизбежных погрешностей при их вычислении или измерении; в изменении во времени параметров систем; в необходимости или целесообразности совместного исследования целых семейств однотипных систем, имеющих одинаковые функции-характеристики и различающихся лишь значениями параметров этих функций.

Исследование введенных неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками данных систем. Все эти задачи значительно сложнее их упомянутых выше детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с полностью определенными (детерминированными) параметрами. Усложнение

связано с тем, что алгебра недетерминированных чисел всегда сложнее алгебры детерминированных чисел.

В данной работе рассматриваются задачи расчета и анализа неточно заданных (недетерминированных) функций интервального типа. В качестве математического аппарата используются интервальная алгебра и интервально-дифференциальное исчисление.

### 1. Постановка задачи

Рассмотрим обычную (детерминированную) функцию одной независимой переменной

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

однозначно отображающую заданное множество  $X = \{x\}$  независимых переменных  $x$  в заданное множество  $Y = \{y\}$  зависимых переменных  $y$  в соответствии с некоторым законом  $f$ , который и называется функцией. Хорошо известно, что задача расчета (вычисления значений) функции (1) решается с помощью адекватного этой задаче математического аппарата алгебры вещественных чисел при использовании подходящих методов вычисления, а задача анализа поведения функции (1) — с помощью адекватного ей аппарата классического дифференциального исчисления [1].

Рассмотрим теперь недетерминированную (именно интервальную) функцию одной независимой переменной [2]

$$\tilde{y} = \tilde{f}(x), \quad (2)$$

однозначно отображающую заданное множество  $X = \{x\}$  независимых вещественных (как и в случае (1)) переменных  $x$  в заданное множество  $\tilde{Y} = \{\tilde{y}\}$  зависимых переменных-интервалов  $\tilde{y} = [y_1, y_2]$  в соответствии с законом  $\tilde{f}$ , который и называется интервальной функцией. Согласно определению (2) любую интервальную функцию  $\tilde{f}$  можно представить в виде пары обычных функций  $f_1, f_2$ :

$$\tilde{f} = \{f_1, f_2\}, \quad (3)$$

которые имеют вид

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x), \\ y_2 &= f_2(x). \end{aligned} \quad (4)$$

Из соотношений (3), (4) видно, что интервальная функция  $\tilde{f}$  эквивалентна паре обычных функций  $f_1, f_2$ , из которых первая однозначно отображает заданное множество  $X = \{x\}$  независимых переменных  $x$  функции  $\tilde{f}$  в множество  $Y_1 = \{y_1\}$  нижних границ интервалов  $\tilde{y} = [y_1, y_2]$  — зависимых переменных этой функции, а вторая однозначно отображает то же множество  $X = \{x\}$  в множество  $Y_2 = \{y_2\}$  верхних границ тех же интервалов  $\tilde{y} = [y_1, y_2]$  — зависимых переменных этой функции.

Задача настоящей работы заключается в построении двух систематических процедур (алгоритмов), связанных с изучением интервальных функций вида (2), а именно:

- процедуры расчета (вычисления значений) интервальной функции;
- процедуры анализа поведения интервальной функции.

## 2. Решение задачи вычисления интервальной функции

Начнем с решения задачи расчета (вычисления значений) интервальной функции. Здесь возможны два случая.

**Случай 1.** Интервальная функция задана в разделенном виде, в котором верхняя и нижняя границы интервального значения функции выражены каждая по отдельности. Этот вид представления интервальной функции вытекает из соотношений (2)—(4). Именно из (2), (3) следует явное представление интервальной функции в виде интервала

$$[y_1, y_2] = [f_1(x), f_2(x)], \quad (5)$$

границы которого согласно (5) выражаются формулами

$$y_1 = f_1(x), y_2 = f_2(x). \quad (6)$$

Таким образом, вычисление интервального значения  $\tilde{y} = [y_1, y_2]$  интервальной функции (2), соответствующего значению  $x$  независимой переменной этой функции, осуществляется по следующему алгоритму.

**Шаг 1.** Записываем вычисляемую интервальную функцию типа (2) в разделенном виде (5), (6) с помощью нижней  $f_1$  и верхней  $f_2$  граничных функций функции (2).

**Шаг 2.** Вычисляем нижнюю граничную функцию  $f_1$ , используя для этого какой-либо подходящий известный метод вычисления обычных (детерминированных) функций [3].

**Шаг 3.** Вычисляем верхнюю граничную функцию  $f_2$ , используя ту же методику, что и на шаге 2.

**Шаг 4.** Соединяя вычисленные значения нижней  $f_1$  и верхней  $f_2$  граничных функций, получим явное представление (5) вычисленной интервальной функции (2) в виде интервала.

**Случай 2.** Интервальная функция задана в неразделенном виде, т. е. в виде суперпозиции элементарных интервальных функций: интервального сложения и вычитания; умножения интервала на вещественное число; умножения и деления интервалов [4]. В этом случае перед собственно вычислением интервальной функцию приводим к разделенному виду, после чего к функции применяем четырехшаговый алгоритм случая 1. Приведение любой интервальной функции к разделенному виду можно осуществить с помощью основных формул интервальной математики, выражающих результаты элементарных преобразований интервалов [4]:

$$\begin{aligned} [a_1, a_2] + [b_1, b_2] &= [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \\ [a_1, a_2] - [b_1, b_2] &= [a_1 - b_2, a_2 - b_1]; \\ k[a_1, a_2] &= \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} \\ [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] &= [\min_{i,j} (a_i \cdot b_j), \max_{i,j} (a_i \cdot b_j)]; \\ [a_1, a_2]/[b_1, b_2] &= [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1]. \end{aligned} \quad (7)$$

**Пример 1.** Привести к разделенному виду интервальную функцию

$$\tilde{y} = ([2, 3]x + [1, 2]x) \cdot ([5, 7]x + [4, 6]x)$$

в области  $x \geq 0$ .

**Решение.** Применяя к заданной интервальной функции последовательно третью, первую и четвертую формулы (7), получим нужный вид функции

$$\begin{aligned} \tilde{y} = [y_1, y_2] &= ([2x, 3x] + [x, 2x]) \cdot ([5x, 7x] + [4x, 6x]) = \\ &= [3x, 5x] \cdot [9x, 13x] = \\ &= [\min(3 \cdot 9x^2, 3 \cdot 13x^2, 5 \cdot 9x^2, 5 \cdot 13x^2), \\ &\max(3 \cdot 9x^2, 3 \cdot 13x^2, 5 \cdot 9x^2, 5 \cdot 13x^2)] = [27x^2, 65x^2]. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$y_1 = 27x^2, y_2 = 65x^2,$$

и наконец, разделенная форма заданной интервальной функции

$$\tilde{y} = [y_1, y_2] = [27x^2, 65x^2].$$

### 3. Решение задачи анализа поведения интервальной функции: сравнение интервалов

Перейдем к описанию упомянутой ранее (п. 1) задачи анализа поведения интервальной функции. Постановка этой задачи аналогична постановке задачи анализа поведения обычной детерминированной функции и включает, в первую очередь, отыскание:

- интервалов возрастания функции;
- интервалов убывания функции;
- интервалов постоянства значений функции;
- точек максимума функции;
- точек минимума функции.

Кроме того, постановка задачи анализа поведения интервальной функции может включать отыскание особых интервалов (особых точек) такой функции. Существование таких интервалов (таких точек) связано с интервальным характером этой функции. У обычных детерминированных функций такие интервалы (точки) отсутствуют.

Очевидно, что решение задач анализа поведения интервальной функции требует сравнения значений интервалов. В связи с этим ниже кратко изложены основные результаты теории сравнения интервалов [5, 6].

Рассмотрим два интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  и  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ . Попытаемся сравнить значения этих интервалов, рассматривая их как интервальные числа.

Прямое сравнение интервалов  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  на основе отношений отдельных пар вещественных чисел  $(a_i, b_j)$ ,

где  $a_i \in \tilde{a}, b_j \in \tilde{b}$ , не всегда возможно, так как в общем случае одни пары чисел будут находиться в отношении  $(a_i > b_j)$ , а другие — в противоположном отношении  $(a_i < b_j)$ . Поэтому остается реализовать сравнение интервалов на теоретико-множественном уровне, рассматривая каждый интервал их как единое целое, не делимое на части. При этом операции взятия максимума  $\vee$  и минимума  $\wedge$  двух интервалов  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  и  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  можно ввести в виде следующих теоретико-множественных конструкций

$$\begin{aligned}\tilde{a} \vee \tilde{b} &= \{a \vee b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \\ \tilde{a} \wedge \tilde{b} &= \{a \wedge b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}.\end{aligned}\tag{8}$$

Таким образом, взятие максимума (минимума) двух интервалов  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  определяется, согласно (8),

как нахождение множества максимумов (минимумов) двух точных величин  $a$  и  $b$  при условии, что эти величины пробегают все возможные значения соответственно из интервалов  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$ . Теперь для того, чтобы интервалы  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  можно было сравнить по величине, установив их отношение  $\tilde{a} \geq \tilde{b}$  или  $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ , нужно, чтобы: 1) введенные операции  $\vee, \wedge$  над этими интервалами существовали; 2) эти операции давали в результате один из операндов —  $\tilde{a}$  или  $\tilde{b}$ ; 3) эти операции были согласованы, т. е. если большим (меньшим) оказывается один из интервалов, то меньшим (большим) является другой из них. Сформулированное условие сравнимости величин интервалов является, очевидно, необходимым и достаточным.

Нетрудно доказать, что условие согласованности операций  $\vee$  и  $\wedge$  над интервалами всегда выполняется. Очевидно также, что эти операции существуют для любой пары интервалов  $\tilde{a}, \tilde{b}$ , причем результатом операции в общем случае оказывается некоторый новый интервал, отличный как от  $\tilde{a}$ , так и от  $\tilde{b}$ . Таким образом, необходимым и достаточным условием сравнимости интервалов  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  оказывается условие, по которому операции  $\tilde{a} \vee \tilde{b}$  и  $\tilde{a} \wedge \tilde{b}$  должны иметь своим результатом один из интервалов —  $\tilde{a}$  или  $\tilde{b}$ . Из этой формулировки условия сравнимости интервалов выводятся различные его конструктивные формы, удобные для практического применения. Эти формы содержатся в приведенных ниже теоремах 1—4.

**Теорема 1.** Для того чтобы два интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ ,  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  были сравнимы по величине и находились в отношении  $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ , необходимо и достаточно выполнения условий

$$a_1 \geq b_1, a_2 \geq b_2,\tag{9}$$

а для того чтобы эти интервалы были сравнимы по величине и находились в отношении  $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ , необходимо и достаточно выполнения условий

$$a_1 \leq b_1, a_2 \leq b_2.\tag{10}$$

Из теоремы следует, что интервалы  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  сравнимы по величине (по отношению  $\geq$  или  $\leq$ ) и находятся в этом отношении только тогда, когда в таком же отношении находятся их одноименные границы  $a_1, b_1$  и  $a_2, b_2$ .

Значение теоремы 1 в том, что она сводит сравнение двух интервалов и выбор большего (меньшего) из них к очевидной операции сравнения границ указанных интервалов, являющихся вещественными числами.

**Теорема 2.** Для того чтобы два интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  и  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  были несравнимы по вели-

чине (по отношению  $\geq$  или  $\leq$ ), т. е. не находились в отношении  $\tilde{a} \geq \tilde{b}$  или  $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ , необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \text{ или } (b_1 < a_1, b_2 > a_2). \quad (11)$$

Итак, интервалы  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  не сравнимы по отношениям  $\geq$  и  $\leq$  только тогда, когда один из них полностью "накрывает" другой. Значение теоремы 2 в том, что она выявляет существование случаев несравнимости интервалов по отношениям  $\geq$  и  $\leq$ , в отличие от вещественных чисел, которые всегда сравнимы по этим отношениям. Несравнимость некоторых интервалов — естественный результат того, что интервальные числа, в отличие от обычных вещественных чисел, задаются не точно, а с неопределенностью (число принимает некоторое значение в заданном интервале, но при этом не уточняется, какое именно это значение).

Будем рассматривать теперь систему нескольких интервалов

$$\tilde{a}_1 = [a_{11}, a_{12}], \tilde{a}_2 = [a_{21}, a_{22}], \tilde{a}_3 = [a_{31}, a_{32}], \dots (12)$$

Сравнение по отношениям  $\geq$ ,  $\leq$  значений интервалов выписанной системы (12), рассматриваемых как интервальные числа, реализуется в результате попарного сравнения указанных интервалов, выполняемого в соответствии с теоремами 1, 2. Основные результаты, получаемые этим путем, содержатся в нижеследующих теоремах 3 и 4.

**Теорема 3.** Для того чтобы в системе нескольких интервалов вида (12) существовал максимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении  $\geq$ , и этим интервалом являлся  $\tilde{a}_1$ , необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\begin{aligned} a_{11} \geq a_{21}, a_{11} \geq a_{31}, a_{11} \geq a_{41}, \dots \\ a_{12} \geq a_{22}, a_{12} \geq a_{32}, a_{12} \geq a_{42}, \dots \end{aligned} \quad (13)$$

**Теорема 4.** Для того чтобы в системе нескольких интервалов вида (12) существовал минимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении  $\leq$ , и этим интервалом являлся  $\tilde{a}_1$ , необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\begin{aligned} a_{11} \leq a_{21}, a_{11} \leq a_{31}, a_{11} \leq a_{41}, \dots \\ a_{12} \leq a_{22}, a_{12} \leq a_{32}, a_{12} \leq a_{42}, \dots \end{aligned} \quad (14)$$

Приведенные выше теоремы 3 и 4 показывают, что интервал является максимальным (минимальным) в системе интервалов только в том случае, когда максимальны (минимальны) его нижняя граница (среди нижних границ всех интервалов) и его верхняя граница (среди верхних границ всех интервалов). Естественно, что, как и в случае сравнения

двух интервалов, сравнение любого числа интервалов системы не выявит максимального (минимального) интервала, если входящие в систему интервалы попарно не сравнимы.

До сих пор мы рассматривали процедуры выделения, вообще говоря, нестрого максимального (нестрого минимального) интервала, основанные на теоретико-множественных операциях (8), для вычисления нестрогого максимума (нестрогого минимума) двух интервалов. Аналогично этому вводятся процедуры выделения строго максимального (строго минимального) интервала, т. е. единственного интервала, являющегося максимальным (минимальным).

Будем считать равными по определению совпадающие интервалы, т. е. для интервалов  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  и  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , взятых произвольно, условие их равенства вводится таким образом:

$$(\tilde{a} = \tilde{b}) \Leftrightarrow (a_1 = b_1, a_2 = b_2). \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что неравными являются интервалы, удовлетворяющие условию

$$(\tilde{a} \neq \tilde{b}) \Leftrightarrow (a_1 \neq b_1 \text{ или } a_2 \neq b_2). \quad (16)$$

Теперь определение того, что некоторый интервал  $\tilde{a}$  является строго максимальным из двух интервалов  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$ , можно записать в виде

$$(\tilde{a} > \tilde{b}) \Leftrightarrow (\tilde{a} \vee \tilde{b} = \tilde{a}, \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \tilde{b}, \tilde{a} \neq \tilde{b}), \quad (17)$$

аналогичным образом, определение того, что интервал  $\tilde{a}$  является строго минимальным из двух интервалов  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$ , можно записать в виде

$$(\tilde{a} < \tilde{b}) \Leftrightarrow (\tilde{a} \vee \tilde{b} = \tilde{b}, \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \tilde{a}, \tilde{a} \neq \tilde{b}). \quad (18)$$

Здесь  $\vee$  и  $\wedge$  — теоретико-множественные операции (8) вычисления максимума и минимума двух интервалов.

Из формулировки условий (17), (18) сравнимости интервалов в виде строгих неравенств между ними можно вывести различные конструктивные формы этих условий, удобные для практического применения. Эти формы содержатся в нижеследующих теоремах 5—8, которые подобны теоремам 1—4, дающим удобные конструктивные формы сравнимости двух интервалов в форме нестрогих неравенств.

**Теорема 5.** Для того чтобы два интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ ,  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  были сравнимы по величине и находились в отношении  $\tilde{a} > \tilde{b}$ , необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 > b_1, a_2 \geq b_2) \text{ или } (a_1 \geq b_1, a_2 > b_2), \quad (19)$$

а для того чтобы эти интервалы были сравнимы по величине и находились в отношении  $\tilde{a} < \tilde{b}$ , необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 \leq b_2) \text{ или } (a_1 \leq b_1, a_2 < b_2). \quad (20)$$

Из утверждения теоремы следует, что интервалы  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  сравнимы по величине (по отношению  $>$  или  $<$ ) и находятся в указанном отношении только тогда, когда в том же отношении находятся их нижние границы  $a_1, b_1$  (при этом верхние границы  $a_2, b_2$  находятся в соответствующем нестрогом отношении — для  $>$  это  $\geq$ , а для  $<$  это  $\leq$ ) или их верхние границы  $a_2, b_2$  (при этом нижние границы  $a_1, b_1$  находятся в соответствующем нестрогом отношении).

**Теорема 6.** Для того чтобы два интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  и  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  были не сравнимы по величине (по отношению  $>$  или  $<$ ), т. е. не находились в отношении  $\tilde{a} > \tilde{b}$  или  $\tilde{a} < \tilde{b}$ , необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \text{ или } (b_1 < a_1, b_2 > a_2) \\ \text{или } (a_1 = b_1, a_2 = b_2). \quad (21)$$

Итак, интервалы  $\tilde{a}$  и  $\tilde{b}$  не сравнимы по отношению  $>$  и  $<$  только в тех случаях, когда один из них полностью "накрывает" другой либо когда интервалы равны между собой. Значение теоремы 6 состоит в том, что она выявляет существование случаев несравнимости интервалов по отношениям  $>$  и  $<$  даже тогда, когда сравниваемые интервалы не равны между собой, а только "накрывают" один другой. Эта ситуация существенно отличается от ситуации со сравнением вещественных чисел, где неравные числа всегда сравнимы по отношениям  $>$  и  $<$ .

Рассмотрим теперь систему нескольких интервалов вида (12). Сравнение по отношениям  $>$  и  $<$  величин интервалов системы (12), рассматриваемых как интервальные числа, реализуется путем попарного сравнения этих интервалов в соответствии с теоремами 5 и 6. Основные результаты, получаемые этим путем, изложены ниже в теоремах 7, 8.

**Теорема 7.** Для того чтобы в системе нескольких интервалов вида (12) существовал максимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении  $>$ , и этим интервалом являлся  $\tilde{a}_1$ , необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} > a_{21}, a_{12} \geq a_{22}) \text{ или } (a_{11} \geq a_{21}, a_{12} > a_{22}); \\ (a_{11} > a_{31}, a_{12} \geq a_{32}) \text{ или } (a_{11} \geq a_{31}, a_{12} > a_{32}); \\ (a_{11} > a_{41}, a_{12} \geq a_{42}) \text{ или } (a_{11} \geq a_{41}, a_{12} > a_{42}); \\ \dots \end{aligned} \right\} (22)$$

**Теорема 8.** Для того чтобы в системе нескольких интервалов вида (12) существовал минимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении  $<$ , и этим интервалом являлся  $\tilde{a}_1$ , необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относи-

тельно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} < a_{21}, a_{12} \leq a_{22}) \text{ или } (a_{11} \leq a_{21}, a_{12} < a_{22}); \\ (a_{11} < a_{31}, a_{12} \leq a_{32}) \text{ или } (a_{11} \leq a_{31}, a_{12} < a_{32}); \\ (a_{11} < a_{41}, a_{12} \leq a_{42}) \text{ или } (a_{11} \leq a_{41}, a_{12} < a_{42}); \\ \dots \end{aligned} \right\} (23)$$

#### 4. Решение задачи анализа поведения интервальной функции. Основные теоремы и алгоритм

В предыдущем разделе мы изложили вспомогательный для задачи анализа поведения интервальной функции материал, связанный со сравнением интервальных величин. Теперь мы займемся собственно анализом поведения интервальных функций.

Рассмотрим произвольную интервальную функцию (2). Будем считать, что эта функция задана в разделенном виде (5), (6). Это не ограничивает общности рассмотрения, так как функция, заданная в неразделенном виде, всегда может быть приведена к разделенному виду (см. п. 2). Будем также считать, что нижняя и верхняя граничные функции нашей интервальной функции непрерывны и дифференцируемы. Сформулируем условия, при которых заданная функция возрастает, убывает, остается постоянной, достигает максимума (минимума), ведет себя иным, отличным от указанных, способом.

По аналогии с обычными (детерминированными) функциями [1] мы введем понятия возрастания, убывания, постоянства, максимума и минимума интервальной функции.

**Определение 1.** Интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  называется возрастающей на интервале  $(a, b)$ , если для любых  $x_1$  и  $x_2$  из данного интервала, для которых  $x_1 < x_2$ , выполняется неравенство  $\tilde{f}(x_1) < \tilde{f}(x_2)$ .

**Определение 2.** Интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  называется убывающей на интервале  $(a, b)$ , если для любых  $x_1$  и  $x_2$  из данного интервала, для которых  $x_1 < x_2$ , выполняется неравенство  $\tilde{f}(x_1) > \tilde{f}(x_2)$ .

**Определение 3.** Интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  называется постоянной на интервале  $(a, b)$ , если для любых  $x_1$  и  $x_2$  из упомянутого интервала, для которых  $x_1 < x_2$ , выполняется неравенство  $\tilde{f}(x_1) = \tilde{f}(x_2)$ .

**Определение 4.** Точка  $x = x_0$  называется точкой максимума интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $\tilde{f}(x_0)$  — максимумом указанной функции, если для всех точек  $x$  из некоторой окрестности точки  $x_0$ , не совпадающих с  $x_0$ , истинно строгое неравенство  $\tilde{f}(x_0) > \tilde{f}(x)$ .

**Определение 5.** Точка  $x = x_0$  называется точкой минимума интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $\tilde{f}(x_0)$  — минимумом этой функции, если для всех точек  $x$  из некоторой окрестности точки  $x_0$ , не совпадающих с  $x_0$ , выполняется строгое неравенство  $\tilde{f}(x_0) < \tilde{f}(x)$ .

Введем теперь понятия расширения и сужения интервальной функции, которые не применимы к обычным (детерминированным) функциям.

**Определение 6.** Интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  называется расширяющейся на интервале  $(a, b)$ , если для любых точек  $x_1$  и  $x_2$  из этого интервала, для которых  $x_1 < x_2$ , интервал  $\tilde{f}(x_2)$  полностью "накрывает" интервал  $\tilde{f}(x_1)$ .

**Определение 7.** Интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  называется сужающейся на интервале  $(a, b)$ , если для любых  $x_1$  и  $x_2$  из указанного интервала, для которых  $x_1 < x_2$ , интервал  $\tilde{f}(x_1)$  полностью "накрывает" интервал  $\tilde{f}(x_2)$ .

**Определение 8.** Точку  $x = x_0$  будем называть точкой максимального расширения интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $D(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$  — максимальной шириной указанной функции, если для всех точек  $x$  из некоторой окрестности точки  $x_0$ , не совпадающих с  $x_0$ , интервал  $\tilde{f}(x_0)$  полностью "накрывает" интервал  $\tilde{f}(x)$ .

**Определение 9.** Точку  $x = x_0$  будем называть точкой максимального сужения интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $d(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$  — минимальной шириной функции  $\tilde{f}(x)$ , если для всех точек  $x$  некоторой окрестности точки  $x_0$ , не совпадающих с  $x_0$ , интервал  $\tilde{f}(x)$  полностью "накрывает"  $\tilde{f}(x_0)$ .

Сформулируем и докажем условия, которые определяют то или иное поведение интервальной функции.

**Теорема 9.** Для того чтобы интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  являлась возрастающей на интервале  $(a, b)$ , необходимо и достаточно, чтобы на указанном интервале ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$  была возрастающей, а верхняя граничная функция  $f_2(x)$  — неубывающей либо, наоборот, функция  $f_2(x)$  была возрастающей, а функция  $f_1(x)$  — неубывающей.

*Доказательство.* Представим нашу функцию  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  в интервальной форме (5):  $\tilde{y} = [f_1(x), f_2(x)]$ . Возрастание этой функции на интервале  $(a, b)$ , согласно определению (1), означает, что для любых  $x_1, x_2$  из этого интервала, таких, что  $x_1 < x_2$ , выпол-

няется неравенство  $[f_1(x_1), f_2(x_1)] < [f_1(x_2), f_2(x_2)]$ , которое, согласно теореме 5, приводит к двум возможным вариантам:

$$f_1(x_1) < f_1(x_2), f_2(x_1) \leq f_2(x_2) \\ \text{или } f_1(x_1) < f_1(x_2), f_2(x_1) \leq f_2(x_2).$$

Итак, верно одно из двух: либо на всем интервале  $(a, b)$  нижняя граничная функция  $f_1(x)$  интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  является возрастающей, а ее верхняя граничная функция  $f_2(x)$  — неубывающей, либо, наоборот,  $f_2(x)$  является возрастающей, а  $f_1(x)$  — неубывающей, что и требовалось доказать.

**Теорема 10.** Для того чтобы интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  была убывающей на интервале  $(a, b)$ , необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$  была убывающей, а верхняя граничная функция  $f_2(x)$  — невозрастающей либо, наоборот, функция  $f_2(x)$  была убывающей, а функция  $f_1(x)$  — невозрастающей.

*Доказательство* аналогично доказательству теоремы 9, однако использует определение 2 вместо определения 1.

**Теорема 11.** Для того чтобы интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  была постоянной на интервале  $(a, b)$ , необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале ее нижняя  $f_1(x)$  и верхняя  $f_2(x)$  граничные функции были постоянными.

*Доказательство* следует напрямую из определения интервала как множества всех вещественных чисел между заданными двумя числами — границами интервала, включая и сами эти границы.

**Теорема 12.** Для того чтобы точка  $x = x_0$  была точкой максимума интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $\tilde{f}(x_0)$  — максимумом этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в этой точке достигала максимума ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$  и не достигала минимума ее верхняя граничная функция  $f_2(x)$  или достигала максимума ее верхняя граничная функция  $f_2(x)$  и не достигала минимума ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$ .

*Доказательство.* Представим нашу функцию  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  в интервальной форме (5):  $\tilde{y} = [f_1(x), f_2(x)]$ . Существование максимума этой функции в точке  $x = x_0$  по определению 4 означает, что для всех точек  $x$  из некоторой окрестности точки  $x_0$ , не совпадающих с  $x_0$ , выполняется неравенство  $\tilde{f}(x_0) > \tilde{f}(x)$  или в интервальной форме  $[f_1(x_0), f_2(x_0)] > [f_1(x), f_2(x)]$ . Последнее неравенство, согласно теореме 5, эквивалентно условию

$$f_1(x_0) > f_1(x), f_2(x_0) \geq f_2(x) \\ \text{или } f_1(x_0) \geq f_1(x), f_2(x_0) > f_2(x).$$

Условия левой скобки показывают, что в точке  $x_0$  функция  $f_1(x)$  обращается в максимум, а функция  $f_2(x)$  не обращается в минимум. Условия же правой скобки показывают, что в точке  $x_0$  функция  $f_2(x)$  обращается в максимум, а функция  $f_1(x)$  не обращается в минимум. Что и требовалось доказать.



**Теорема 13.** Для того чтобы точка  $x = x_0$  была точкой минимума интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $\tilde{f}(x_0)$  — минимумом этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в этой точке достигала минимума ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$  и не достигала максимума ее верхняя граничная функция  $f_2(x)$  или достигала минимума ее верхняя граничная функция  $f_2(x)$  и не достигала максимума ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$ .

*Доказательство* теоремы 13 аналогично доказательству теоремы 12, но использует определение 5.

**Теорема 14.** Для того чтобы интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  была расширяющейся на интервале  $(a, b)$ , необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале была убывающей ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$  и была возрастающей ее верхняя граничная функция  $f_2(x)$ .

*Доказательство.* Для любых  $x_1, x_2$  из интервала  $(a, b)$ , таких, что  $x_1 < x_2$ , в силу расширения функции  $f$  на этом интервале должно выполняться следующее условие: интервал  $\tilde{f}(x_2)$  полностью "накрывает" интервал  $\tilde{f}(x_1)$ . Выражая эти интервалы явно в интервальной форме  $\tilde{f}(x_1) = [f_1(x_1), f_2(x_1)]$ ,  $\tilde{f}(x_2) = [f_1(x_2), f_2(x_2)]$ , имеем условие "накрытия" интервалов  $f_1(x_2) < f_1(x_1)$ ;  $f_2(x_2) > f_2(x_1)$ .

Первое неравенство показывает, что функция  $f_1(x)$  является убывающей, а второе — что функция  $f_2(x)$  возрастающая. Что и требовалось доказать.

**Теорема 15.** Для того чтобы интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  была сужающейся на интервале  $(a, b)$ , необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале была убывающей ее верхняя граничная функция  $f_2(x)$  и была возрастающей ее нижняя граничная функция  $f_1(x)$ .

*Доказательство* аналогично доказательству теоремы 14.

**Теорема 16.** Для того чтобы точка  $x = x_0$  являлась точкой максимального расширения интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $D(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$  — максимальной шириной этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности точки  $x_0$  слева функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  была расширяющейся, а в некоторой окрестности точки  $x_0$  справа она была сужающейся.

**Теорема 17.** Для того чтобы точка  $x = x_0$  являлась точкой максимального сужения интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а число  $d(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$  — минимальной шириной указанной функции, необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности точки  $x_0$  слева функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  была сужающейся, а в некоторой окрестности точки  $x_0$  справа она была расширяющейся.

*Доказательства* теорем 16, 17 вытекают прямо из определений 8, 9 точек максимального расширения и сужения интервальной функции.

Анализ поведения интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , как показывает изложенный в этом разделе материал, всегда сводится к анализу поведения двух обычных детерминированных функций: нижней  $f_1(x)$  и верхней  $f_2(x)$  граничных функций функции  $\tilde{f}(x)$ . Это позволяет использовать для анализа поведения интервальных функций хорошо известные и разработанные методы анализа поведения обычных (детерминированных) функций, основанные на использовании классического дифференциального исчисления [1]. При этом алгоритм анализа поведения произвольной интервальной функции может быть описан следующим образом.

**Шаг 1.** Проверка формы, в которой представлена заданная интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , подлежащая анализу. Если эта форма неразделенная, т. е. не имеющая вида интервала  $\tilde{y} = [y_1, y_2] = [f_1(x), f_2(x)]$ , где  $y_1 = f_1(x)$  и  $y_2 = f_2(x)$  — соответственно нижняя и верхняя граничные функции заданной интервальной функции, то переход к шагу 2. Если она разделенная, т. е. имеющая указанный вид, то переход к шагу 3.

**Шаг 2.** Приведение функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  из неразделенного вида к разделенному с помощью основных формул интервальной математики (7) (пример 1).

**Шаг 3.** Анализ поведения нижней граничной функции  $y_1 = f_1(x)$  интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  с помощью известных методов анализа поведения обычных (детерминированных) функций на основе классического дифференциального исчисления. В ходе этого анализа устанавливаем интервалы возрастания и убывания функции  $f_1$ , а также точки ее максимумов и минимумов.

**Шаг 4.** Анализ поведения верхней граничной функции  $y_2 = f_2(x)$  нашей интервальной функции. Он выполняется теми же методами и по той же программе, что и предыдущий шаг.

**Шаг 5.** Составление сводной таблицы поведения обеих граничных функций  $y_1 = f_1(x)$ ,  $y_2 = f_2(x)$  (см. таблицу) путем заполнения в ней первых трех строк, в соответствии с результатом анализа поведения функций  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  (шаги 3, 4).

**Шаг 6.** Анализ сводной таблицы с помощью теорем 9—15, позволяющих идентифицировать последовательные интервалы  $(-\infty, x_1)$ ,  $(x_1, x_2)$ , ...,  $(x_{n-1}, x_n)$ ,  $(x_n, \infty)$  в ней как интервалы возрастания, убывания, расширения или сужения анализируемой интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , а промежуточные точки  $x_1, x_2, \dots, x_n$  между интервалами как точки максимума (минимума) функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  или точки максимума (минимума) ее расширения или сужения. Например, если на некотором интервале  $(x_i, x_{i+1})$  функция  $f_2(x)$  возрастает, а на соседнем интервале  $(x_{i+1}, x_{i+2})$  она убывает, так что в

Сводная таблица поведения интервальной функции

$y$	$(-\infty, x)$	$x_1$	$(x_1, x_2)$	$x_2$	$(x_2, x_3)$	$x_3$	$(x_3, x_4)$	...	$(x_{n-1}, x_n)$	$x_n$	$(x_n, \infty)$
$y_1 = f_1(x)$	Моно- тонная	Точка возможного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная	Точка возможного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная	Точка возможного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная	...	Моно- тонная	Точка возможного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная
$y_2 = f_2(x)$	Моно- тонная	Точка возможного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная	Точка возможного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная	Точка воз- можного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная	...	Моно- тонная	Точка возможного экстремума $f_1$ или $f_2$	Моно- тонная
$\tilde{y} = \tilde{f}(x)$	Возра- стающая	Точка максимума	Убыва- ющая	Точка минимума	Расши- ряю- щаяся	Точка мак- симального расширения	Сужаю- щаяся	...	Сужаю- щаяся	Точка мак- симального сужения	Расши- ряю- щаяся

точке  $x_{i+1}$  она максимальна, и при этом функция  $f_1(x)$  на обоих интервалах постоянная, то согласно теоремам 9, 10, 12 интервальная функция  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$  на интервале  $(x_i, x_{i+1})$  возрастает, в точке  $x_{i+1}$  достигает максимума, затем на интервале  $(x_{i+1}, x_{i+2})$  убывает.

После выполнения шага 6 заполняется четвертая строка сводной таблицы поведения, и на этом анализ поведения заданной интервальной функции заканчивается. Характерный возможный вид четвертой строки показан в сводной таблице поведения интервальной функции. По результатам анализа можно вычертить график интервальной функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ .

### Заключение

В настоящей работе разработаны систематические методы решения задач расчета и анализа поведения недетерминированных функций интервального типа, с помощью которых функции определяются с точностью до интервала возможных

значений. В качестве математического аппарата использованы интервальная алгебра и дифференциальные характеристики верхней и нижней границ изучаемых интервальных функций, которые в совокупности можно рассматривать как специальное дифференциальное исчисление для неточно задаваемых функций интервального типа.

### Список литературы

1. **Фихтенгольц Г. М.** Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. М.: Физматлит, 2001. 616 с.
2. **Левин В. И.** Интервальная производная и начала недетерминистского дифференциального исчисления // *Онтология проектирования*. 2013. № 4. С. 72–84.
3. **Милн В. Э.** Численный анализ. М.: Издательство иностранной литературы, 1980.
4. **Алефельд Г., Херцбергер Ю.** Введение в интервальные вычисления. М.: Мир, 1987. 356 с.
5. **Левин В. И.** Интервальные методы оптимизации систем в условиях неопределенности. Пенза: Изд-во Пензенского технолог. ин-та, 1999. 101 с.
6. **Левин В. И.** Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации // *Автоматика и вычислительная техника*. 2012. № 4.

V. I. Levin, Dr. Sci (Tech), Professor, Penza State Technological University, e-mail: Vilevin@mail.ru

## The Analysis of Inexactly Specified Functions by Interval-differential Calculus

*The existing approaches to system optimization under uncertainty are considered. The problem of calculating and analyzing the dynamics of function which specified up to interval. To solve this problem it is reduced to the corresponding problems for the upper and lower boundary functions of the original function. We use the technique of interval mathematics and interval-differential calculus.*

**Keywords:** system optimization, uncertainty, deterministic function, interval function, analysis of functions, boundary function

### References

1. **Fihhtengol'c G. M.** *Kurs differencial'nogo i integral'nogo ischislenija*. T. 1. M.: Fizmatlit, 2001.
2. **Levin V. I.** Interval'naja proizvodnaja i nachala nedeterminist-skogo differencial'nogo ischislenija. *Ontologija proektirovanija*. 2013. N. 4. P. 72–84.
3. **Miln V. Je.** *Chislennyj analiz*. M.: Izdalel'stvo inostrannoj literature, 1980.
4. **Alefel'd G., Herzberger Ju.** *Vvedenie v interval'nye vychislenija*. M.: Mir, 1987.
5. **Levin V. I.** *Interval'nye metody optimizacii sistem v uslovijah neopredelenosti*. Penza: Izd-vo Penzenskogo tehnolog. in-ta, 1999. 101 s.
6. **Levin V. I.** *Optimizacija v uslovijah interval'noj neopredelenosti. Metod determinizacii. Avtomatika i vychislitel'naja tehnika*. 2012. N. 4.

И. А. Мочалов, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
 М. С. Хрисат, аспирант, e-mail: mohd.khrisat@fet.edu.yo, М. Я. Шихаб Еддин, аспирант,  
 Российский университет дружбы народов

## Нечеткие дифференциальные уравнения в задачах управления. Часть I

*Представлены основные положения нечетких вычислений и нечеткой теории обыкновенных дифференциальных уравнений, различные типы решений и их отношений. Описана основная схема представления нечетких производных, даны примеры.*

**Ключевые слова:** нечеткие вычисления, нечеткое банахово пространство, нечеткие производные

### Введение

Одним из основных разделов современной прикладной науки является та ее часть, которая посвящена решению четких (традиционных) обыкновенных и в частных производных уравнений, используемых для описания различных компонент систем управления. С одной стороны, методы решения этих уравнений достаточно хорошо развиты, получено много практических результатов, а отдельные их разделы давно вошли в состав соответствующих курсов университетов [1–3]. С другой стороны, в настоящее время широко используется теория нечетких множеств при решении разнообразных нечетких прикладных задач. Созданы различные нечеткие модели объектов управления [4, 5], разработаны и внедрены алгоритмы и технические средства логического нечеткого управления [6, 7], созданы основы нечеткой теории вероятностей, случайных процессов и математической статистики [8, 9]. В частности, разработаны алгоритмы нечеткого оценивания, проверки нечетких тестов, решения нечетких регрессионных задач [10, 11].

В статье приняты следующие обозначения:  $x_H$  — нечеткий элемент;  $\varphi_H(t)$  — нечеткая функция (отображение) для одного переменного и  $\varphi_H(t, x, \dots, z)$  для многих переменных;  $\dot{\varphi}_H(t)$  — нечеткая производная, а соответствующий ей тип обозначается верхним индексом, например,  $\dot{\varphi}_H^S$  — нечеткая производная Seikkala (Сейккала) и др.

### 1. Базовые определения

**1.1. Функция принадлежности.** В теории нечетких множеств одним из базовых понятий является определение принадлежности элемента  $x$  некоторому множеству  $X(x \in X \subset R_1)$ . В зависимости от типа множества (четкое или нечеткое) обозначение  $x \in X$  формализуется с помощью характеристической функции  $r^*(x)$ ,  $x \in X \subset R_1$ ,  $r \in \{0; 1\}$  для четкого элемента  $x$  и функции принадлежности  $r(x)$ ,

$x = x_H \in X$ ,  $r \in [0; 1]$  для нечеткого элемента  $x_H$ . Они определяются следующим образом:

$$r^*(x) = \begin{cases} 1, & x \in X; \\ 0, & x \notin X; \end{cases}$$

$$r(x) = \begin{cases} \underline{r}(x) \in [0; 1]; \\ \overline{r}(x) \in [0; 1], \end{cases}$$

где  $r(x)$  — многозначная функция с  $\underline{r}(x)$ ,  $\overline{r}(x)$  — "левой" и "правой" однозначными функциями (ветвями) соответственно относительно  $r(x_H) = 1$ , обладающая заданными свойствами, которые будут представлены далее. Иногда для  $r(x)$  используют обозначение

$$r(x) = \begin{cases} r_L(x) \in [0; 1]; \\ r_R(x) \in [0; 1], \end{cases}$$

где  $r_L(\cdot)$  — "левая" (Left — англ.) ветвь,  $r_R(\cdot)$  — "правая" (Right — англ.) ветвь.

Часто для  $r(x)$  используется его уровневое представление с применением обратного отображения  $r^{-1}(x)$ :

$$r^{-1}(x) = x(r) = (\underline{x}(r), \overline{x}(r)) | r \in [0; 1].$$

Таким образом, в символической форме имеем:

$$x \in X \subset R_1 \begin{cases} r^*(x) = \{0; 1\}, \\ \nearrow x — \text{четкий элемент } X; \\ \searrow r(x) \in [0; 1], \\ x = x_H — \text{нечеткий элемент } X. \end{cases}$$

Совокупность нечетких элементов  $\{x_H\}$  задает нечеткое множество  $X_H$ . Для обозначения  $x_H$  иногда используется цепочка эквивалентных представлений:

$$x_H \Leftrightarrow r(x), r \in [0; 1] \Leftrightarrow (\underline{r}(x), \overline{r}(x)) | \underline{r}, \overline{r} \in [0; 1] \Leftrightarrow (r_L(x), r_R(x)) | r_L, r_R \in [0; 1] \Leftrightarrow (\underline{x}(r), \overline{x}(r)) | r \in [0; 1],$$

где  $\underline{x}(\cdot)$ ,  $\overline{x}(\cdot)$  — обратные отображения соответственно для  $\underline{r}(x)$ ,  $\overline{r}(x)$ .

**1.2. Нечеткие числа.** В зависимости от формы  $r(x)$  различают следующие типы нечетких чисел:

- (i) нечеткое "треугольное" число  $x_H$ ;
- (ii) нечеткое "обобщенное" число  $u_H$ ;
- (iii) нечеткое "сильное" (strong — англ.) число  $u_H$ ;

- (iv) нечеткое "слабое" (weak — англ.) число  $\delta_H$ ;
- (v) нечеткое "одиночное" (singleton — англ.) число.

(i) **Нечеткое "треугольное" число**  $x_H$  определяется посредством трех чисел  $a_1 < a_2 < a_3$ ,  $a_i \in R_1$ ,  $i = \overline{1, 3}$ . График  $r(x)$  для  $x_H$  в координатной плоскости  $(x, r)$  имеет форму треугольника с основанием  $\text{supp } x_H = [a_1, a_3]$ , а высота его исходит из точки с координатами  $(x = a_2, r = 0)$ . Для  $x_H$  в этом случае приняты следующие эквивалентные обозначения:

$$x_H = (a_1|a_2|a_3) \Leftrightarrow (\underline{r}(x) = (x - a_1)(a_2 - a_1)^{-1}, \overline{r}(x) = (-x + a_3)(a_3 - a_2)^{-1} | r \in [0; 1]) \Leftrightarrow (\underline{x}(r) = (a_2 - a_1)r + a_1, \overline{x}(r) = (a_2 - a_3)r + a_3 | r \in [0; 1]),$$

т. е. зависимости  $\underline{r}(\cdot)$ ,  $\overline{r}(\cdot)$ ,  $\underline{x}(\cdot)$ ,  $\overline{x}(\cdot)$  являются линейными. Полагают, что если  $a_1 \geq 0$ , то  $x_H \geq 0$ ; если  $a_3 \leq 0$ , то  $x_H \leq 0$ .

(ii) **Нечеткое "обобщенное" число**  $y_H$  определяется аналогично числу  $x_H$  (п. (i)), но отличается от него кусочно-нелинейным типом зависимости  $r(y)$ . Относительно  $r(y)$  полагается выполнение следующих свойств:

- $r(y)$  полунепрерывна сверху;
- $\underline{r}(y)$  монотонно возрастает;
- $\overline{r}(y)$  монотонно убывает;
- для обратных отображений  $\underline{y}(r) \leq \overline{y}(r)$ .

Для нечеткого "треугольного" числа все эти свойства выполняются, так как  $r(x)$  является кусочно-линейной зависимостью, поэтому очевидно, что  $r(y)$  является обобщением  $x_H$ .

Если хотя бы одно из перечисленных выше свойств относительно  $r(y)$  не выполняется, то  $y_H$  не является нечетким числом. В частности, если  $r(y)$  имеет в основании один из углов больше  $90^\circ$ , то такое  $y_H$  не является нечетким числом.

(iii) **Нечеткое "сильное" число**  $u_H$  имеет функцию принадлежности  $r(u)$  всегда с острыми углами при ее основании. В этом случае оно совпадает с  $x_H$  или с  $y_H$ .

(iv) **Нечеткое "слабое" число**  $\delta_H$  появляется в случае, когда один из углов в основании функции принадлежности  $r(\delta)$  больше  $90^\circ$ . В этом случае  $\delta_H$  формально не является нечетким числом, так как относительно  $r(\delta)$  не выполняется свойство  $\underline{\delta}(r) \leq \overline{\delta}(r)$ . Тогда используется следующая модификация нечеткого числа:

$$\delta_H = (\min\{\underline{\delta}(r), \overline{\delta}(r), \delta(r = 1)\}, \max\{\underline{\delta}(r), \overline{\delta}(r), \delta(r = 1)\} | r \in [0; 1]),$$

которую принято называть "слабое" нечеткое число. Возникновение этих чисел связано с различными нелинейными преобразованиями над "сильными" числами. Эта ситуация возникает при решении нечетких линейных систем алгебраических уравнений [12], нечетких нелинейных дифференциальных уравнений [13] и т. д.

(v) **Нечеткое "одиночное" число**  $z_H$  возникает в случае необходимости представления четкого числа

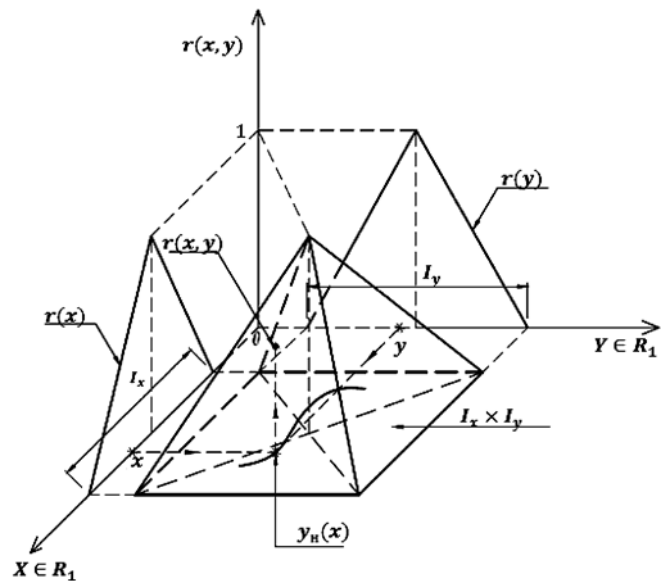


Рис. 1.1. Нечеткая функция  $y_H(x)$

в нечетких терминах. Функция принадлежности  $r(z)$  имеет вид

$$r(z) = \text{singl}(t - z) = \begin{cases} 1, & t = z; \\ 0, & t \neq z; \end{cases} \quad t, z \in R_1$$

или возможно эквивалентное представление

$$z_H = (\underline{z}(r) = \overline{z}(r) | r \in [0; 1]).$$

**1.3. Нечеткая функция (отображение)  $y_H(x)$ .** Это отображение нечеткой области (множества)  $X$  в нечеткую область (множество) значений  $Y$  с функцией принадлежности  $r_{y_H}(x)$

$$X \ni x \xrightarrow{r_{y_H}(x)} y \in Y,$$

где  $x = (x_1, \dots, x_n)$ ,  $y = (y_1, \dots, y_n)$ .

Отображение  $y_H(x)$  определяет нечеткую вектор-функцию векторного аргумента. При  $x = (x_1, \dots, x_n)$ ,  $y = y_1$  отображение определяет нечеткую функцию многих переменных, а при  $x = x_1$ ,  $y = y_1$  отображение  $y_H(x)$  определяет нечеткую функцию одного переменного. На рис. 1.1 изображена нечеткая функция  $y_H(x)$  с функцией принадлежности  $r_{y_H}(x \equiv r(x, y))$ .

## 2. Нечеткие вычисления

### 2.1. Арифметические операции $*$ (" $+$ "; " $-$ "; " $\times$ "; " $:$ ").

Эти операции трактуются как специальный тип отображения  $f$  нечетких множеств  $A_1, \dots, A_n$  с  $n$ -мерной функцией принадлежности  $r_A(x_1, \dots, x_n)$  — принцип расширения в нечеткое множество  $B$ :

$$\begin{aligned} f: A = A_1 \times \dots \times A_n \xrightarrow{r_A(x_1, \dots, x_n)} B &\Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow r_B(y) = f(r_A(x_1, \dots, x_n)) &= \sup_{\substack{y = f(x_1, \dots, x_n) \\ A = A_1 \times \dots \times A_n}} r_A(x_1, \dots, x_n) = \\ &= \sup_{y = f(x_1, \dots, x_n)} \min(r_{A_1}(x_1), \dots, r_{A_n}(x_n)). \end{aligned} \quad (2.1)$$

В частности, для двух треугольных нечетких чисел  $x_{1Н}$ ,  $x_{2Н}$  имеем

$$\begin{aligned}
 y_H &= x_{1H} * x_{2H} \Leftrightarrow r_B(y) = \\
 &= \max_{y_H = x_{1H} * x_{2H}} \min(r_{A_1}(x_1), r_{A_2}(x_2)) \Leftrightarrow r_B(y) = \\
 &= \begin{cases} \sum_i r_{A_1}(x_{1i}) | r_B(y_i) = r_{A_1}(x_{1i}) * r_{A_2}(x_{2i}), A_1, A_2 - \\ \text{дискретные нечеткие множества;} \\ \int r_{A_1}(x_1) | r_B(y) = r_{A_1}(x_1) * r_{A_2}(x_2), A_1, A_2 - \\ \text{непрерывные нечеткие множества,} \end{cases} \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

где  $\sum, \int$  — символы представления нечеткого числа  $r_B(y)$  в виде объединения пар  $\{r_{A_1}(x_1) | r_B(y)\}$ .

При задании нечетких треугольных чисел в форме  $x_{1Н} = (a_{11} | a_{12} | a_{13})$ ,  $x_{2Н} = (a_{21} | a_{22} | a_{23})$  арифметические операции "\*" для них определяются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 x_H &= x_{1H} * x_{2H} = \\
 &= (a_1 = a_{11} * a_{21} | a_2 = a_{12} * a_{22} | a_3 = a_{13} * a_{23}). \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

**Пример 2.1.** Имеем:

$$\begin{aligned}
 x_{1Н} &= r_{A_1=5}(x) = \max(1 - 0,5|x - 5|; 0) \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow x_{1Н} = (a_{11} = 3 | a_{12} = 5 | a_{13} = 7); \\
 x_{2Н} &= r_{A_2=2}(x) = \max(1 - |x - 2|; 0) \Leftrightarrow \\
 &\Leftrightarrow x_{2Н} = (a_{21} = 1 | a_{22} = 2 | a_{23} = 3),
 \end{aligned}$$

тогда в соответствии с формулой (2.3), например, для операции "+" получим:

$$\begin{aligned}
 x_H &= (a_1 | a_2 | a_3) = (a_1 = a_{11} + a_{21} = 3 + 1 = 4 | a_2 = \\
 &= a_{12} + a_{22} = 5 + 2 = 7 | a_3 = a_{13} + a_{23} = 7 + 3 = 10).
 \end{aligned}$$

Аналогичный результат следует из формулы (2.2)

$$\begin{aligned}
 r_B(y) &= \int r_{A_1=5} | r_B(y) = r_{A_1=5}(x) + r_{A_2=2}(x) = \\
 &= \max\left(1 - \frac{1}{3}|y - 7|; 0\right).
 \end{aligned}$$

Найдем результат операции "+" из (2.1). Он получается из геометрических построений с использованием пошаговых процедур для треугольных функций принадлежности.

**Шаг 1.** В плоскости с  $(x_1, x_2)$  строится множество  $A = A_1 \times A_2$ , где "×" — символ декартового произведения;  $A_1 = x_{1Н} = r_{A_1=5}(x_1)$ ,  $A_2 = x_{2Н} = r_{A_2=2}(x_2)$ , и затем в координатах  $(x_1, x_2, r_A(x_1, x_2))$  строится соответствующая пирамида П как результат взаимного пересечения двух треугольных цилиндров с основаниями соответственно  $r_{A_1=5}(x)$  и  $r_{A_2=2}(x)$ .

**Шаг 2.** Строится  $\min_{y_H = x_1 * x_2} (r_{A_1=5}(x_1) + r_{A_2=2}(x_2))$ . Для этого проводится плоскость

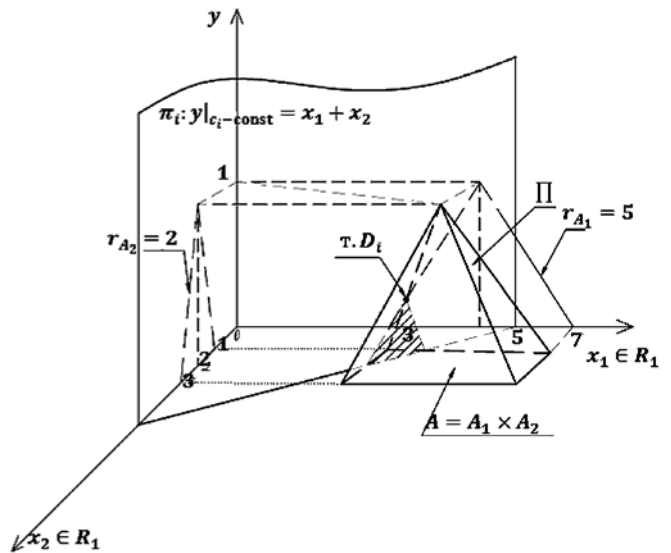


Рис. 2.1. Построение  $\min_{x_1+x_2=c_i} (r_{A_1=5}(x_1), r_{A_2=2}(x_2)) - \tau. D_i$

$\pi_i: y | c_i = \text{const} = x_1 + x_2$ . В результате ее пересечения с пирамидой П получим треугольник (заштрихованная фигура на рис. 2.1), тогда точка  $D_i \in \pi_i$  и также  $D_i \in \Pi$ , поэтому она определяет  $\min_{x_1+x_2=c_i} (r_{A_1=5}(x_1) + r_{A_2=2}(x_2))$ . Так как заштрихованная фигура является треугольником, то проекция  $D_i$  на плоскости  $yOx_1, yOx_2$  и затем проекция на ось "y" совпадают. В общем случае они не совпадают.

**Шаг 3.** Через точку  $D_i$  проводятся горизонтальные плоскости, тогда на плоскости  $x_1Ox_2$  при различных  $c_i = \text{const}$  получаются изокривые:

$$\begin{aligned}
 \min_{x_1+x_2=c_i} (r_{A_1=5}(x_1) + r_{A_2=2}(x_2)), \\
 i = \overline{1, k} \text{ (рис. 2.2)}.
 \end{aligned}$$

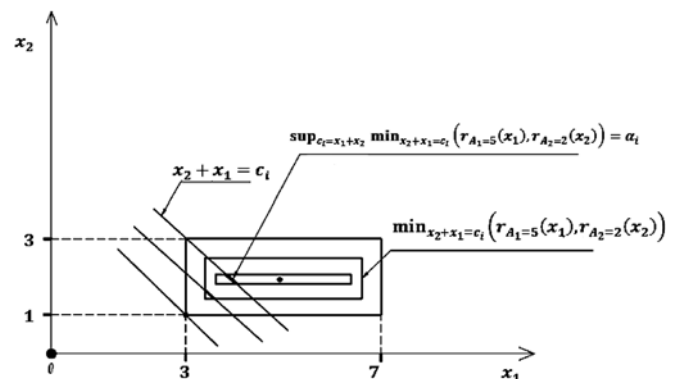


Рис. 2.2. Построение совокупности  $\{r_B = \alpha_i; x_1 + x_2 = c_i\}$  при сложении нечетких множеств  $B = A_1 + A_2 \Leftrightarrow r_B(y) = \Leftrightarrow r_{A_1}(x) + r_{A_2}(x)$

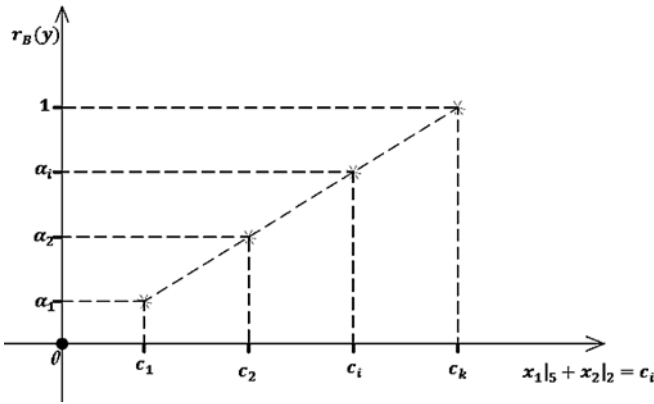


Рис. 2.3. Функция принадлежности суммы  $r_B(y)$  двух нечетких чисел  $r_{A_1=5}(x)$ ,  $r_{A_2=2}(x)$

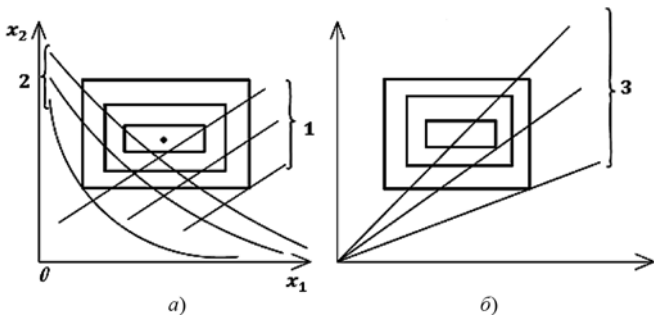


Рис. 2.4. Изокривые при вычитании  $B = A_1 - A_2$  (1) и умножении  $B = A_1 \cdot A_2$  (2) (а); при делении  $B = A_1 : A_2$  (3) (б)

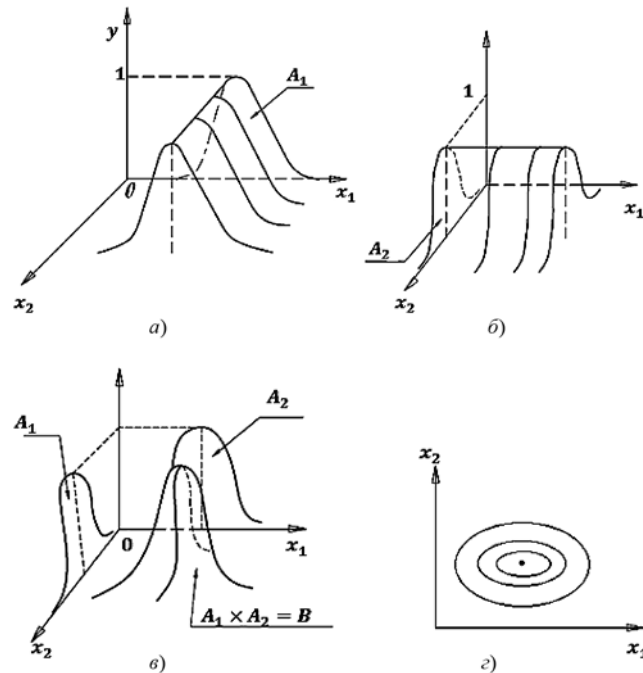


Рис. 2.5. Последовательность построения из кривых: цилиндр  $A_1$  (а), цилиндр  $A_2$  (б); декартово произведение  $B = A_1 \times A_2$  (в); изокривые (г)

**Шаг 4.** В плоскости  $x_1 0 x_2$  строятся зависимости

$$y|_{c_1} = x_1 + x_2 \Leftrightarrow x_2 = c_1 - x_1, \dots, y|_{c_k} = x_1 + x_2 \Leftrightarrow x_2 = c_k - x_1,$$

которые определяют семейство параллельных прямых с отрицательным углом наклона. Их пересечение с изокривыми определяют  $\sup_{y|_{c_1=x_1+x_2}} \min(r_{A_1=5}(x_1), r_{A_2=2}(x_2))$ . В результате будем иметь совокупность точек с координатами  $\{r_B = \alpha_i; y|_{c_1} = x_1 + x_2\}$ ,  $\alpha \in [0; 1]$ , которая в дискретной (поточечной) форме определит  $B = A_1 + A_2 \Leftrightarrow r_B(y) = r_{A_1=x_1}(x) + r_{A_2=x_2}(x)$  (рис. 2.3). Нетрудно проверить, что при  $A_1 = 5, A_2 = 2$  получим результаты, аналогичные выражениям (2.2), (2.3).

Выше принцип расширения (2.1) был реализован для операции "+". Аналогичные рассуждения и построения справедливы для операций "-", "x", ":". Отличие от предыдущих построений состоит в типах зависимостей на шаге 4 (рис. 2.4, а, б):

$y|_{c_i} = x_1 - x_2 \Leftrightarrow x_2 = c_i - x_1, c_i = \text{const}, i = \overline{1, k}$ , — семейство параллельных прямых с положительным углом наклона;

$$y|_{c_i} = x_1 \times x_2 \Leftrightarrow x_2 = c_i/x_1 \text{ — семейство гипербол;}$$

$y|_{c_i} = x_1 : x_2 \Leftrightarrow x_2 = c_i/x_1$  — семейство прямых, выходящих из начала координат.

Геометрическими построениями можно показать, что результирующая функция принадлежности для операций "x", ":" с треугольными функциями принадлежности будет иметь итоговую функцию принадлежности, отличную от треугольной формы.

**Замечание.** При наличии треугольной функции принадлежности и элементарных операций "+", "-", "x", ":" получение результирующей функции принадлежности является относительно тривиальной операцией.

При наличии более сложных исходных функций принадлежности не всегда удается получить аналитические решения для результирующей функции принадлежности. Это обусловлено вычислением декартового произведения пространств. На рис. 2.5, а–г приведена последовательность построения изокривых для

$$r_{A_1}(x_1) = \exp[-k(x_1 - a)^2],$$

$$r_{A_2}(x_2) = \exp[-k(x_2 - b)^2].$$

**2.2. Отношения порядка** (операции сравнения " $\geq$ ", " $\leq$ "). Это отношение следует из определения [12]:

имеем нечеткие числа  $x_{1H}, x_{2H}$ , такие что  $x_{iH} = (\underline{x}_i(r), \bar{x}_i(r)|r \in [0; 1])$ ,  $i = 1, 2$ , тогда  $x_{1H} \leq x_{2H}$ , если  $T(x_{1H}) = \int_0^1 r[\underline{x}_1(r) + \bar{x}_1(r)]dr \leq \int_0^1 r[\underline{x}_2(r) + \bar{x}_2(r)]dr = T(x_{2H})$ .

### 2.3. Банахово пространство нечетких чисел [15].

Помимо принципа расширения, который был применен для определения операций в п. 2.1, в теории нечетких множеств широко используется подход, принятый в функциональном анализе при введении банахового пространства [16]. Для этого в совокупности  $\{x_{iH}\} = X$  нечетких чисел задаются операции:

- сложения (+) элементов  $x_{iH} \in X$  и  $x_{jH} \in X$  в виде  $x_{iH} + x_{jH} = (\underline{x}_i(r) + \underline{x}_j(r), \bar{x}_i(r) + \bar{x}_j(r)|r \in [0; 1])$ ;
- умножения ( $\times$ ) элемента  $x_{iH} \in X$  на скаляр  $k \in R_1$  по правилу

$$k \times x_{iH} = \begin{cases} (k \times \underline{x}_i(r), k \times \bar{x}_i(r)|r \in [0; 1]), & k \geq 0; \\ (k \times \bar{x}_i(r), k \times \underline{x}_i(r)|r \in [0; 1]), & k < 0; \end{cases}$$

- существования у  $x_{iH}$  обратного элемента  $x_{kH}$ , такого что  $x_{iH} + x_{kH} \equiv 0 \Leftrightarrow r_k(x) = r_i(-x)$ . Здесь "0" — четкий ноль, имеющий одиночную функцию принадлежности (п. 1.2(v)).

Очевидно, что относительно "+" и " $\times$ " выполняются следующие аксиомы (свойства):

- коммутативность "+", т. е.  $x_{iH} + x_{jH} = x_{jH} + x_{iH}$ ;
- ассоциативность "+", т. е.  $(x_{iH} + x_{jH}) + x_{kH} = x_{iH} + (x_{jH} + x_{kH})$ ;
- дистрибутивность " $\times$ ", т. е.  $(k_1 + k_2) \times x_{iH} = k_1 \times x_{iH} + k_2 \times x_{iH}$ ,  $k \times (x_{iH} + x_{jH}) = k \times x_{iH} + k \times x_{jH}$ .

Совокупность  $\{x_{iH}\} \in X$  нечетких чисел с операциями "+" и " $\times$ " для нечетких чисел и существование обратного элемента в  $X$  образует векторное (линейное) пространство  $X$ . В векторном пространстве  $X$  определим метрику  $\rho_1$

$$\rho_1(x_{iH}, x_{jH}) = \sup_r \{\max[|\underline{x}_i(r) - \underline{x}_j(r)|, |\bar{x}_i(r) - \bar{x}_j(r)|]\} \quad (2.4)$$

между элементами  $x_{iH}, x_{jH} \in X$ , которая является некоторой скалярной функцией, удовлетворяющей очевидным свойствам:

- $\rho_1(x_{iH}, x_{jH}) = 0 \Leftrightarrow x_{iH} = x_{jH}$ ;
- $\rho_1(x_{iH}, x_{jH}) = \rho_1(x_{jH}, x_{iH})$ ;
- $\rho_1(x_{iH}, x_{jH}) \leq \rho_1(x_{iH}, x_{kH}) + \rho_1(x_{kH}, x_{jH})$ .

Введенная метрика  $\rho_1(\cdot)$  превращает векторное пространство  $X$  в метрическое векторное пространство. Определим норму в виде

$$\|x_{iH} - x_{jH}\| = \rho_1(x_{iH}, x_{jH}).$$

Введем понятие сходимости нечеткой последовательности  $x_{nH}$  (предельный переход) из нечетких

чисел со свойствами для последовательности нечеткой фундаментальности и нечеткой полноты:

- $\rho_1(x_{nH}, x_{mH})_{n, m \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \Rightarrow x_{nH}$  — нечеткая фундаментальная последовательность (нечеткая последовательность Коши);
- $x_{nH} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x$ :  $x \in X$  — нечеткое полное метрическое пространство.

Таким образом, в результате имеем нечеткое пространство  $\{x_{iH}\} \in X$  с операциями "+,  $\times$ , -" в нем, метрикой  $\rho_1(\cdot)$  и существованием нечетких фундаментальной и полной последовательностей  $x_{nH} \in X$ . Это приводит к банаховому пространству нечетких переменных  $(X, \rho_1)$ .

В теории нечетких множеств при введении нечетких пространств используются различные типы метрик Хаусдорфа (Hausdorff) [5]:

- верхняя полуметрика Хаусдорфа

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_H^2(x_{iH}, x_{jH}) &= \sup_{x_{jH}} \inf_{x_{iH}} \|x_i(r) - x_j(r)\|_{E_2}^2 = \\ &= \sup_{x_{jH}} \left\{ \int_0^1 [\bar{x}_j(r) - \bar{x}_i(r)]^2 dr \right\} = \int_0^1 [\bar{x}_j(r) - \bar{x}_i(r)]^2 dr; \end{aligned}$$

- нижняя полуметрика Хаусдорфа

$$\begin{aligned} \underline{\rho}_H^2(x_{iH}, x_{jH}) &= \sup_{x_{iH}} \inf_{x_{jH}} \|x_i(r) - x_j(r)\|_{E_2}^2 = \\ &= \sup_{x_{iH}} \left\{ \int_0^1 [\underline{x}_j(r) - \underline{x}_i(r)]^2 dr \right\} = \int_0^1 [\underline{x}_j(r) - \underline{x}_i(r)]^2 dr; \end{aligned}$$

- метрика Хаусдорфа

$$\begin{aligned} \rho_H^2(x_{iH}, x_{jH}) &= \max\{\bar{\rho}_H^2(\cdot), \underline{\rho}_H^2(\cdot)\} = \\ &= \{\bar{\rho}_H^2(\cdot) + \underline{\rho}_H^2(\cdot)\} = \\ &= \left\{ \int_0^1 [|\underline{x}_j(r) - \underline{x}_i(r)|^2 + |\bar{x}_j(r) - \bar{x}_i(r)|^2] dr \right\}. \end{aligned}$$

Последняя формула обычно преобразуется путем возведения в квадрат и группировки членов к виду

$$\rho_H(x_{iH}, x_{jH}) = \langle x_i(r), x_i(r) \rangle - 2 \langle x_i(r), x_j(r) \rangle + \langle x_j(r), x_j(r) \rangle, \quad (2.5)$$

где

$$\begin{aligned} \langle x_i(\cdot), x_i(\cdot) \rangle &= \int_0^1 [\underline{x}_i^2(\cdot) + \bar{x}_i(\cdot)] dr; \\ \langle x_i(\cdot), x_j(\cdot) \rangle &= \int_0^1 [\underline{x}_i(\cdot) \cdot \underline{x}_j(\cdot) + \bar{x}_i(\cdot) \cdot \bar{x}_j(\cdot)] dr; \\ \langle x_j(r), x_j(r) \rangle &= \int_0^1 [\underline{x}_j^2(\cdot) + \bar{x}_j(\cdot)] dr. \end{aligned}$$

После аналогичных рассуждений, которые были проведены выше для (2.4), появляется банахово пространство нечетких переменных  $(X, \rho_H)$  с метрикой Хаусдорффа  $\rho_H$  (2.5).

Другой способ задания метрики, обозначаемой  $\rho_P(y_{iH}, y_{jH})$ , состоит в представлении ее соотношением

$$\rho_P(y_{iH}, y_{jH}) = \max \left\{ \left[ \int_0^1 |\underline{y}_i(x, r) - \underline{y}_j(x, r)|^P dr \right]^{1/P}, \left[ \int_0^1 |\bar{y}_i(x, r) - \bar{y}_j(x, r)|^P dr \right]^{1/P} \right\}, \quad (2.6)$$

где  $\underline{y}_i, \bar{y}_i, \underline{y}_j, \bar{y}_j \in L_P[0; 1]$ , для  $\forall x \in I \subset R_1$ .

Пара  $(X, \rho_P)$  также задает банахово пространство.

Заметим, что, задавая различным способом метрики в векторном пространстве  $X$  нечетких переменных, можно получить нечеткие метрические пространства различной структуры. Например, можно задать  $\rho_x(\cdot) = \rho(\cdot) \cdot [1 + \rho(\cdot)]^{-1}$ , где  $\rho(\cdot)$  определяются по формулам (2.4), (2.5) или (2.6). Покажем на примере задания  $\rho(\cdot)$  по (2.4) выполнение для  $\rho_x(\cdot)$  соответствующих аксиом. Выполнение первых двух аксиом для  $\rho_x(\cdot)$  очевидно. Для аксиомы неравенства треугольников имеем:

$$\begin{aligned} \rho_x(\cdot) &= \rho(\cdot) \cdot [1 + \rho(\cdot)]^{-1} \leq \\ &\leq [\rho(\cdot) + \rho(\cdot)][1 + \rho(\cdot)]^{-1} = \\ &= \rho(\cdot) \cdot [1 + \rho(\cdot)]^{-1} + \rho(\cdot)[1 + \rho(\cdot)]^{-1} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \rho_x(x_{iH}, x_{kH}) \leq \rho_x(x_{iH}, x_{jH}) + \rho_x(x_{jH}, x_{kH}). \end{aligned}$$

### 3. Типы нечетких производных [13]

Пусть для простоты имеем нечеткую функцию одного переменного

$$y_H(x) \equiv y(x, r), \quad x, y \in R_1, \quad r \in [0; 1],$$

$$\text{т. е. } y_H(x) = (\underline{y}(x, r), \bar{y}(x, r)|r \in [0; 1]),$$

которая при любом  $x \in I \subset R_1$  определяет нечеткое треугольное число. Согласно общему подходу при определении производной от некоторой функции в заданном пространстве необходимо в нем задать операции "−" (вычитание), "×" (умножение) на константу и "lim" (предельный переход относительно заданной метрики). Применение этого общего подхода к различным метрическим пространствам приводит к разнообразным нечетким производным.

**3.1. Производная Гостшела — Воксмана (GV, Goestshel — Voxman derivative)  $\dot{y}_H^{GV}(x)$ .** Для нее метрика задается по формуле (2.4), и соответ-

ствующая производная в точке  $x = x_0$  определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{y}_H^{GV}(x = x_0) &= \lim_{\rho_1 \rightarrow 0} \rho_1(y_{iH}, y_{jH}) \Big|_{\substack{y_{iH} = h^{-1}y_H(x_0 + h) \\ y_{jH} = h^{-1}y_H(x_0)}} = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \left[ \frac{y_{iH}(x_0 + h) - y_{iH}(x_0)}{h} \right] \end{aligned}$$

при условии, что соответствующий предел (lim) существует в заданной метрике.

Операция вычитания для элементов  $y_{iH}(x_0 + h) = (\underline{y}_i(x_0 + h, r), \bar{y}_i(x_0 + h, r)|r \in [0; 1])$ ,  $y_{iH}(x_0) = (\underline{y}_i(x_0, r), \bar{y}_i(x_0, r)|r \in [0; 1])$ , которые находятся под знаком "lim", задается в виде

$$\begin{aligned} y_{iH}(x_0 + h) - y_{iH}(x_0) &= (\underline{y}_i(x_0 + h, r) - \\ &- \bar{y}_i(x_0, r), \bar{y}_i(x_0 + h, r) - \underline{y}_i(x_0, r)|r \in [0; 1]). \end{aligned}$$

Это обусловлено тем, что первая разность задает "min", а вторая разность задает "max" в скобке справа от знака равенства. Заметим здесь, что стандартная операция вычитания, согласно принципу расширения (п. 2.1.), задается в виде

$$\begin{aligned} y_{iH}(x_0 + h) - y_{iH}(x_0) &= (\underline{y}_i(x_0 + h, r) - \\ &- \underline{y}_i(x_0, r), \bar{y}_i(x_0 + h, r) - \bar{y}_i(x_0, r)|r \in [0; 1]), \end{aligned}$$

которая отличается от этой операции при определении GV-производной.

Если  $\dot{y}_H^{GV}(x)$  существует при  $x \in I \subset R_1$ , то  $\dot{y}_H^{GV}(x) = (\dot{\underline{y}}_x(x, r), \dot{\bar{y}}_x(x, r)|r \in [0; 1])$ , однако  $\dot{y}_H^{GV}(x = x_*)$  не существует, если при  $x = x_*$  соответствующее число не является нечетким, т. е. не выполняется хотя бы одно из свойств, перечисленных в п. 1.2, или не определена операция вычитания под знаком "lim".

**3.2. Производная Сейккалы (S, Seikkala derivative)  $\dot{y}_H^S(x)$ .** Определяется следующим образом. Если  $(\dot{\underline{y}}_x(x, r), \dot{\bar{y}}_x(x, r)|r \in [0; 1])$  задает нечеткое число для любого  $x$ , то  $\dot{y}_H(x)$  существует и равна  $\dot{y}_H^S(x) = (\dot{\underline{y}}_x(x, r), \dot{\bar{y}}_x(x, r)|r \in [0; 1])$ .

**3.3. Производная Дубоиса — Праде (DP, Dubois — Prade derivative)  $\dot{y}_H^{DP}(x)$ .** Эта производная всегда существует для любого  $x$ , так как если при  $x = x_*$  соответствующее число не является нечетким, т. е. производная не существует, то путем соответствующей модификации его функции принадлежности оно превращается в "слабое" нечеткое число (п. 1.2. (iv)),



и тогда в этой точке уже существует  $\dot{y}_H^{DP}(x = x_*)$ .  
Функция принадлежности задается в виде

$$r_{\dot{y}_H^{DP}}(x) = \sup\{r/x = \underline{y}_x(x, r), x = \bar{y}(x, r)\}.$$

**3.4. Производная Пури — Ралеску (PR, Puri — Ralescu derivative)  $\dot{y}_H^{PR}(x)$ .** Метрика в этом случае задается по Хаусдорффу (2.5), и соответствующая производная в точке  $x = x_0$  определяется выражением

$$\dot{y}_H^{PR}(x = x_0) = \lim_{\rho_H \rightarrow 0} \rho_H(y_{iH}, y_{jH}),$$

$\rho_H(\cdot)$  — метрика Хаусдорффа. Операция вычитания под знаком "lim" задается посредством процедуры "\*" Хукухары (Hukuhara) для нечетких множеств  $A, B$ :  $B \underset{*}{-} A = C$ , где  $C$  — нечеткое множество:  $C + A = B$ .

Дифференцируемость в точке  $x = x_0 \in I \subset R_1$  нечеткой функции  $y_H(x)$  по Пури — Ралеску определяется в виде

$$\begin{aligned} \dot{y}_H^{PR}(x = x_0) &= \lim_{h \rightarrow 0^+} h^{-1} \cdot [y_H(x_0 + h) \underset{*}{-} y_H(x_0)] = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0^+} h^{-1} \cdot [y_H(x_0) \underset{*}{-} y_H(x_0 + h)]. \end{aligned}$$

Оба предела взяты по метрике Хаусдорффа  $\rho_H(\cdot)$  (2.5).

**3.5. Производная Кэндела — Фридмана — Минга (KFM, Kandel — Friedman — Ming derivative)  $\dot{y}_H^{KFM}(x)$ .** Метрика  $\rho_P(\cdot)$  задается формулой (2.6). Производная в точке  $x = x_0 \in I \subset R_1$  нечеткой функции определяется формулой

$$\lim_{h \rightarrow 0} \rho_P(h^{-1}(y_H(x_0 + h) - y_H(x_0)), \dot{y}_H^{KFM}(x_0)) = 0,$$

где операция вычитания задается в виде аналогичной операции для производной по п. 3.1. Если производная Кэндела — Фридмана — Минга существует, то  $\dot{y}_H^{KFM}(x) = (\underline{y}_x(x, r), \bar{y}(x, r) | r \in [0; 1])$ .

**3.6. Взаимосвязь нечетких производных** определяется следующей теоремой (без доказательства).

**3.6.1.** Если  $\dot{y}_H^{GV}(x)$  существует (п. 3.1) и является нечетким числом для каждого  $x \in I \subset R_1$ , то  $\dot{y}_H^S(x)$  существует и справедливо равенство  $\dot{y}_H^{GV}(x) = \dot{y}_H^S(x)$ .

**3.6.2.** Если  $\dot{y}_H^{PR}(x)$  существует (п. 3.3), то  $\dot{y}_H^S(x)$  существует (п. 3.2) и для них справедливо равенство:  $\dot{y}_H^{PR}(x) = \dot{y}_H^S(x)$ .

**3.6.3.** Если  $\dot{y}_H^{KFM}(x)$  существует (п. 3.5), то  $\dot{y}_H^S(x)$  существует и справедливо:  $\dot{y}_H^{KFM}(x) = \dot{y}_H^S(x)$ .

**3.6.4.** Если  $\dot{y}_H^S(x)$  существует (п. 3.2) и если  $\underline{y}_x(x, r), \bar{y}_x(x, r)$  непрерывны по "r" для  $\forall x \in I \subset R_1$ , то  $\dot{y}_H^S(x) = \dot{y}_H^{DP}(x)$ .

**Условие непрерывности.** Если  $\underline{y}_{iH}, \bar{y}_{iH}$  непрерывны на  $I \times [0; 1]$ , то это означает, что  $\dot{y}_{iH}(x)$  непрерывна.

**Теорема о взаимосвязи производных** (без доказательства). Если выполнено условие непрерывности и  $\dot{y}_H^S(x)$  существует, то имеет место цепочка равенства производных;

$$\begin{aligned} \dot{y}_H^S(x) &= \dot{y}_H^{DP}(x) = \dot{y}_H^{GV}(x) = \\ &= \dot{y}_H^{PR}(x) = \dot{y}_H^{KFM}(x) = \dot{y}_H(x), \end{aligned} \quad (3.1)$$

т. е. все введенные ранее производные (п.п. 3.1—3.5) равны между собой.

**Пример.** Имеем  $y_H(x) = (-x \cdot \sqrt{1-r}, x \cdot \sqrt{1-r} | r \in [0; 1]) \Rightarrow \dot{y}_H(x, r) = (\frac{\partial}{\partial x} \underline{y}(x, r), \frac{\partial}{\partial x} \bar{y}(x, r) | r \in [0; 1]) = (-1 \cdot \sqrt{1-r}, 1 \cdot \sqrt{1-r} | r \in [0; 1])$ .

### Заключение

- Даны основные определения теории нечетких множеств: функция принадлежности; нечеткие числа разных типов; нечеткая функция.
- Определены арифметические операции и отношение порядка для нечетких чисел и дана их геометрическая интерпретация, принятая в теории нечетких множеств. Показано, что совокупность нечетких чисел с заданными различными способами метриками в этой совокупности образуют банахово пространство.
- Рассмотрен общий подход в определении нечеткой производной, определяемый способами задания операции вычитания и предельного перехода в различных нормах. Согласно этому подходу рассмотрены пять нечетких производных, которые наиболее часто используются в теории нечетких множеств при задании нечетких дифференциальных уравнений. Сформулировано утверждение об эквивалентности представленных нечетких производных.

## Список литературы

1. **Афанасьев В. Н., Колмановский В. Б., Носов В. Р.** Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высшая школа, 2003.
2. **Брайсон А., Хо Ю-Ши.** Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972.
3. **Сю Д., Мейер А.** Современная теория автоматического управления и ее применение. М.: Машиностроение, 1972.
4. **Мочалов И. А., Петрунин Н. Г.** Практикум по нечетким методам в задачах управления. М.: Изд. Российского университета дружбы народов, 2006.
5. **Мочалов И. А., Петрунин Н. Г., Редькин А. С., Цегельский С. В.** Нечеткие вероятностно-статистические методы // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2003. № 4. С. 1—24.
6. **Иванов В. А., Медведев В. С.** Математические основы теории оптимального и логического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
7. **Деменков Н. П.** Языки программирования промышленных контроллеров. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
8. **Kandel A., Byatt W. J.** Fuzzy process // Fuzzy sets and systems. 1980. N. 4. P. 117—157.
9. **Puri M. L., Ralescu D. A.** Fuzzy random variables // Journal of mathematical application. 1986. N. 4. P. 409—422.
10. **Jahery S. M., Behboodian J. A.** Bayesian approach to fuzzy hypotheses testing // Fuzzy sets and systems, 2001. N. 123. P. 39—48.
11. **Kim B., Bishu R. R.** Evaluation of fuzzy linear regression models by comparing membership functions // Fuzzy sets and systems, 1998. N. 100. P. 343—352.
12. **Friedman M., Ming M., Kandel A.** Fuzzy linear systems // Fuzzy sets and systems, 1998. N. 96. P. 201—209.
13. **Buckley J. J., Feuring J.** Fuzzy differential equations // Fuzzy sets and systems, 2000. N. 110. P. 43—54.

**I. A. Mochalov**, Professor, Bauman Moscow State Technical University,  
**M. S. Khrisat**, Graduate Student of Russian Peoples' Friendship University, e-mail: mohd.khrisat@fet.edu.jo,  
**M. Ya. Shihab Eddin**, Graduate Student, Russian Peoples' Friendship University

## Fuzzy Differential Equations in Control. Part I

*Presents the basic definitions and the theory of fuzzy sets they are further used to describe the theory of fuzzy ordinary differential equations and methods of solving them. For this, we define the membership function as an analogue of the characteristic function of the set theory. Listed species of fuzzy numbers: triangular, generalized, strong, weak, single and identifies the fuzzy vector function; function of several variables; dimensional function. Provides definitions of fuzzy arithmetic operations, as a special type of fuzzy function with its geometric interpretation. Determination of order relations which allow to compare the fuzzy numbers. We introduce the Banach space of fuzzy variables with different metrics. This allows you to define different types of fuzzy derivatives by type of convergence in these metrics. Establish the equivalence of the considered fuzzy derivatives by the wording of the corresponding theorems without proof. And provide examples of calculating the fuzzy derivative for a given fuzzy function.*

*Shows drawings dimensional geometric representation of fuzzy function; the step of constructing the final membership functions for arithmetic operations with fuzzy numbers with given them the membership function. At the end of the article is a list of articles from 13 sources, 5 of which are in English, and the other Russian.*

**Keywords:** fuzzy computation; fuzzy Banach space; fuzzy derivatives

### References

1. **Afanas'ev V. N., Kolmanovskij V. B., Nosov V. R.** *Matematicheskaja teorija konstruirovanija sistem upravlenija*. M.: Vysshaja shkola, 2003.
2. **Brajson A., Ho Ju-Shi.** *Prikladnaja teorija optimal'nogo upravlenija*. M.: Mir, 1972.
3. **Sju D., Mejer A.** *Sovremennaja teorija avtomaticheskogo upravlenija i ee primenenie*. M.: Mashinostroenie, 1972.
4. **Mochalov I. A., Petrunin N. G.** *Praktikum po nechetkim metodam v zadachah upravlenija*. M.: Izd. Rossijskogo universiteta druzhby narodov, 2006.
5. **Mochalov I. A., Petrunin N. G., Red'kin A. S., Cegel'skij S. V.** *Nechetkie verojatnostno-statisticheskie metody. Prilozhenie k zhurnalu "Informacionnye tehnologii"*. 2003. N. 4. P. 1—24.
6. **Ivanov V. A., Medvedev V. S.** *Matematicheskie osnovy teorii optmiarnogonogicheskogo upravlenija*. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2011.
7. **Demencov N. P.** *Jazyki programirovanija promyshlennykh kontrollerov*. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2004.
8. **Kandel A., Byatt W. J.** *Fuzzy process. Fuzzy sets and systems*. 1980. N. 4. P. 117—157.
9. **Puri M. L., Ralescu D. A.** *Fuzzy random variables. Journal of mathematical application*. 1986. N. 4. P. 409—422.
10. **Jahery S. M., Behboodian J. A.** *Bayesian approach to fuzzy hypotheses testing. Fuzzy sets and systems*. 2001. N.123. P. 39—48.
11. **Kim B., Bishu R. R.** *Evaluation of fuzzy linear regression models by comparing membership functions. Fuzzy sets and systems*. 1998. N. 100. P. 343—352.
12. **Friedman M., Ming M., Kandel A.** *Fuzzy linear systems. Fuzzy sets and systems*. 1998. N. 96. P. 201—209.
13. **Buckley J. J., Feuring J.** *Fuzzy differential equations. Fuzzy sets and systems*. 2000. N. 110. P. 43—54.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ MODELING AND OPTIMIZATION

УДК 536.2

**В. С. Зарубин**, д-р техн. наук, проф., e-mail: Zarubin@bmstu.ru,  
**Г. Н. Кувыркин**, проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой, Fn2@bmstu.ru,  
**И. Ю. Савельева**, канд. физ.-мат. наук, доц., Inga.Savelyeva@gmail.com,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

## Иерархическая система математических моделей процесса теплопроводности в композиционном материале

*В рамках иерархического подхода построена многоуровневая система математических моделей композиционного материала (композита), описывающих теплоперенос и тепловое взаимодействие между матрицей композита и армирующими включениями. Эта система использована для сравнительного анализа оценок эффективного коэффициента теплопроводности — одного из основных параметров, определяющих сферу применения конкретного композита. На основе двойственной формулировки вариационной задачи стационарной теплопроводности в неоднородном твердом теле получены двусторонние оценки возможных значений этого коэффициента. Система моделей построена применительно к дисперсно упрочненным композитам с шаровыми включениями. Сопоставление результатов количественного анализа таких моделей с двусторонними оценками позволило сделать выводы о степени адекватности построенных моделей.*

**Ключевые слова:** иерархический подход, математическая модель, композит, шаровые включения, эффективный коэффициент теплопроводности

### Введение

Иерархический подход к математическому моделированию технических систем и устройств предполагает построение нескольких уровней взаимно связанных между собой математических моделей (ММ) [1]. Один из вариантов классификации иерархических уровней ММ включает модели микро-, макро- и метауровней [2], причем последние отнесены к высшему иерархическому уровню. Построение иерархии ММ связано с различной детализацией свойств моделируемого технического объекта (ТО). Сравнение результатов количественного анализа ММ различных иерархических уровней может существенно расширить и обогатить знания об этом ТО. Кроме того, такое сравнение позволяет оценить степень адекватности построенных моделей и достоверность данных их количественного анализа: если более простая ММ правильно отражает некоторые свойства ТО, то результаты исследования этих свойств должны быть близки к результатам, полученным при использовании более полной и поэтому более сложной ММ [3, 4]. Основные этапы реализации указанного подхода применительно к континуальным системам и, в частности, к моделированию термомеханических процессов в таких системах рассмотрены в работах [5, 6].

Особенности иерархического подхода можно проиллюстрировать на примере построения и количе-

ственного анализа системы ММ, описывающих тепловые процессы в композитах, широко используемых в качестве конструкционных и строительных материалов, а также функциональных материалов в различных приборных устройствах. К композитам можно отнести большинство применяемых в технике материалов с неоднородной структурой, состоящих из включений различной формы и связывающей их между собой матрицы.

Среди характеристик, определяющих область применения конкретного композита, важную роль играет его эффективный коэффициент теплопроводности, зависящий от структуры композита, объемной концентрации включений и их теплового взаимодействия между собой и с материалом матрицы, а также от коэффициентов теплопроводности включений и матрицы. В данной работе ограничимся построением ММ для композитов с включениями шаровой формы, которую можно считать некоторой статистически усредненной по отношению к включениям произвольной формы, но имеющим близкие размеры во всех трех направлениях [7]. Форму, близкую к шаровой, имеют некоторые наноструктурные элементы (в том числе фуллерены), рассматриваемые в последнее время как включения для перспективных композитов различного назначения [8].

## Постановка задачи

Выделим в композите некоторый объем  $V^*$ , осреднение в пределах которого свойств матрицы и включений дает представление о характеристиках композита в целом. Такой объем принято называть представительным. Точка  $M \in V^*$  может быть расположена как в матрице, занимающей объем  $V_m^* \subset V^*$ , так и в одном из включений, занимающих объем  $V_0^* = V^* \setminus V_m^*$ . Отношение  $V_0^*/V^*$  определяет объемную концентрацию  $C_0$  включений.

Связь между векторами  $\mathbf{g}(M)$  и  $\mathbf{q}(M)$  соответственно градиента температурного поля и плотности теплового потока устанавливаются соотношения, следующие из гипотезы Био — Фурье [3]:

$$\mathbf{q}(M) = -\Lambda(M)\mathbf{g}(M), \quad \mathbf{g}(M) = -\mathbf{q}(M)/\Lambda(M),$$

где  $\Lambda(M) = \lambda_0$  — коэффициент теплопроводности включений, если  $M \in V_0^*$ , и  $\Lambda(M) = \lambda_m$  — коэффициент теплопроводности материала матрицы, если  $M \in V_m^*$ . После осреднения этих соотношений по объему  $V^*$  запишем

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{q} \rangle &= \frac{1}{V^*} \int \mathbf{q}(M) dV(M) = -\frac{1}{V^*} \int \Lambda(M)\mathbf{g}(M) dV(M) = -\langle \Lambda \mathbf{g} \rangle; \\ \langle \mathbf{g} \rangle &= \frac{1}{V^*} \int \mathbf{g}(M) dV(M) = -\frac{1}{V^*} \int \frac{\mathbf{q}(M)}{\Lambda(M)} dV(M) = -\langle \mathbf{q} / \Lambda \rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

Введем локальные отклонения (флуктуации) от средних значений

$$\mathbf{q}'(M) = \mathbf{q}(M) - \langle \mathbf{q} \rangle \quad \text{и} \quad \mathbf{g}'(M) = \mathbf{g}(M) - \langle \mathbf{g} \rangle, \quad M \in V^*.$$

В линейном приближении примем, что

$$\mathbf{q}'(M) = \hat{Q}(M)\langle \mathbf{q} \rangle \quad \text{и} \quad \mathbf{g}'(M) = \hat{G}(M)\langle \mathbf{g} \rangle, \quad M \in V^*,$$

где  $\hat{Q}(M)$  и  $\hat{G}(M)$  — тензоры второго ранга, зависящие от положения точки  $M \in V^*$ . Учитывая, что средние по объему  $V^*$  флуктуации равны нулю, равенства (1) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{q} \rangle &= (\langle \Lambda \rangle + \langle \Lambda \hat{G} \rangle)\langle \mathbf{g} \rangle = \lambda_1^{\circ} \langle \mathbf{g} \rangle, \\ \langle \mathbf{g} \rangle &= (\langle 1/\Lambda \rangle + \langle \hat{Q}/\Lambda \rangle)\langle \mathbf{q} \rangle = \lambda_2^{\circ} \langle \mathbf{q} \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\lambda_1^{\circ} = (\langle \Lambda \rangle + \langle \Lambda \hat{G} \rangle)$  и  $\lambda_2^{\circ} = 1/(\langle 1/\Lambda \rangle + \langle \hat{Q}/\Lambda \rangle)$  — оценки значения  $\lambda^*$  эффективного коэффициента теплопроводности композита, связывающего осредненные по его представительному объему  $V^*$  векторы  $\langle \mathbf{q} \rangle$  и  $\langle \mathbf{g} \rangle$  плотности теплового потока и градиента температуры соответственно.

Из равенств (2) следует, что построенные оценки  $\lambda_1^{\circ}$  и  $\lambda_2^{\circ}$  в общем случае не совпадают со средними значениями  $\langle \Lambda \rangle$  и  $1/\langle 1/\Lambda \rangle$ , равными соответственно

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_0 C_0 + \lambda_m (1 - C_0), \\ \lambda_2 &= 1/(C_0/\lambda_0 + (1 - C_0)/\lambda_m). \end{aligned} \quad (3)$$

Значения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  можно рассматривать как оценки первого приближения по отношению к ис-

комому значению  $\lambda^*$  эффективного коэффициента теплопроводности композита, полученные на основе так называемой смесевой модели неоднородной среды [9], не учитывающей тепловое взаимодействие включений и матрицы композита. Для уточнения этих оценок требуется построение ММ, позволяющих учесть такое взаимодействие. Но предварительно установим, что оценки  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  являются двусторонними, т. е. оценивают возможные значения  $\lambda^*$  сверху и снизу.

## Двусторонние оценки

Сначала, используя равенства (3), покажем, что  $\lambda_1 \geq \lambda_2$ , или

$$C_0^2 + (1 - C_0)^2 + C_0(1 - C_0)(\lambda_0/\lambda_m + \lambda_m/\lambda_0) \geq 1.$$

Действительно, неравенство справедливо, так как  $\lambda_0/\lambda_m + \lambda_m/\lambda_0 \geq 2$ .

Расположение возможного значения  $\lambda^*$  между оценками  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  можно установить, если воспользоваться двойственной вариационной формой модели процесса стационарной теплопроводности в неоднородном твердом теле [10, 11]. Эта модель включает минимизируемый функционал

$$J[\mathbf{g}] = \frac{1}{2} \int \Lambda(M)(\mathbf{g}(M))^2 dV(M) \quad (4)$$

и максимизируемый функционал

$$\begin{aligned} I[\mathbf{q}] &= -\frac{1}{2} \int \frac{(\mathbf{q}(M))^2}{\Lambda(M)} dV(M) - \\ &- \int_{S_T} f_T(P)\mathbf{q}(P) \cdot \mathbf{n}(P) dS(P), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mathbf{n}(P)$  — единичный вектор внешней нормали в точках  $P \in S_T$  участков  $S_T \subset S$  поверхности  $S$ , ограничивающей объем  $V^*$  неоднородного тела (на этих участках задано распределение температуры  $f_T(P)$ ). Функционал (4) допустимо рассматривать на таких распределениях  $T(M)$  ( $M \in V^*$ ) температуры в этом теле, которым соответствуют кусочно непрерывные распределения вектора градиента  $\mathbf{g}(M) = -\Lambda(M)\nabla T(M)$  ( $\nabla$  — дифференциальный оператор Гамильтона) и которые удовлетворяют заданному граничному условию  $T(P) = f_T(P)$ ,  $P \in S_T$ . При этом участки  $S \setminus S_T$  поверхности тела должны быть идеально теплоизолированы. Для функционала (5) допустимыми являются непрерывные распределения вектора  $\mathbf{q}(M)$ ,  $M \in V$ , удовлетворяющие дополнительным условиям  $\nabla \cdot \mathbf{q} = 0$  в  $V^*$  и  $\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} = 0$  на  $S \setminus S_T$  [10].

Из экстремальных свойств функционалов (4) и (5) следует цепочка неравенств

$$J[\mathbf{g}] \geq J[\mathbf{g}^*] \geq I[\mathbf{q}], \quad (6)$$

где  $\mathbf{g}^*(M)$ ,  $M \in V$ , — истинное распределение градиента температурного поля в неоднородном теле.

На этом распределении функционал (4) достигает своего наименьшего значения, равного [11]

$$J[\mathbf{g}^*] = -\frac{1}{2} \int_{S_T} f_T(P) \Lambda(P) \mathbf{g}(P) \cdot \mathbf{n}(P) dS(P). \quad (7)$$

Пусть часть  $S_T$  поверхности  $S$  неоднородного тела объемом  $V^*$  состоит из двух не граничащих между собой изотермических участков  $S'_T$  и  $S''_T$  с заданными значениями температур  $T'$  и  $T''$  соответственно. Эти участки отделены друг от друга идеально теплоизолированными участками поверхности  $S$ . В этом случае вместо равенства (7) получим

$$2J[\mathbf{g}^*] = T'Q' + T''Q'', \quad (8)$$

где  $Q'$  и  $Q''$  — суммарные тепловые потоки, поступающие в область  $V^*$  через участки  $S'_T$  и  $S''_T$  ее поверхности соответственно, причем

$$Q' = - \int_{S'_T} \Lambda(P') \mathbf{g}^*(P') \cdot \mathbf{n}(P') dS(P');$$

$$Q'' = - \int_{S''_T} \Lambda(P'') \mathbf{g}^*(P'') \cdot \mathbf{n}(P'') dS(P'').$$

В силу закона сохранения тепловой энергии при установившемся процессе теплопроводности в неоднородном теле, занимающем область  $V^*$ , имеем  $Q' + Q'' = 0$ . Поэтому, учитывая равенство (8), получаем  $Q' = -Q'' = 2J[\mathbf{g}^*]/(T' - T'')$ . Отсюда находим термическое сопротивление рассматриваемого тела

$$R_T = (T' - T'')/Q' = (T' - T'')^2/(2J[\mathbf{g}^*]) \quad (9)$$

между изотермическими участками  $S'_T$  и  $S''_T$  поверхности  $S$ . Цепочка неравенств (6) и равенство (9) позволяют построить двусторонние оценки значения термического сопротивления  $R_T$  тела в виде

$$(T' - T'')^2/(2J_1[\mathbf{g}]) \leq R_T \leq (T' - T'')^2/(2I_1[\mathbf{q}]), \quad (10)$$

где  $J_1[\mathbf{g}]$  и  $I_1[\mathbf{q}]$  — значения функционалов (4) и (5) на каких-либо допустимых распределениях векторов соответственно градиента температурного поля и плотности теплового потока.

Если область  $V^*$ , соответствующую представительному объему композита, выбрать в достаточно простой форме, то после замены в этом объеме рассматриваемого композита однородным материалом с искомым значением  $\lambda^*$  эффективного коэффициента теплопроводности можно однозначно выразить через  $\lambda^*$  величину  $R_T$  в соотношении (10) и затем получить двусторонние оценки значения  $\lambda^*$ . Выберем представительный объем композита с объемной концентрацией  $C_0$  включений в виде прямого цилиндра высотой  $H$  с идеально теплоизолированной боковой поверхностью и площадью  $S_0$  каждого из оснований, т. е. в данном случае  $V^* = HS_0$ . Примем температуру одного из оснований за нуль отсчета, а температуру другого равной  $T_0$ .

Для функционала (4) простейшим допустимым распределением вектора  $\mathbf{g}$  в таком объеме является постоянное значение  $g = T_0/H$  единственной составляющей этого вектора, перпендикулярной основаниям цилиндра. Тогда из формулы (4) следует

$$J_1[g] = (T_0^2/2)(S_0/H)(\lambda_0 C_0 + \lambda_m(1 - C_0)). \quad (11)$$

Для максимизируемого функционала (5) в качестве допустимого распределения вектора  $\mathbf{q}$  можно принять значение  $q$  единственной составляющей этого вектора, также перпендикулярной основаниям цилиндра. В этом случае формула (5) примет вид

$$I_1[q] = -(q^2/2)HS_0(C_0/\lambda_0 + (1 - C_0)/\lambda_m) - qT_0S_0. \quad (12)$$

Значение  $q$  найдем из необходимого условия  $dI_1(q)/dq = 0$  максимума функционала, что дает  $q = -(T_0/H)/(C_0/\lambda_0 + (1 - C_0)/\lambda_m)$ . После подстановки этого значения в формулу (12) получим

$$I_1[q] = (T_0^2/2)(S_0/H)/(C_0/\lambda_0 + (1 - C_0)/\lambda_m). \quad (13)$$

При замене композита в представительном объеме однородным материалом с коэффициентом теплопроводности  $\lambda^*$  для термического сопротивления цилиндра находим  $R_T = H/(\lambda^*S_0)$  и с учетом неравенств (10) и формул (3), (11) и (13) получаем двусторонние оценки

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_0 C_0 + \lambda_m(1 - C_0) \geq \lambda^* \geq \\ &\geq 1/(C_0/\lambda_0 + (1 - C_0)/\lambda_m) = \lambda_2. \end{aligned}$$

На рис. 1 представлены построенные по формулам (3) графики зависимостей  $\tilde{\lambda}_1 = \lambda_1/\lambda_m$  (штрих-пунктирные линии) и  $\tilde{\lambda}_2 = \lambda_2/\lambda_m$  (штриховые линии) от  $C_0$  при различных значениях  $\bar{\lambda} = \lambda_0/\lambda_m$ . При малом отличии значения  $\bar{\lambda}$  от единицы разность  $\Delta\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}_1 - \tilde{\lambda}_2$  сравнительно мала во всем промежутке изменения  $C_0$ . По мере отклонения значения  $\bar{\lambda}$  от единицы несмотря на совпадение оценок при  $C_0 = 0$  и  $C_0 = 1$  эта разность для промежуточных значений  $C_0$  становится существенной. При фиксированном значении  $\bar{\lambda}$  максимальному значению  $(\Delta\tilde{\lambda})_{\max} = (1 - \sqrt{\bar{\lambda}})^2$  соответствует объемная концентрация включений  $(C_0)_{\max} = 1/(1 + 1/\sqrt{\bar{\lambda}})$ . Если в качестве первого приближения к искомому значению  $\tilde{\lambda}^* = \lambda^*/\lambda_m$  принять

$$\tilde{\lambda}^* = (\tilde{\lambda}_1 + \tilde{\lambda}_2)/2, \quad (14)$$

то возможная относительная погрешность при  $(C_0)_{\max}$  не превысит значения  $\eta(\bar{\lambda}) = (\Delta\tilde{\lambda})_{\max}/(2\tilde{\lambda}^*)$ .

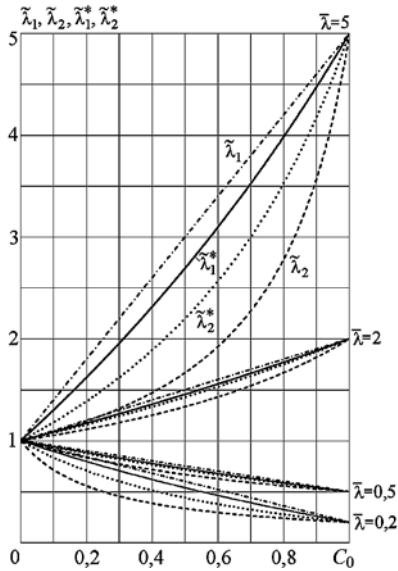


Рис. 1. Графики зависимостей безразмерных двусторонних оценок эффективного коэффициента теплопроводности композита от объемной концентрации включений при различных значениях параметра  $\bar{\lambda}$

Двусторонние оценки можно сблизить, если использовать вариационный принцип Хашина — Штрикмана [12]:

при  $\bar{\lambda} < 1$

$$\lambda_1^* = \lambda_1 - \frac{C_0(1-C_0)(\lambda_m - \lambda_0)^2}{\lambda_0(1-C_0) + \lambda_m(2+C_0)} \geq \lambda^* \geq \lambda_1 - \frac{C_0(1-C_0)(\lambda_m - \lambda_0)^2}{\lambda_0(3-C_0) + \lambda_m C_0} = \lambda_2^*, \quad (15)$$

а при  $\bar{\lambda} > 1$

$$\lambda_1^* = \lambda_1 - \frac{C_0(1-C_0)(\lambda_0 - \lambda_m)^2}{\lambda_0(3-C_0) + \lambda_m C_0} \geq \lambda^* \geq \lambda_1 - \frac{C_0(1-C_0)(\lambda_m - \lambda_0)^2}{\lambda_0(1-C_0) + \lambda_m(2+C_0)} = \lambda_2^*. \quad (16)$$

Эти оценки совпадают с результатами, полученными в рамках обобщенного сингулярного приближения теории случайных функций [12] и учитывающими в формулах (2) влияние флуктуаций в распределениях векторов градиента температурного поля и плотности теплового потока, т. е.  $\lambda_k^\circ = \lambda_k^*$ ,  $k = 1, 2$ . На рис. 1 по формулам (15) и (16) с учетом равенств (3) построены графики зависимостей  $\tilde{\lambda}_1^* = \lambda_1^*/\lambda_m$  (сплошные кривые) и  $\tilde{\lambda}_2^* = \lambda_2^*/\lambda_m$  (пунктирные линии) от  $C_0$  при различных значениях  $\bar{\lambda}$ .

Разность  $\Delta \tilde{\lambda}^* = \tilde{\lambda}_1^* - \tilde{\lambda}_2^*$  при промежуточных значениях  $C_0$  также возрастает по мере отклонения

значения  $\bar{\lambda}$  от единицы. При фиксированном значении  $\bar{\lambda}$  наибольшего значения  $(\Delta \tilde{\lambda}^*)_{\max}$  эта разность достигает при объемной концентрации  $(C_0^*)_{\max} = (2\bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2 - \sqrt{\bar{\lambda}(2+\bar{\lambda})(1+2\bar{\lambda})})/(\bar{\lambda}^2 - 1)$ .

Для среднего арифметического значения  $\tilde{\lambda}_*^* = (\tilde{\lambda}_1^* + \tilde{\lambda}_2^*)/2$  возможная относительная погрешность при  $(C_0^*)_{\max}$  не превысит значения  $\eta^*(\bar{\lambda}) = (\Delta \tilde{\lambda}^*)_{\max}/(2\tilde{\lambda}_*^*)$ .

Необходимо отметить, что вычисленные по формуле (14) значения  $\tilde{\lambda}^*$  выходят за пределы двусторонних оценок  $\tilde{\lambda}_1^*$  и  $\tilde{\lambda}_2^*$  при  $\bar{\lambda} < 1$  по мере приближения  $C_0$  к нулю, а при  $\bar{\lambda} > 1$  по мере приближения  $C_0$  к единице.

### Модели теплового взаимодействия включения и матрицы

Представленные выше двусторонние оценки определяют границы возможных значений  $\lambda^*$  эффективного коэффициента теплопроводности композита без учета особенностей распределения температуры в матрице в непосредственной близости к включению. Учет влияния таких особенностей возможен в рамках ММ теплового взаимодействия включения и матрицы как в предположении идеального теплового контакта между ними [13], так и при наличии термического сопротивления на контактной поверхности [7]. В работе [15] построена ММ теплового взаимодействия изотропной матрицы с анизотропными шаровыми включениями.

При химическом взаимодействии материалов включения и матрицы между ними возможно образование промежуточного слоя с коэффициентом теплопроводности, отличающимся от коэффициентов теплопроводности как включения, так и матрицы. В работе [7] построены ММ, учитывающие наличие промежуточного слоя с постоянным или непрерывно изменяющимся по его толщине коэффициентом теплопроводности.

Рассмотрим подробнее этапы построения ММ, описывающей тепловое взаимодействие изотропной матрицы и отдельно взятого изотропного шарового включения в предположении, что соседние шаровые включения не контактируют между собой, т. е. отделены друг от друга слоем материала матрицы. Для учета взаимодействия между включениями и матрицей при идеальном тепловом контакте примем в качестве представительного элемента структуры композита составную шаровую частицу, состоящую из шарового включения с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_0$  и радиусом  $R_0$  и окружающего его шарового слоя из материала

матрицы с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_m$  и наружным радиусом  $R_m$  [14]. Эта частица в тепловом отношении взаимодействует с неограниченным массивом однородного материала, коэффициент теплопроводности  $\lambda$  которого подлежит определению как эффективная характеристика композита. Таким образом, модель композита содержит три фазы: включение; слой матрицы, неограниченный массив однородного материала.

Центр включения поместим в начале сферической системы координат. Примем, что на большом расстоянии  $r \gg R_m$  от начала координат задан вектор градиента температурного поля в однородном материале, имеющий модуль  $g$  и направленный по оси сферической системы координат, от которой происходит отсчет угловой координаты  $\theta$ , т. е. при  $r \rightarrow \infty$  распределение температуры в этом материале описывает функция  $T_\infty(r, \theta) = gr \cos \theta$ . Эта функция удовлетворяет уравнению Лапласа, которое в сферических координатах имеет вид

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0.$$

В данном случае благодаря коллинеарности заданного вектора градиента температурного поля оси отсчета угловой координаты  $\theta$  распределение температуры симметрично относительно этой оси и не зависит от угловой координаты  $\varphi$ , т. е.  $\partial^2 T / \partial \varphi^2 = 0$ .

По мере приближения к составной шаровой частице температурное поле в однородном материале претерпевает возмущение, описываемое также удовлетворяющим уравнению Лапласа дополнительным слагаемым  $\Delta T(r, \theta) = (B/r^2) \cos \theta$  [7], где  $B$  — подлежащий определению постоянный коэффициент. Таким образом, температурное поле в однородном материале, удовлетворяющее заданному условию при  $r \rightarrow \infty$  и уравнению Лапласа, описывает функция

$$T(r, \theta) = T_\infty(r, \theta) + \Delta T(r, \theta) = (gr + B/r^2) \cos \theta. \quad (17)$$

Аналогичные зависимости описывают распределения температуры в шаровом включении

$$T_0(r, \theta) = (A_0 r + B_0/r^2) \cos \theta \quad (18)$$

и в слое материала матрицы

$$T_m(r, \theta) = (A_m r + B_m/r^2) \cos \theta, \quad (19)$$

причем  $B_0 = 0$  в силу ограниченности температуры включения при  $r = 0$ .

Таким образом, в равенства (17)—(19) входят четыре неизвестных коэффициента  $B$ ,  $A_0$ ,  $A_m$  и  $B_m$ , которые необходимо найти из граничных условий на сферических поверхностях с радиусами  $R_0$  и  $R_m$ . При  $r = R_0$  из условий непрерывности распределе-

ния температуры и радиальной составляющей вектора плотности теплового потока следует

$$T_0(R_0, \theta) = T_m(R_0, \theta) \\ \text{и } \lambda_0 \partial T_0 / \partial r |_{r=R_0} = \lambda_m \partial T_m / \partial r |_{r=R_0}. \quad (20)$$

Отсюда с использованием равенств (18) и (19) при  $B_0 = 0$  находим

$$A_0 = A_m + B_m/R_0^3 \text{ и } \bar{\lambda} A_0 = (A_m - 2B_m/R_0^3), \quad (21)$$

где  $\bar{\lambda} = \lambda_0/\lambda_m$ .

Из аналогичных условий непрерывности распределения температуры и радиальной составляющей вектора плотности теплового потока на сферической поверхности радиусом  $R_m$  с учетом формул (17) и (19) получим

$$A_m + B_m/R_m^3 = g + B/R_m^3 \\ \text{и } A_m - 2B_m/R_m^3 = \tilde{\lambda} (g - 2B/R_m^3), \quad (22)$$

где  $\tilde{\lambda} = \lambda/\lambda_m$ .

Последовательным исключением неизвестных из равенств (21) и (22) находим

$$\frac{B}{R_m^3} = 3g\tilde{\lambda} \times \\ \times \frac{2 + \bar{\lambda} + (1 - \bar{\lambda})(R_0/R_m)^3}{(2\tilde{\lambda} + 1)(2 + \bar{\lambda}) + (\tilde{\lambda} - 1)(1 - \bar{\lambda})(R_0/R_m)^3} - g. \quad (23)$$

Замена составной шаровой частицы равновеликим шаром радиусом  $R_m$  с искомым коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  приведет к исчезновению возмущения температурного поля в окружающем частицу однородном материале. Тогда в равенстве (17) следует положить  $\Delta T(r, \theta) = 0$ , что равносильно условию  $B = 0$ , которое с учетом формулы (22) и равенства  $(R_0/R_m)^3 = C_0$  позволяет записать

$$\tilde{\lambda} = (2 + \bar{\lambda} - 2(1 - \bar{\lambda})C_0)/(2 + \bar{\lambda} + (1 - \bar{\lambda})C_0). \quad (24)$$

Эта формула совпадает с известной формулой Максвелла [7], полученной на основе более простой двухфазной модели, состоящей из включения в виде сплошного шара и окружающего его материала матрицы. Результаты расчета по формуле (24) совпадают со значениями  $\tilde{\lambda}_1^*$  при  $\bar{\lambda} \leq 1$  и со значениями  $\tilde{\lambda}_2^*$  при  $\bar{\lambda} \geq 1$ , так как в этих случаях равенство для  $\tilde{\lambda}_1^*$ , вытекающее из соотношения (15), и равенство для  $\tilde{\lambda}_2^*$ , следующее из соотношения (16), можно преобразовать к виду (24).

При объемной концентрации включений, близкой к единице, использованная при получении формулы (24) модель структуры композита, предполагающая наличие шарового слоя матрицы, окружающего каждое включение, становится неадекватной в силу того, что некоторые включения будут контактировать между собой. В этом случае можно

предположить, что частицы включений и матрицы меняются своими ролями, т. е. модель структуры композита представима в виде шаровых частиц из материала матрицы, окруженных шаровым слоем частиц из материала включений. Тогда после преобразований, аналогичных использованным при получении формулы (24), для эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_*$  композита с близким к единице значением  $C_0$  получим формулу

$$\tilde{\lambda} = \lambda_*/\lambda_m = \bar{\lambda}(2\bar{\lambda} + 1 - 2(\bar{\lambda} - 1)(1 - C_0))/(2\bar{\lambda} + 1 + (\bar{\lambda} - 1)(1 - C_0)).$$

Результаты расчета по этой формуле совпадают со значениями  $\tilde{\lambda}_2^*$  при  $\bar{\lambda} \leq 1$  и со значениями  $\tilde{\lambda}_1^*$  при  $\bar{\lambda} \geq 1$ .

Используем еще один подход к построению ММ, которая описывает флуктуации градиента температурного поля во включениях и в частицах матрицы и позволяет получить оценку эффективного коэффициента теплопроводности композита. Если поместить шаровое включение с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_0$  и радиусом  $R_0$  в начало сферической системы координат и окружить неограниченным массивом однородного материала с искомым коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , то при заданном на большом расстоянии  $r \geq R_0$  модуле  $g$  градиента температурного поля в этом материале вместо равенств (18) и (19) можно записать

$$T^*(r, \theta) = (gr + B^*/r^2)\cos\theta \text{ и } T_0^*(r, \theta) = A_0^*r\cos\theta.$$

С учетом этих равенств из граничных условий вида (20) получим

$$A_0^* = g + B_m^*/R_0^3 \text{ и } \lambda_0 A_0^* = \lambda(g - 2B^*/R_0^3).$$

Отсюда находим модуль  $A_0^* = 3g/(2 + \lambda_0/\lambda)$  градиента температурного поля в шаровом включении.

Матрицу композита в этой ММ представим в виде совокупности шаровых частиц различного радиуса, что позволит заполнить любой объем без пустот. Тогда в отдельно взятой частице матрицы при условиях теплового взаимодействия с однородным материалом, аналогичных взаимодействию его с шаровым включением, возникнет распределение температуры с модулем  $A_m^* = 3g/(2 + \lambda_m/\lambda)$  градиента.

Рассматривая величины  $A_0^* - g$  и  $A_m^* - g$  как флуктуации модуля градиента в однородном материале, соответствующем композиту, и проводя осреднение этих флуктуаций по объему композита, получаем равенство  $C_0(A_0^* - g) + (1 - C_0)(A_m^* - g) = 0$ . Отсюда следует квадратное уравнение относительно обозначенного через  $\lambda^\circ$  искомого значения эффективного коэффициента теплопроводности

композита с такой моделью структуры. Решение этого уравнения можно представить в виде

$$\tilde{\lambda}^\circ = \frac{\lambda^\circ}{\lambda_m} = \frac{2 - \bar{\lambda} - 3(1 - \bar{\lambda})C_0 + \sqrt{(2 - \bar{\lambda} - 3(1 - \bar{\lambda})C_0)^2 + 8\bar{\lambda}}}{4}. \quad (25)$$

Если по объему композита осреднять флуктуации  $\lambda_0 A_0^* - \lambda g$  и  $\lambda_m A_m^* - \lambda g$  плотности теплового потока соответственно во включениях и частицах матрицы, то эта процедура также приводит к формуле (25).

### Модели, учитывающие взаимное расположение включений

В рассмотренных выше подходах к построению ММ процесса теплопроводности в композите учтена лишь объемная концентрация шаровых включений и не принято во внимание их взаимное расположение. Обычно предполагают, что шаровые включения распределены по объему композита равномерно, но их взаимное расположение является случайным (хаотическим). Для изотропного композита матричной структуры [12] ее представительный элемент обычно рассматривают в виде куба, в центр которого помещают шаровое включение [16], а для однонаправленного трансверсально изотропного волокнистого композита представительным элементом структуры служит квадрат с расположенным в нем поперечным сечением волокна [16, 17].

В случае кубического представительного элемента с шаровым включением для получения верхней оценки эффективного коэффициента теплопроводности достаточно принять предположение о равномерном расположении в этом элементе изотермических плоскостей параллельно одной из граней куба. Такое распределение температуры допустимо для минимизируемого функционала (4), но оно отличается от истинного распределения, на котором этот функционал достигает минимума. Следовательно, вычисленная по этому распределению температуры тепловая проводимость представительного элемента будет выше истинной, что и приводит к верхней оценке  $\lambda_+$  эффективного коэффициента теплопроводности композита, определяемой следующими формулами [12]:

$$\tilde{\lambda}_+ = \frac{\lambda_+}{\lambda_m} = \left(1 - r + \frac{1/(\bar{\lambda} - 1)}{2\pi p} \ln \frac{2p+r}{2p-r}\right)^{-1},$$

$$p = \sqrt{\frac{1}{\pi(\bar{\lambda} - 1)} + \frac{r^2}{4}}, \quad (26)$$

где  $r = (6C_0/\pi)^{1/3} \leq 1$  — относительный радиус шарового включения.

Нижняя оценка этого коэффициента соответствует предположению о перпендикулярности линий



тока теплового потока той же грани куба. Такое распределение плотности теплового потока допустимо для максимизируемого функционала (5), но не совпадает с истинным распределением, на котором этот функционал достигает максимума. Поэтому вычисленная по этому распределению плотности теплового потока тепловая проводимость представительного элемента будет ниже истинной, что соответствует нижней оценке  $\lambda_-$  эффективного коэффициента теплопроводности композита, определяемой формулами [12]

$$\tilde{\lambda}_- = \frac{\lambda_-}{\lambda_m} = 1 - \pi \frac{r^2}{4} + \frac{\pi}{2b} \left( r - \frac{\ln(1+br)}{b} \right),$$

$$b = 1/\bar{\lambda} - 1. \quad (27)$$

Наряду с рассмотренной матричной структурой композита, армированного шаровыми включениями, изотропию по отношению к свойству теплопроводности обеспечивают еще два варианта их расположения, которым соответствуют представительные элементы в виде ячеек объемно центрированной (ОЦК) и гранецентрированной (ГЦК) кубических решеток кристаллов [11]. Верхние и нижние оценки эффективного коэффициента теплопроводности для таких структур могут быть получены путем, аналогичным использованному при выводе формул (26) и (27).

### Сопоставление результатов расчетов

На рис. 2 для значения параметра  $\bar{\lambda} = 100$ , значительно отличающегося от единицы, приведены результаты расчетов с использованием формул (3), (15), (16), (25)–(27). Для рационального использования масштаба графика все рассчитанные размерные значения оценок эффективного коэффициента теплопроводности композита, зависящие от объемной концентрации  $C_0$  включений, отнесены к текущим значениям верхней оценки  $\lambda_1$ , также зависящей от  $C_0$ . В соответствующих обозначениях этих безразмерных отношений применявшийся выше символ "тильда" (волнистая черта) заменен на "крышку" (например, вместо отношения  $\tilde{\lambda}^\circ = \lambda^\circ/\lambda_m$ , определяемого формулой (25), графики построены для отношения  $\hat{\lambda}^\circ = \lambda^\circ/\lambda_1$ ).

Для сравнения сплошной кривой на рис. 2 представлена зависимость отношения  $\hat{\lambda} = \lambda/\lambda_1$ , от  $C_0$  при тех же значениях  $\bar{\lambda}$ , полученная путем численного решения методом конечных элементов задачи стационарной теплопроводности в рассматриваемом кубическом представительном элементе структуры композита. Трехмерная область решения задачи была разбита на 92 743 конечных элемента в виде десятиузловых тетраэдров с квадратичными функциями формы [18] с общим числом 93 236 узлов. На верхней и нижней гранях куба были заданы температуры, равные соответственно единице и

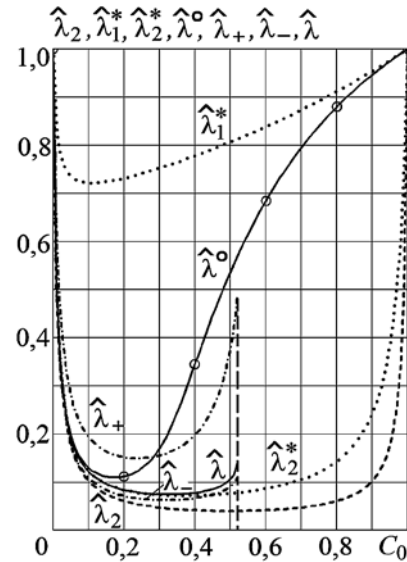


Рис. 2. Графики зависимостей безразмерных оценок эффективного коэффициента теплопроводности композита от объемной концентрации включений при  $\bar{\lambda} = 100$

нулю, а боковые грани были приняты идеально теплоизолированными. Погрешность численного решения данной задачи оценивалась интегрально по значению  $\Delta \tilde{Q} = |1 - Q_0/Q_1|$ , где  $Q_0$  и  $Q_1$  — суммарные тепловые потоки, проходящие соответственно через нижнюю и верхнюю грани кубического представительного элемента. По мере отклонения значения  $\bar{\lambda}$  от единицы и увеличения относительного радиуса  $r$  включения значения  $\Delta \tilde{Q}$  возрастали, но при  $\bar{\lambda} = 0,01$  и  $\bar{\lambda} = 100$  не превысили  $10^{-4}$ .

Вертикальная штриховая линия на рис. 2 соответствует предельному значению  $\tilde{N}_0^W = \pi/6 \approx 0,5236$  объемной концентрации включений, возможной для выбранного представительного элемента матричной структуры композита при предельном значении  $r = 1$  относительного радиуса шарового включения. Двусторонние оценки, рассчитанные по формулам (26) и (27), ограничивают более узкую полосу возможных значений эффективного коэффициента теплопроводности композита по сравнению с уточненными вариационными оценками, определяемыми формулами (15) и (16), и в этой полосе полностью находятся результаты численного решения и одна из уточненных оценок.

### Заключение

Проведен сравнительный количественный анализ иерархической системы математических моделей переноса тепловой энергии в композите с шаровыми включениями, используемых для построения оценок эффективного коэффициента теплопроводности такого композита. С применением двойственной формулировки вариационной задачи стационарной теплопроводности в неоднородном твердом теле получены верхняя и нижняя границы возмож-

ных значений этого коэффициента. Для сближения границ использован вариационный принцип Хашина — Штрикмана. Установлена связь между оценками, полученными с применением этого принципа и обобщенного сингулярного приближения теории случайных функций.

С помощью ММ теплового взаимодействия однородного материала как с шаровыми включениями, так и с частицами матрицы выведена расчетная формула, обеспечивающая достоверную оценку искомого коэффициента теплопроводности этого материала во всем диапазоне возможного изменения объемной концентрации включений. Рассмотрены ММ, позволяющие учесть взаимное расположение включений в композите с матричной структурой.

*Работа выполнена по гранту НШ-1432.2014.8 программы Президента РФ поддержки ведущих научных школ и гранту МК-6618.2013.8 программы Президента РФ поддержки молодых кандидатов наук.*

#### Список литературы

1. **Норенков И. П.** Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 360 с.
2. **Норенков И. П.** Системы автоматизированного проектирования. Кн. 1. Принципы построения и структура. М.: Высш. шк., 1986. 124 с.
3. **Зарубин В. С.** Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 496 с.
4. **Зарубин В. С.** Моделирование. М.: Академия, 2013. 336 с.
5. **Зарубин В. С.** Математическое моделирование процессов в континуальных системах // Информационные технологии. 1995. № 0 (пилотный номер). С. 11—14.
6. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Станкевич И. В., Темис Ю. М.** Математическое моделирование термомеханических процессов. // Информационные технологии. 2005. № 9. С. 39—45.
7. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю.** Теплопроводность композитов с шаровыми включениями. Вывод, оценка достоверности и параметрический анализ расчетных формул. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 77 с.
8. **Кап Е. А.** Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры. Родословная форм и идей. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 296 с.
9. **Головин Н. Н., Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н.** Смесеые модели механики композитов. Ч. 1. Термомеханика и термоупругость многокомпонентной смеси // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2009. № 3. С. 36—49.
10. **Зарубин В. С.** Инженерные методы решения задач теплопроводности. М.: Энергоатомиздат, 1983. 328 с.
11. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н.** Математические модели механики и электродинамики сплошной среды. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 512 с.
12. **Шермергор Т. Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
13. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю.** Эффективный коэффициент теплопроводности композита с шаровыми включениями // Тепловые процессы в технике. 2012. № 10. С. 470—474.
14. **Зарубин В. С., Котович А. В., Кувыркин Г. Н.** Оценки эффективного коэффициента теплопроводности композита с анизотропными шаровыми включениями // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 118—126.
15. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю.** Оценка эффективной теплопроводности композита с шаровыми включениями методом самосогласования // Наука и образование. Электрон. журн. 2013. № 09. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/601512.html> (дата обращения 26.05.2014). DOI: 10.7463/0913.0601512.
16. **Coriell S. R., Jackson J. L.** Bounds on transport coefficients of two-phase materials // J. Appl. Phys. 1968. V. 39, N. 10. P. 4733—4736.
17. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю.** Влияние взаимного расположения волокон на теплопроводность однонаправленного волокнистого композита // Изв. вузов. Машиностроение. 2014. № 2. С. 20—28.
18. **Власова Е. А., Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н.** Приближенные методы математической физики. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 700 с.

**V. S. Zarubin**, Prof., e-mail: [Zarubin@bmstu.ru](mailto:Zarubin@bmstu.ru),  
**G. N. Kuvyrkin**, Head of the department, e-mail: [Fn2@bmstu.ru](mailto:Fn2@bmstu.ru),  
**I. Yu. Savelyeva**, Associated Prof., e-mail: [Inga.SaveIyeva@gmail.com](mailto:Inga.SaveIyeva@gmail.com),  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow

## Hierarchical System of Mathematical Models of Heat Conduction in Composite Materials

*Within hierarchical approach the multilevel system of mathematical models of the composite material describing heat transfer and thermal interaction between a matrix of a composite and reinforcing inclusions is constructed. This system is used for the comparative analysis of estimates of effective coefficient of heat conductivity — one of the key parameters defining scope of the concrete composite. On the basis of the dual formulation of a variation problem of stationary heat conductivity in a non-uniform solid body bilateral estimates of possible values of this coefficient are received. These estimates are specified by means of Hashin — Shtrikmana's variation principle. The system of models is constructed in relation to dispersion strengthened composites with spherical inclusions. Mathematical models of heat transfer in a composite with the matrix structure, allowing to consider a relative positioning of inclusions, are considered. The bilateral estimates received on the basis of these models, limit narrower strip of possible values of effective coefficient of thermal conductivity of a composite in comparison with the specified bilateral estimates which follow from Hashin-Shtrikman's variation principle. Comparison of results of the quantitative analysis of the constructed merarkhichesky system of mathematical models allowed to draw conclusions on degree of adequacy of the constructed models.*

**Keywords:** hierarchical approach, mathematical model, composite, spherical inclusions, effective coefficient of thermal conductivity

## References

1. **Norenkov I. P.** Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2000. 360 p.
2. **Norenkov I. P.** Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya. Kn. 1. Principy postroeniya i struktura. M.: Vyssh. shk., 1986. 124 p.
3. **Zarubin V. S.** Matematicheskoe modelirovanie v tehnikе. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2010. 496 p.
4. **Zarubin V. S.** Modelirovanie. M.: Izd. centr "Akademija", 2013. 336 p.
5. **Zarubin V. S.** Matematicheskoe modelirovanie processov v kontinual'nyh sistemah // Informacionnye tehnologii. 1995. N. 0. P. 11–14.
6. **Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Stankevich I. V., Temis Ju. M.** Matematicheskoe modelirovanie termomechanicheskikh processov // Informacionnye tehnologii. 2005. N. 9. P. 39–45.
7. **Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savel'eva I. Ju.** Teploprovodnost' kompozitov s sharovymi vkljuchenijami. Vyvod, ocenka dostovernosti i parametricheskij analiz raschetnyh formul. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 77 p.
8. **Кас Е. А.** Fullereny, uglerodnye nanotrubki i nanoklastery. Rodoslovnaja form i idej. M.: Izd-vo LKI, 2008. 296 p.
9. **Golovin N. N., Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N.** Smesevye modeli mehaniki kompozitov. Ch. 1. Termomehanika i termouprugost' mnogokomponentnoj smesi // Vestnik MGTU im. N. Je. Baumana. Ser. Estestvennye nauki. 2009. N. 3. P. 36–49.
10. **Zarubin V. S.** Inzhenernye metody reshenija zadach teploprovodnosti. M.: Jenergoatomizdat, 1983. 328 p.
11. **Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N.** Matematicheskie modeli mehaniki i jelektrodinamiki sploshnoj sredy. M.: Izd-vo MGTU im. NJe. Baumana, 2008. 512 p.
12. **Shermergor T. D.** Teorija uprugosti mikroneodnorodnyh sred. M.: Nauka, 1977. 400 p.
13. **Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savel'eva I. Ju.** Jefferktivnyj kojefficient teploprovodnosti kompozita s sharovymi vkljuchenijami // Teplovyje processy v tehnikе. 2012. N. 10. P. 470–474.
14. **Zarubin V. S., Kotovich A. V., Kuvyrkin G. N.** Ocenki jefferktivnogo kojefficienta teploprovodnosti kompozita s anizotropnymi sharovymi vkljuchenijami // Izv. RAN. Jenergetika. 2012. N. 6. P. 118–126.
15. **Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savel'eva I. Ju.** Ocenka jefferktivnoj teploprovodnosti kompozita s sharovymi vkljuchenijami metodom samosoglasovanija // Nauka i obrazovanie. 2013. 09. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/601512.html> (data obrashhenija 26.05.2014). DOI: 10.7463/0913.0601512.
16. **Coriell S. R., Jackson J. L.** Bounds on transport coefficients of two-phase materials // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. N. 10. P. 4733–4736.
17. **Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savel'eva I. Ju.** Vlijanie vzaimnogo raspolozhenija volokon na teploprovodnost' odnonapravlenno go voloknistogo kompozita // Izv. vuzov. Mashinostroenie. 2014. N. 2. P. 20–28.
18. **Vlasova E. A., Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N.** Priblizhennye metody matematicheskoj fiziki. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2001. 700 p.

УДК 519.6

**А. Н. Вдовин**, канд. биол. наук, вед. науч. сотр., e-mail: [vdovin@tinro-center.ru](mailto:vdovin@tinro-center.ru),  
"ТИНРО-Центр", г. Владивосток,

**А. Н. Четырбоцкий**, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: [chetyrbotsky@yandex.ru](mailto:chetyrbotsky@yandex.ru),  
ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток,

**В. А. Четырбоцкий**, студент, e-mail: [vel4232@gmail.com](mailto:vel4232@gmail.com), МГУ им. М. В. Ломоносова

## Компьютерное моделирование динамики роста рыб (на примере южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus*). Часть II

*На основании результатов анализа выборочного распределения длины и массы рыб разработаны численные модели их динамики, где учитывается ограниченность фазового пространства (конечность времени жизни, предельность длины и массы) и полагается функциональная связь между длиной и массой рыб, этапность их жизненного цикла и влияние сезонных факторов. Для оценки параметров проведена серия вычислительных экспериментов. Показано, что динамика длины определяется 18-месячной гармонической составляющей, а динамика масс — 12-месячной и 18-месячной составляющими. Выполнена предметная интерпретация полученных результатов.*

**Ключевые слова:** выборочное распределение, численная модель, задача поиска минимума, адекватность модели

### Введение

Для представления динамики параметров состояния рыб (массы, линейного роста и т. д.) обычно используют положение, согласно которому их отдельный индивид есть система составляющих его элементов (различных органов). Поскольку фиксированные значения параметров характеризуют систему (отдельную рыбу) в конкретном ее состоя-

нии (в том числе и ее возраст), то между ними существует определенная функциональная зависимость. Частный случай этой зависимости состоит в представлении связи между массой и линейным ростом (в дальнейшем просто ростом или длиной) посредством так называемой аллометрической формулы (в ней постулируется близость пропорциональности массы кубу длины). Поскольку длина

рыбы — монотонно возрастающая функция, то и масса также монотонно возрастает. Отличие этих характеристик состоит в имеющих место различных потерях массы (вымет половых продуктов, снижение интенсивности питания и т. д.).

Актуальность изучения функциональных зависимостей между отдельными характеристиками рыб обусловлена задачей представления индивидуумов популяций посредством системы элементов, что существенным образом упрощает построение иерархической структуры самой популяции или научно-обоснованных положений о мере структурированности системы. Следует также отметить, что терпуг — это массовый ценный промысловый вид рыбы в странах Дальнего Востока.

Цель работы состоит в разработке модели, где учитывается совместная динамика линейного роста и массы особей терпуга. Для решения этой задачи следует провести анализ данных выборочных распределений. Далее на основании полученных результатов надо выполнить оценку адекватности современных моделей этого класса и предлагаемой здесь модели. Мерой "качества" соответствия выборочных и модельных распределений выступает значение функционала так называемой невязки, который есть сумма квадратов отклонений выборочного и модельного распределений в отдельные моменты времени.

### 1. Анализ данных выборочных распределений

Выборочным распределением здесь выступают собранные в научно-исследовательских и промысловых рейсах материалы, которые дополнены материалами с рыбокомбинатов Приморского края (Японское море) в 1960—1986 гг. Для определения возраста была использована методика его оценки

по чешуе [4]. Поскольку в Приморье массовый выклев личинок происходит в октябре, средний возраст особей в выборках определяли с точностью до 0,5—1 месяца. Методика числовой оценки параметров была построена таким образом, чтобы эмпирический материал в наибольшей степени соответствовал полному циклу онтогенеза терпуга. Материал представляет 5238 рыб, для которых были определены их рост и масса. На его основании была сформирована выборка достаточно равномерных распределений по возрастам 61 наблюдения.

На рис. 1 показаны временные распределения средних размеров (длины), масс и совместное их изменение.

Форма кривой распределения длины указывает на ее монотонный рост в течение всего жизненного цикла (коэффициент корреляции между ней и возрастом составляет 0,953). Тут временное распределение разбивается на участок интенсивного роста (ограниченного примерно 18 месяцами) и участок его плавного монотонного остального изменения. Крутизна первого участка отражает интенсивный рост молоди, для которой главная функция организма состоит в росте размеров тела. После наступления периода половозрелости темп роста заметно снижается (второй участок). Некоторая "рябь" следования кривой на втором участке обусловлена, по-видимому, сезонной изменчивостью скорости обменных процессов. На заключительном этапе жизни основная часть потребляемой пищи тратится на поддержание жизнедеятельности, что приводит к значительному снижению темпов роста.

Форма кривой распределения массы указывает на сезонность его приростов, чередованием их положительных и отрицательных значений, высокое значение коэффициента корреляции 0,67 между массой и возрастом — на тесное их взаимное соответствие. Также отмечается высокая корреляция (0,890) между ростом и массой. Интересно заметить, что значение коэффициента корреляции для участка интенсивного роста рыб составляет 0,946 (рис. 1, а и в). Более высокое его значение указывает на поступательный характер увеличения массы молоди, что обусловлено преобладанием структурного (белкового) роста [3]. Высокие темпы динамики длины и массы молоди не сдерживают интенсивное жироаккумуляцию и развитие половых продуктов. После полутора лет жизни активизируются процессы генеративного роста (созревание половых продуктов), вследствие чего темп роста заметно снижается (второй участок). Некоторая "рябь" изменения кривой на втором участке, по-видимому, отражает сезонную изменчивость.

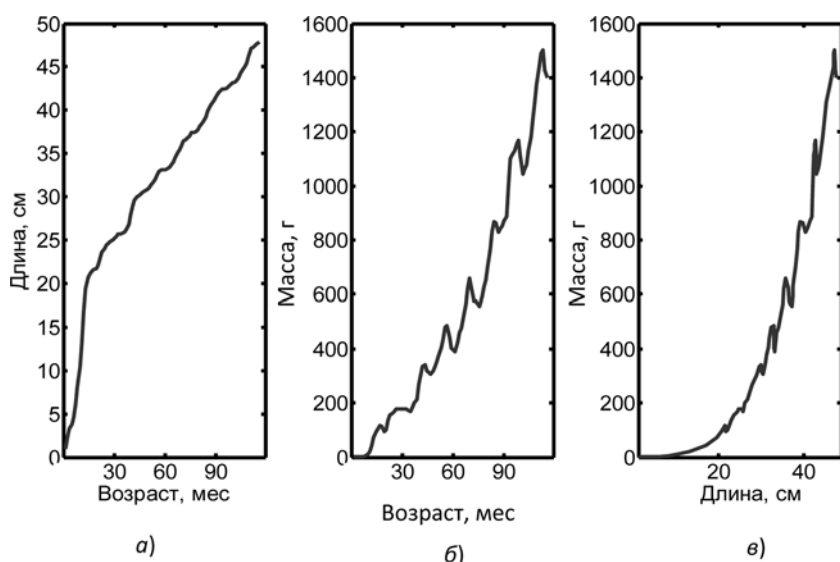


Рис. 1. Временные распределения длины, массы и совместное их изменение

## 2. Численное моделирование динамики размеров рыб

Динамика размеров рыб представлена огромным арсеналом численных моделей [1, 7, 10, 12]. Среди них особое место занимает модель Бергаланфи [11], которая в некоторых исследованиях принимается за "естественную природную закономерность" динамики длины и массы рыб. В практике численного моделирования их выражения определяются записями

$$l = l_{\infty}[1 - \exp(-k_l t)]; \quad (1)$$

$$w = w_{\infty}[1 - \exp(-k_w t)], \quad (2)$$

где  $l$  и  $w$  — длина и масса рыб в момент времени  $t$ ;  $k_l$  и  $k_w$  — соответствующие коэффициенты размерности  $1/t$ ;  $l_{\infty}$ ,  $w_{\infty}$  — рассчитываемые на основании выборочных распределений параметры соотношений (1) и (2). Легко заметить, что механизм динамики длины и массы определяется положением о равенстве константе относительного временного прироста (для  $l$  — это  $k_l$ , а для  $w$  — это  $k_w$ ). Отрицательность константы указывает на падение с возрастом относительных приростов длины и массы.

В некоторых случаях вместо записи (2) используется так называемая аллометрическая формула:

$$w = \alpha l^{\beta}, \quad (2a)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  — неотрицательные коэффициенты, которые подлежат определению на основании согласованных между собой выборочных распределений  $l$  и  $w$ . Для рассматриваемого выборочного материала оценки параметров (1) и (2a) определяются интервалами:  $l_{\infty} = 52$ ,  $k_l = 0,980 \pm 0,0070 \text{ мес}^{-1}$  и  $\alpha = (6,125 \pm 0,032) \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-\beta}$ ,  $\beta = 3,197 \pm 0,027$ . Коэффициенты детерминации (квадраты коэффициентов корреляции между модельным и выборочным распределениями) составляют для (1) 0,979 и для (2a) 0,998.

Следует заметить близость к значению 3 коэффициента  $\beta$ , что соответствует принятию допущения о пропорциональности массы объему тела рыбы (он равен массе рыбы, умноженной на ее плотность).

Согласно соотношениям (1), (2) и (2a) динамика размеров рыб следует монотонному росту, при котором отсутствует их сезонная изменчивость. Необходимо также отметить, что при использовании (2) отсутствуют отрицательные приросты массы (см. рис. 1, б). В связи с чем актуальными являются более детальные модельные разработки динамики  $l$  и  $w$ .

Для представления динамики  $l$  здесь используется принятое в системе "ресурс-потребитель" стандартное положение, согласно которому она (дина-

мика) определяется текущим значением  $l$  и текущим значением доступного для нее "ресурса"  $l_{\max} - l$ . Дополнительный учет характера динамики  $l$  приводит к наиболее общему в таком случае соотношению

$$dl/dt = \varphi_l(t)(l_{\max} - l)^{\gamma} l, \quad (3)$$

где  $\varphi_l(t)$ ,  $\gamma$  — некоторая функция и параметр модели (3). Они подлежат оцениванию на основании выборочных данных [2, 8, 9]. Если  $[l] = \text{см}$ , то  $[\varphi_l(t)] = [\text{мес} \cdot \text{см}^{\gamma}]^{-1}$ . Нелинейность правой части соотношения (3) отражает определенную скачкообразность изменения кривой динамики (она следует из анализа рис. 1). Показатель степени  $\gamma$  характеризует интенсивность "трансформации ресурса"  $\varphi_l(t)(l_{\max} - l)^{\gamma}$  длины в динамику  $\ln l$  и определяет различия ее темпов у молодых (следует рис. 1, полутора лет) и более взрослых рыб [6]. Действительно, при  $\varphi_l(t) = \text{const}$  чем выше  $\gamma$ , тем ближе точка перегиба кривой  $l(t)$  расположена к началу координат, иными словами, тем выше темп роста длины молодых особей. С возрастом он снижается, вплоть до его прекращения у самых возрастных рыб.

Согласно вычислительным экспериментам  $\varphi_l(t) = \varphi_0 + \varphi_1 \cos(\omega t) + \varphi_2 \sin(\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi/18$ ,  $\varphi_0 = (7,657 \pm 0,824) \cdot 10^{-7}$ ,  $\varphi_1 = (-3,734 \pm 0,481) \cdot 10^{-7}$  и  $\varphi_2 = (3,626 \pm 0,339) \cdot 10^{-7}$ ,  $\gamma = 3,285 \pm 0,084$ . На рис. 2 показано выборочное и модельные распределения длины.

Кривые выборочной длины и модели Бергаланфи близки в начальный и конечный периоды жизненного цикла рыб. Такая ситуация обусловлена плавным характером их изменения. Кривая модели Бергаланфи только указывает тренд динамики и в меньшей степени отражает ее реальность (в том числе конечность длины рыб). Пересечением кривых выборочной длины и модели (3) соответствует возраст около полутора и шести лет. До точки их

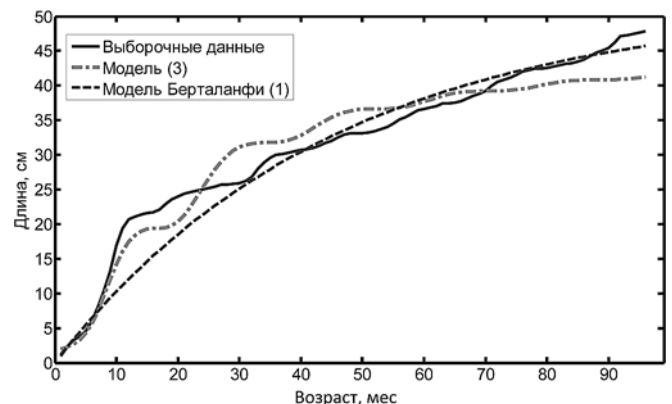


Рис. 2. Динамика длины рыб (выборочное и модельные распределения)

первого пересечения они практически не отличаются. Стремительный рост происходит первые полтора года, а далее к октябрю, с началом осеннего выхолаживания вод, он замедляется (в возрасте одного года). Между пересечениями выборочная длина меньше ее модельного образа, что обусловлено преобладанием тугорослых особей (медленно растущих рыб) в общей массе рыб. Затем следует обратная картина, которая характеризуется низкими амплитудами сезонной ритмики и выходом на плато. В этой ситуации модельное распределение в большей степени, чем усредненное выборочное распределение, отражает индивидуальную динамику длины рыб, поскольку динамика зависит от вариабельности этого показателя и селективной смертности рыб [5].

В практике расчета массы рыб обычно используют выражения (2) и (2а). Для рассматриваемого выборочного материала оценки параметров (2) определяются интервалами:  $w_{\infty} = 2500$  г и  $k_w = 0,948 \pm 0,012$  мес<sup>-1</sup>. Коэффициент детерминации для (2) составляет 0,943. На рис. 3 показаны выборочные и модельные распределения массы рыб.

Здесь в наибольшей степени различаются кривые выборочной массы и его модельного образа (2а), где задаются выборочные значения длины. Вместе с тем выборочная кривая наиболее близка к точечной кривой. Она также задается уравнением (2а), но длина  $l$  определяется выражением (3). В этом и проявляется функциональная связь длины и массы: в отдельные моменты времени модельная динамика массы "подстраивается" под соответствующую ей модельную динамику длины. Отличие заданных одной формулой (2а) кривых, но с различным представлением длины, обусловлено следующим. Модельные данные нивелируют "шум", обусловленный селективной смертностью (жизненный цикл медленно растущих рыб, как правило, короче жизненного цикла остальных рыб). Низкая выживаемость мед-

леннорастущих рыб проявляется в старших возрастных группах, что заметно завышает темпы популяционного роста с шестого года жизни [5].

При этом кривая модели 2а в срединный отрезок жизни рыб в меньшей степени отражает сезонную динамику массы. Вероятно, это обусловлено тем, что при наступлении периода половозрелости амплитуда колебаний массы резко увеличивается за счет динамики жиронакопления и динамики массы половых продуктов [5, 13]. Последний этап характеризуется снижением интенсивности обменных процессов, следствием чего является уменьшение амплитуды колебания массы (в относительном выражении).

Разработка модели динамики массы рыб здесь выполнялась на основании анализа кривой его относительного прироста в единицу времени (рис. 4).

Распределение участков кривой указывает на ритмический характер затухания относительного прироста массы, где ритмичность соответствует последовательности жизненных циклов организма. Наибольший относительный прирост имеют рыбы до момента их полового созревания, наименьший прирост — в конечный период своей жизни, когда практически вся обеспечиваемая пищей энергия тратится на поддержание жизни.

В рамках этих фактов достоверным представляется допущение, что динамика массы пропорциональна ее степенной функции. А коэффициентом пропорциональности выступает гармоническая функция времени:

$$dw/dt = \varphi_w(t)w^{\mu}, \quad (4)$$

где  $\mu$  — подлежащая определению неотрицательная константа. Согласно вычислительным экспериментам сомножитель в соотношении (3) характеризуется двумя гармониками с периодами 12 и 18 месяцев.

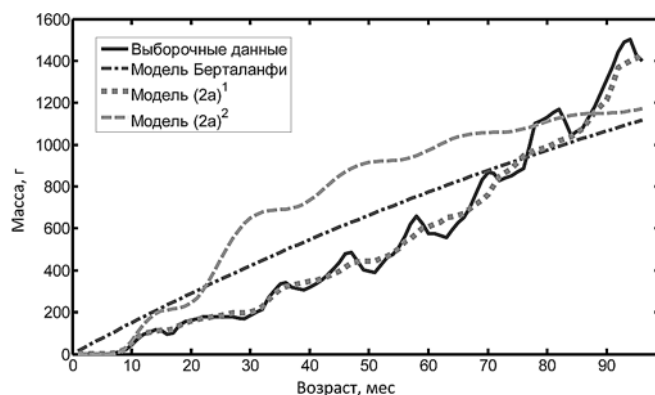


Рис. 3. Выборочные и модельные распределения массы (верхние индексы указывают выборочную (1) или модельную (2) подстановку в (2а) длины)

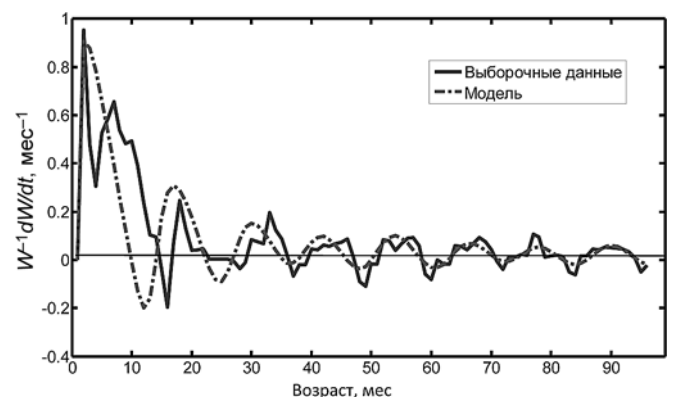


Рис. 4. Выборочное и сглаженное распределения относительного прироста массы в единицу времени

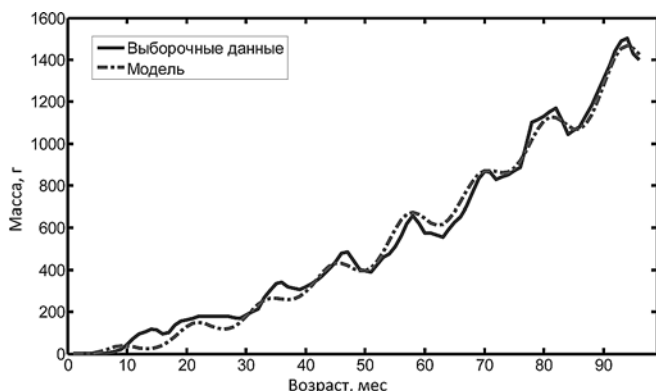


Рис. 5. Выборочное и модельное распределения массы

$$\text{Тогда } \varphi_w(t) = \varphi_{w0} + \sum_{k=1}^2 [\varphi_{w1,k} \cos(\omega_k t) + \varphi_{w2,k} \sin(\omega_k t)],$$

где  $\omega_1 = 2\pi/12$  и  $\omega_2 = 2\pi/18$ . Значения параметров определяются интервалами:  $\varphi_{w0} = 1,499 \pm 0,214$ ;  $\varphi_{w1,1} = -2,519 \pm 0,907$ ;  $\varphi_{w2,1} = 0,915 \pm 0,664$ ;  $\varphi_{w1,2} = 0,661 \pm 0,496$ ;  $\varphi_{w2,2} = -0,328 \pm 0,503$  и  $\mu = 0,388 \pm 0,026$ . Коэффициент детерминации равен 0,994. Взаимное расположение кривых указывает на хорошее для практики соответствие выборочного и модельного распределений. На рис. 5 показаны выборочное и модельное распределения массы.

Динамика массы рыбы здесь определяется двумя гармоническими составляющими. Первая, 12-месячная (годовая) составляющая обусловлена циклическостью вращения Земли вокруг Солнца, а вторая, 18-месячная, по-видимому, обусловлена присущим данному виду рыб специфичным внутренним генетическим циклом.

Интересно заметить, что включение в набор периодов дополнительных гармонических составляющих приводит к значительному несовпадению отмеченных кривых. В частности, при включении трех и/или четырех составляющих дисперсии ошибки равны 1866,358 и 1865,593. Тогда как при исходном наборе она равна 1866,708. Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что только такой набор 12- и 18-месячных гармонических составляющих обуславливает наибольшее совпадение выборочного и модельного распределений.

### Заключение

Выполнена формализация численных моделей динамики длины и массы рыб, где учитывалась ограниченность фазового пространства (конечность времени жизни, предельность длины и массы) и

полагалась функциональная связь между длиной и массой особей, этапность их жизненного цикла и комплексное влияние сезонных факторов. Для оценки адекватности между выборочным и модельным распределениями проведена серия вычислительных экспериментов. Численные эксперименты показывают, что динамика длины определяется 18-месячной гармонической составляющей, а динамика массы — 12-месячной и 18-месячной составляющими. Выполнена предметная интерпретация полученных результатов.

### Список литературы

1. **Базыкин А. Д.** Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2003. 368 с.
2. **Бард Й.** Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979. 349 с.
3. **Вдовин А. Н.** Биология и динамика численности южного одноперого терпуга (*Pleurogrammus azonus*) // Изв. ТИНРО, 1998. Т. 123. С. 16—45.
4. **Вдовин А. Н., Васильков В. П.** Определение возраста южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* Jordan et Metz (Hexagrammidae) алгоритмическими методами распознавания образов с обучением // Вопр. ихтиологии. 1982. Т. 22, вып. 6. С. 1006—1014.
5. **Вдовин А. Н., Швыдкий Г. В.** Физиологические аспекты роста одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в водах Приморья // Вопр. ихтиологии, 1993. Т. 33, вып. 1. С. 156—160.
6. **Вдовин А. Н., Четырбоцкий А. Н., Четырбоцкий В. А.** Компьютерное моделирование динамики роста рыб (на примере южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus*. Часть I. // Информационные технологии. 2015. № 2. С. 116—120.
7. **Суханов В. В.** Математическая модель сезонной динамики весового роста молоди нерки (*Oncorhynchus nerka*, Walb.) // Вопр. ихтиологии, 1974. Т. 14, № 4. С. 575—580.
8. **Четырбоцкий А. Н.** Параметрическая идентификация математической модели формирования плазменно-электролитических покрытий // Информационные технологии. 2006. № 9. С. 60—67.
9. **Четырбоцкий А. Н.** Крупномасштабное математическое моделирование пространственно-временной динамики морского ледяного покрова (на примере Японского моря). Владивосток: Дальнаука, 2009. 195 с.
10. **Akamaine T.** Non-linear and graphical method for fish stock analysis with statistical modeling // Aqua-BioSci. Monogr., 2009. V. 2, N. 3. P. 1—45.
11. **Bertalanffy L.** Principles and theory of growth // Fundamental aspects of normal and malignant growth. Amsterdam: Elsevier, 1960. P. 137—259.
12. **Enberg K., Dunlop E. S., Jørgensen C.** Fish grows // Ecological models. 2008. P. 1564—1572.
13. **Vdovin A., Antonenko D.** Correlation between fat content and features of generative growth of arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* // Journal of Coastal Life Medicine. 2014. V. 2, N. 9. P. 679—683.

## The Computer Simulation of the Dynamics of the Length and Weight of Fish (on the Example of South Odnoperogo of Atka Mackerel *Pleurogrammus Azonus*)

*Based on the analysis of the sampling distribution length and weight of fish developed numerical models of their dynamics, which take into consideration the limited phase space (limb lifetime limit length and weight) and relies on the functional relationship between the length and weight of individuals, stages of their life cycle and the impact of seasonal factors. To estimate parameters, we performed a series of computational experiments. It is shown that the dynamics of the length is determined by the 18-month harmonic component, and the dynamics of weight — 12-month and 18-month components. Performed substantive interpretation of the results.*

**Keywords:** *sampling distribution, the numerical model, the task of finding the minimum, the adequacy of the model*

### References

1. **Bazykin A. D.** *Nelinejnaja dinamika vzaimodejstvujushhh populjacij*. Izhevsk: Institut Komp'juternyh issledovanij. 2003. 368 p.
2. **Bard J.** *Nelinejnoe ocenivanie parametrov*. M.: Statistika, 1979. 349 p.
3. **Vdovin A. N.** Biologija i dinamika chislennosti juzhnogo odnoperogo terpuga (*Pleurogrammus azonus*). *Izv. TINRO*, 1998. V. 123. P. 16—45.
4. **Vdovin A. N., Vasil'kov V. P.** Opredelenie vozrasta juzhnogo odnoperogo terpuga *Pleurogrammus azonus* Jordanet Metz (Hexagrammidae) algoritmicheskimi metodami raspoznavanija obrazov s obucheniem. *Voprosi ihtiologii*. 1982. V. 22, issue 6. P. 1006—1014.
5. **Vdovin A. N., Shvydkij G. V.** Fiziologicheskie aspekty rosta odnoperogo terpuga *Pleurogrammus azonus* v vodah Primor'ja. *Vopr. Ihtiologii*. 1993. V. 33, issue 1. P. 156—160.
6. **Vinberg G. G.** Zavisimost' jenergeticheskogo obmena ot massy tela u vodnyh pojkilotermnyh zhivotnyh. *Zhurn. obshh. Biologii*. 1976. V. 37, N. 1. P. 56—70.
7. **Suhanov V. V.** Matematicheskaja model' sezonnoj dinamiki vesoyogo rosta molodi nerki (*Oncorhynchus nerka*, Walb.). *Vopr. Ihtiologii*. 1974. V. 14, N. 4. P. 575—580.
8. **Chetyrbockij A. N.** Parametricheskaja identifikacija matematicheskoj modeli formirovanija plazmenno-jelektroliticheskikh pokrytij. *Informacionnye tehnologii*. 2006. N. 9. P. 60—67.
9. **Chetyrbockij A. N.** *Krupnomasshtabnoe matematicheskoe modelirovanie prostranstvenno-vremennoj dinamiki morskogo ledjanogo pokrova (na primere Japonskogo morja)*. Vladivostok: Dal'nauka, 2009. 195 p.
10. **Akamaine T.** Non-linear and graphical method for fish stock analysis with statistical modeling. *Aqua-BioSci. Monogr.* 2009. Vol. 2, N. 3. P. 1—45.
11. **Bertalanffy L.** *Principles and theory of growth. Fundamental aspects of normal and malignant growth*. Amsterdam: Elsevier, 1960. P. 137—259.
12. **Enberg K., Dunlop E. S., Jørgensen C.** Fish grows. *Ecological models*. 2008. P. 1564—1572.
13. **Vdovin A., Antonenko D.** Correlation between fat content and features of generative growth of arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*. *Journal of Coastal Life Medicine*. 2014. V. 2, N. 6. P. 679—683.



УДК 621.391

**Р. Р. Рзаев**, д-р, профессор, гл. науч. сотр., e-mail: raminrza@yahoo.com,  
**А. И. Гююшов**, докторант, e-mail: geyushev@hotmail.com,  
**А. Ш. Алмасов**, докторант, e-mail: askalmasov@gmail.com,  
Институт Систем Управления НАН Азербайджана

## Оценка качества услуг телекоммуникационной сети связи на основе метода нечеткого моделирования

*Предлагается подход к формированию модульной интеллектуальной системы оценки качества услуг телекоммуникационных сетей связи, основанный на применении метода нечеткого логического вывода. Предлагаемая в рамках данного подхода базовая нечеткая модель оценки в необходимой мере учитывает рекомендации Международного Союза Электросвязи в части, касающейся функционирования сетей пакетной коммутации на основе IP-протокола.*

**Ключевые слова:** IP-телефония, качество связи, параметр производительности сети связи, нечеткое множество, нечеткая импликация, нечеткое отношение

### Введение

На современном этапе развития телекоммуникационных сетей связи и беспроводных технологий наиболее остро стоит задача повышения качества услуг связи, которая постоянно совершенствуется по мере увеличения скорости передачи данных, повышения степени мобильности пользователей, расширения ассортимента предоставляемых услуг, улучшения степени использования радиочастотного спектра и степени интеллектуализации сетевого оборудования и абонентских гаджетов. При этом совершенствование телекоммуникационных сетей связи происходит на стыке противоречий между постоянно растущим потребительским спросом на абонентские услуги и ограниченным числом частот, что является вполне объективным. В свою очередь, это обуславливает существенное расширение спектра предоставляемых операторами связи услуг, увеличение потребительских требований к их качеству и, как следствие, совершенствование применяемых технологий управления.

Дело в том, что в процессе эксплуатации объективные технические характеристики сетей связи наследуются системами телекоммуникационных услуг, трансформируясь тем самым в характеристики предоставляемых услуг. Но и сами услуги связи имеют свои характерные особенности, среди которых доминирующей является качество телекоммуникационных услуг. При этом если на начальном этапе становления и продвижения сетей связи качество

предоставляемых ими услуг характеризуется совокупностью объективных технических характеристик, то уже на стадии эксплуатации происходит трансформация этих характеристик, так как в условиях конкурентного рынка телекоммуникационных услуг качество сетей становится предметом обсуждения и субъективных оценок их пользователей. В результате категория качества предоставляемых телекоммуникационных услуг все больше смещается в сторону неметризуемых характеристик, отражающих общую меру субъективной удовлетворенности потребителей.

Как и любой потребительский товар, услуга связи подчиняется законам рынка. Поэтому увеличение клиентской базы, обеспечивающей конкурентную позицию и, соответственно, рост прибыли становится основной прерогативой телекоммуникационных компаний. При этом требования абонентов связи, которые в основном оценивают услугу связи через свои субъективные суждения, такие, например, как "наличие (или отсутствие) прерываний связи", "недостаточно (или достаточно) хорошая слышимость", "приемлемая (или неприемлемая) разборчивость речи" и т. д., становятся доминирующими факторами, с которыми руководству телекоммуникационных компаний приходится считаться. Собственно по набору перечисленных субъективных требований к качеству связи и осуществляется абонентский выбор в пользу той или иной услуги связи.

## Постановка задачи

Очевидно, что субъективные оценки пользователей к качеству связи являются производными от объективных (технических) характеристик сети и результата их взаимодействия с характеристиками информационного трафика. В условиях жесткой конкуренции эти неметризуемые субъективные оценки пользователей становятся целевыми функциями, через которые менеджменту компании необходимо оценить субъективную удовлетворенность клиента. С учетом мультисервисности современных телекоммуникационных сетей необходимо решить эту задачу для всего спектра услуг связи в рамках создания единой системы оценки качества, обрабатывающей как объективные (структурированные), так и субъективные (слабо структурированные) показатели качества.

### Система контроля качества услуг связи в условиях нечеткой среды

На сегодняшний день одними из эффективных методов управленческих технологий являются элементы искусственного интеллекта, в том числе нечеткая логика и нечеткие процессоры, которые хорошо зарекомендовали себя в управлении беспроводными телекоммуникационными сетями. В частности, применение методов нечеткой логики в управлении когнитивными системами связи позволяет легко учитывать множество параметров для принятия решения и не требует сложных математических расчетов. Более того, математический аппарат теории нечетких множеств позволяет одинаково легко оперировать как метризуемыми, так и неметризуемыми данными.

Рассмотрим типовую функциональную схему системы контроля качества услуг связи [1, с. 26], в основе которой лежит механизм нечеткого логи-

ческого вывода, позволяющий оперативно давать многокритериальную оценку предоставляемой услуги в условиях нечеткой информации (рис. 1). В качестве объективных показателей качества выберем те, которые можно контролировать при определении уровней качества услуг связи. Более того, эти показатели должны быть хорошо известны, однозначно интерпретироваться и, что самое главное, адекватно отражать качество услуг. В ряде рекомендаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ) (см. [2, с. 15]) для широко распространенных сетей пакетной коммутации на основе IP-протоколов (IPv4 и IPv6) предлагается контролировать конкретные объективные показатели качества для установления уровня услуг. В частности, в рекомендации Y.1541 МСЭ приводятся сетевые классы обслуживания (*Network QoS Classes*), формируемые по объективным признакам (качествам) пользовательских услуг связи и приложений. В качестве таких признаков в данной рекомендации указаны численные значения параметров производительности сети, которые представлены в таблице.

В качестве примера услуги связи рассмотрим телефонную связь по протоколу IP (IP-телефонию), которая является приложением более общей технологии VoIP (Voice over IP) для передачи голоса. Выбор этой услуги обосновывается еще и тем, что IP-телефония очень чувствительна к джиттеру.

Согласно рекомендации Y.1541 IP-телефония может функционировать при наличии параметров производительности, соответствующих классам 0 и/или 1 [2, с. 15]. При этом предоставление услуги по классу 0 гарантирует высокое качество, а значит, и удовлетворенность пользователей сети. В то же время качество услуги IP-телефонии по классу 1 будет чуть хуже, и это придется компенсировать за счет внедрения дополнительных опций, чтобы продолжать расширять клиентскую базу. В остальных случаях качество связи будет слишком низким.

В работе [1] предложен весьма любопытный подход для формирования нечеткой системы оценки качества услуг связи. По средствам сформированных непротиворечивых лингвистических правил автор проводит тщательный анализ качества предоставляемых услуг на базе доступной информации о параметрах производительности сети (см. таблицу), т. е. судит об их качестве на основе объективных характеристик, интерпретируемых в виде адекватных нечетких множеств. Однако в представленном подходе недостаточно отчетливо проглядывается то, как эти объективные качества сетевых услуг трансформируются в субъективные сужде-

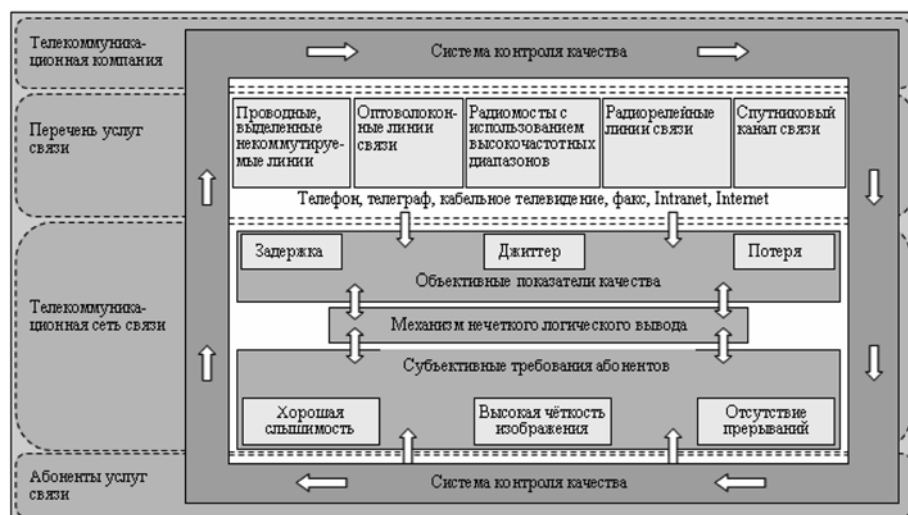


Рис. 1. Схема функционирования системы контроля качества услуг связи

**Классификация обслуживания по параметрам производительности сети**

Параметр производительности сети	Комментарий	QoS классы					
		Класс 0	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
Задержка в передаче (IPTD — IP-packet Transfer Delay)	Верхняя граница от среднего IPTD	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1 с	U <sup>1</sup>
Джиттер (IPDV — IP-packet Delay Variation)	Разброс от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета	50 мс	50 мс	U	U	U	U
Вероятность потери (IPLR — IP-packet Loss Ratio)	Верхняя граница вероятности потери IP-пакета	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	U
Вероятность ошибки (IPER — IP-packet Error Ratio)	Верхняя граница вероятности ошибки в передаче IP-пакета			$1 \cdot 10^{-4}$			U

<sup>1</sup>U означает неустановленность

ния потребителей, в их субъективные критерии оценки. Другими словами, формируя причинно-следственные связи между этими характеристиками, можно было бы классифицировать качества предоставляемых услуг по степеням удовлетворенности пользователей сети, чем, собственно, мы и собираемся далее заняться.

**Классификация степеней удовлетворенности потребителей телекоммуникационных услуг (на примере IP-телефонии)**

Очевидно, что оценка качества услуг связи является многокритериальной процедурой, подразумевающей применение композиционного правила агрегирования оценки в каждом конкретном случае. Для оценки качества услуг IP-телефонии выберем пять оценочных понятий для значений параметров производительности сети:  $u_1$  — "СЛИШКОМ НИЗКОЕ";  $u_2$  — "НИЗКОЕ";  $u_3$  — "ДОСТАТОЧНО НИЗКОЕ";  $u_4$  — "СУЩЕСТВЕННОЕ";  $u_5$  — "ВЫСОКОЕ". Проще говоря, под множеством  $S = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$  будем понимать совокупность признаков, по которым будем классифицировать качество услуг связи. Тогда, полагая технические характеристики сети (критерии оценки качества) нечеткими множествами, оценку предоставляемых услуг IP-телефонии проведем с использованием достаточного набора нечетких импликативных правил вида "Если ..., тогда ..." и на их основе установим соответствующую шкалу градации удовлетворенности потребителей услуг.

Итак, сформулируем наши суждения следующим образом:

$e_1$ : "Если при передаче IP-пакета не наблюдаются задержка и существенный разброс от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета, тогда качество сети удовлетворительное";

$e_2$ : "Если вдобавок к перечисленным выше требованиям не имеют место потери IP-пакета, тогда качество сети более чем удовлетворительное";

$e_3$ : "Если дополнительно к условиям, оговоренным в  $e_2$ , не имеют место ошибки в передаче IP-пакета, тогда качество сети безупречное";

$e_4$ : "Если при передаче IP-пакета не наблюдается существенного разброса от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета и не имеют место потери и ошибки, тогда качество сети очень удовлетворительное";

$e_5$ : "Если при передаче IP-пакета не имеют место задержки и потери, но при этом наблюдаются ошибки в передаче IP-пакета, тогда качество сети все же удовлетворительное";

$e_6$ : "Если при передаче IP-пакета наблюдаются потери и ошибки, тогда качество сети неудовлетворительное".

В приведенных высказываниях (причинно-следственных связях) входными характеристиками будем считать следующие признаки:

- $X_1$  — наличие задержки в передаче IP-пакета;
- $X_2$  — наличие джиттера в передаче IP-пакета;
- $X_3$  — вероятность потерь при передаче IP-пакета;
- $X_4$  — вероятность ошибки при передаче IP-пакета,

а выходной характеристикой  $Y$ , собственно, саму оценку качества услуги связи — уровень удовлетворенности потребителя. Тогда, определив соответствующие значения (термы) лингвистических переменных  $X_i$  ( $i = 1 \div 4$ ) и  $Y$ , на базе приведенных высказываний построим следующие импликативные правила:

$e_1$ : "ЕСЛИ  $X_1$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$  = УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_2$ : "Если  $X_1$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$  = БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_3$ : "Если  $X_1$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_2$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$  = БЕЗУПРЕЧНОЕ";

$e_4$ : "ЕСЛИ  $X_2$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$  = ОЧЕНЬ УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_5$ : "ЕСЛИ  $X_1$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_3$  = НЕ ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4$  = ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$  = УДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ";

$e_6$ : "ЕСЛИ  $X_3$  = ИМЕЕТ МЕСТО и  $X_4$  = ИМЕЕТ МЕСТО, то  $Y$  = НЕУДОВОЛВОРИТЕЛЬНОЕ".

Лингвистическую переменную  $Y$  зададим на дискретном множестве  $J = \{0; 0,1; 0,2; \dots; 1\}$ . Тогда используемые в импликативных правилах ее термы опишем нечеткими множествами с соответствующими функциями принадлежности [4, с. 78]:

- $\tilde{S}$  = УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{\tilde{S}}(x) = x, x \in J$ ;
- $M\tilde{S}$  = БОЛЕЕ ЧЕМ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{M\tilde{S}}(x) = \sqrt{x}, x \in J$ ;
- $\tilde{P}$  = БЕЗУПРЕЧНОЕ,  $\mu_{\tilde{P}}(x) = \begin{cases} 1, & x = 1, \\ 0, & x < 1, \end{cases} x \in J$ ;
- $V\tilde{S}$  = ОЧЕНЬ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{V\tilde{S}}(x) = x^2, x \in J$ ;
- $U\tilde{S}$  = НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ,  $\mu_{U\tilde{S}}(x) = 1 - x, x \in J$ .

Далее, фаззификацию термов в левых частях принятых правил осуществим с помощью гауссовских функций принадлежности  $\mu(u) = \exp(-u^2/\sigma_k^2)$  ( $k = 1 \div 4$ ), восстанавливающих нечеткие множества по опорному вектору  $(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5)$ , где  $u_i = (d_{i-1} + d_i)/2$  ( $i = 1 \div 5$ ) (рис. 2). При этом значения для  $\sigma_k$  подбираются исходя из степени важности признаков, по которым классифицируется качество услуг связи.

На рис. 2 градация уровней производительности сети представлена в общем виде. Однако очевидно, что простым преобразованием  $t = (x - d_0)/(d_5 - d_0)$ , где  $x \in [d_0, d_5]$ ,  $t \in [0, 1]$ , данный интервал  $[d_0, d_5]$  можно легко свести к единичному интервалу  $[0, 1]$ . Поэтому, оценивая качество услуг связи с точки зрения ее технических характеристик, градуированных в масштабе единичного интервала (рис. 3), где

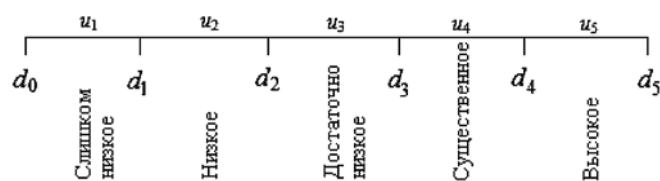


Рис. 2. Равномерная градация параметров производительности по уровням<sup>1</sup>

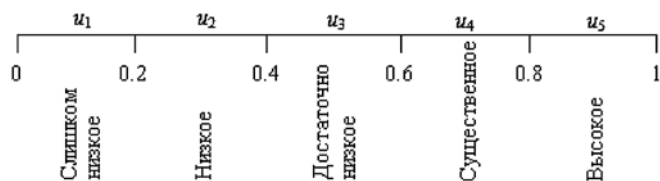


Рис. 3. Уровни значений параметров производительности сети в масштабе единичного отрезка

<sup>1</sup> Данная градация может быть и неравномерной, что несколько не меняет сути подхода.

$d_i = 0,2i$  ( $i = 0 \div 5$ ), фаззифицируем термы из левых частей импликативных правил в следующем виде:

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (задержка в передаче IP-пакета):

$$\tilde{A} = \frac{0,9394}{u_1} + \frac{0,5698}{u_2} + \frac{0,2096}{u_3} + \frac{0,0468}{u_4} + \frac{0,0063}{u_5};$$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (разброс от среднего максимального и минимального времени прохождения IP-пакета):

$$\tilde{B} = \frac{0,9518}{u_1} + \frac{0,6412}{u_2} + \frac{0,2910}{u_3} + \frac{0,0889}{u_4} + \frac{0,0183}{u_5};$$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (потеря IP-пакета):

$$\tilde{C} = \frac{0,9216}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5};$$

- НЕ ИМЕЕТ МЕСТО (ошибка при передаче IP-пакета):

$$\tilde{D} = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5}.$$

Тогда с учетом этих формализмов нечеткие правила сформулируем как:

$$e_1: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_2 = \tilde{B}, \text{ то } Y = \tilde{S}\text{"};$$

$$e_2: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_2 = \tilde{B} \text{ и } X_3 = \tilde{C}, \text{ то } Y = M\tilde{S}\text{"};$$

$$e_3: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_2 = \tilde{B} \text{ и } X_3 = \tilde{C} \text{ и } X_4 = \tilde{D}, \text{ то } Y = \tilde{P}\text{"};$$

$$e_4: \text{"Если } X_2 = \tilde{B} \text{ и } X_3 = \tilde{C} \text{ и } X_4 = \tilde{D}, \text{ то } Y = V\tilde{S}\text{"};$$

$$e_5: \text{"Если } X_1 = \tilde{A} \text{ и } X_3 = \tilde{C} \text{ и } X_4 = -\tilde{D}, \text{ то } Y = \tilde{S}\text{"};$$

$$e_6: \text{"Если } X_3 = -\tilde{C} \text{ и } X_4 = -\tilde{D}, \text{ то } Y = U\tilde{S}\text{"}.$$

Далее, для левых частей этих правил вычислим функции принадлежности  $\mu_{\tilde{M}_i}(u)$  ( $i = 1 \div 6$ ). В частности, имеем:

$$e_1: \mu_{\tilde{M}_1}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{B}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_1 = \frac{0,9394}{u_1} + \frac{0,5698}{u_2} + \frac{0,2096}{u_3} + \frac{0,0468}{u_4} + \frac{0,0063}{u_5};$$

$$e_2: \mu_{\tilde{M}_2}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{B}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_2 = \frac{0,9216}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5};$$

$$e_3: \mu_{\tilde{M}_3}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{B}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u), \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_3 = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5};$$

$$e_4: \mu_{\tilde{M}_4}(u) = \min\{\mu_{\tilde{B}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u), \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_4 = \frac{0,8948}{u_1} + \frac{0,3679}{u_2} + \frac{0,0622}{u_3} + \frac{0,0043}{u_4} + \frac{0,0001}{u_5};$$

$$e_5: \mu_{\tilde{M}_5}(u) = \min\{\mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{C}}(u), 1 - \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_5 = \frac{0,1052}{u_1} + \frac{0,4797}{u_2} + \frac{0,1299}{u_3} + \frac{0,0183}{u_4} + \frac{0,0013}{u_5};$$

$$e_6: \mu_{\tilde{M}_6}(u) = \min\{1 - \mu_{\tilde{C}}(u), 1 - \mu_{\tilde{D}}(u)\},$$

$$\tilde{M}_6 = \frac{0,0784}{u_1} + \frac{0,5203}{u_2} + \frac{0,8701}{u_3} + \frac{0,9817}{u_4} + \frac{0,9987}{u_5}.$$

В итоге правила запишем в еще более компактной форме:

- $e_1$ : "Если  $X = \tilde{M}_1$ , то  $Y = \tilde{S}$ ";
- $e_2$ : "Если  $X = \tilde{M}_2$ , то  $Y = M\tilde{S}$ ";
- $e_3$ : "Если  $X = \tilde{M}_3$ , то  $Y = \tilde{P}$ ";
- $e_4$ : "Если  $X = \tilde{M}_4$ , то  $Y = V\tilde{S}$ ";
- $e_5$ : "Если  $X = \tilde{M}_5$ , то  $Y = \tilde{S}$ ";
- $e_6$ : "Если  $X = \tilde{M}_6$ , то  $Y = U\tilde{S}$ ".

Для преобразования этих импликативных правил воспользуемся импликацией Лукасевича [3, с. 54; 6, с. 78]:

$$\mu_{\tilde{H}}(u, j) = \min(1, 1 - \mu_{\tilde{M}}(w) + \mu_{\tilde{Y}}(j)). \quad (1)$$

Тогда для каждой пары  $(u, j) \in U \times Y$  получим следующие нечеткие отношения на  $U \times Y$ :

$$R_1 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,0606 & 0,1606 & 0,2606 & 0,3606 & 0,4606 & 0,5606 & 0,6606 & 0,7606 & 0,8606 & 0,9606 & 1 \\ 0,4302 & 0,5302 & 0,6302 & 0,7302 & 0,8302 & 0,9302 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,7904 & 0,8904 & 0,9904 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9532 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9937 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_2 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,0784 & 0,3946 & 0,5256 & 0,6261 & 0,7108 & 0,7855 & 0,8530 & 0,9150 & 0,9728 & 1 & 1 \\ 0,5203 & 0,8366 & 0,9676 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8701 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9817 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9987 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_3 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 1 \\ 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 \\ 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 & 0,9378 \\ 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 & 0,9957 \\ 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 & 0,9999 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_4 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,1052 & 0,1152 & 0,1452 & 0,1952 & 0,2652 & 0,3552 & 0,4652 & 0,5952 & 0,7452 & 0,9152 & 1 \\ 0,6321 & 0,6421 & 0,6721 & 0,7221 & 0,7921 & 0,8821 & 0,9921 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9378 & 0,9478 & 0,9778 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9957 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9999 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_5 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,8948 & 0,9948 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,5203 & 0,6203 & 0,7203 & 0,8203 & 0,9203 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8701 & 0,9701 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9817 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,9987 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

$$R_6 = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,9216 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0,9797 & 0,8797 & 0,7797 & 0,6797 & 0,5797 & 0,4797 \\ 1 & 1 & 0,9299 & 0,8299 & 0,7299 & 0,6299 & 0,5299 & 0,4299 & 0,3299 & 0,2299 & 0,1299 \\ 1 & 0,9183 & 0,8183 & 0,7183 & 0,6183 & 0,5183 & 0,4183 & 0,3183 & 0,2183 & 0,1183 & 0,0183 \\ 1 & 0,9013 & 0,8013 & 0,7013 & 0,6013 & 0,5013 & 0,4013 & 0,3013 & 0,2013 & 0,1013 & 0,0013 \end{array} \right. \end{matrix}$$

В результате пересечения нечетких отношений  $R_1, R_2, \dots, R_6$  в итоге получим следующее общее функциональное решение, отражающее причинно-следственную связь между параметрами производительности сети и качеством предоставляемых ею услуг:

$$R = \begin{matrix} & 0 & 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,7 & 0,8 & 0,9 & 1 \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccc} 0,0606 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,1052 & 0,9216 \\ 0,4302 & 0,5302 & 0,6302 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,6321 & 0,5797 & 0,4797 \\ 0,7904 & 0,8904 & 0,9299 & 0,8299 & 0,7299 & 0,6299 & 0,5299 & 0,4299 & 0,3299 & 0,2299 & 0,1299 \\ 0,9532 & 0,9183 & 0,8183 & 0,7183 & 0,6183 & 0,5183 & 0,4183 & 0,3183 & 0,2183 & 0,1183 & 0,0183 \\ 0,9937 & 0,9013 & 0,8013 & 0,7013 & 0,6013 & 0,5013 & 0,4013 & 0,3013 & 0,2013 & 0,1013 & 0,0013 \end{array} \right. \end{matrix}$$

Далее, для определения уровня качества услуг связи применим правило композиционного вывода в нечеткой среде:

$$\tilde{E}_k = \tilde{G}_k \circ R, \quad (2)$$

где  $\tilde{E}_k$  — качество услуг связи  $k$ -го уровня;  $\tilde{G}_k$  — отображение  $k$ -го уровня параметров производительности в виде нечеткого подмножества. Тогда, выбирая композиционное правило как

$$\mu_{\tilde{E}_k}(j) = \max_u \{\min(\mu_{\tilde{G}_k}(u), \mu_R(u))\} \quad (3)$$

и полагая, что  $\mu_{\tilde{G}_k}(u) = \begin{cases} 0, & u \neq u_k; \\ 1, & u = u_k, \end{cases}$  в итоге имеем:

$$\mu_{\tilde{E}_k}(j) = \mu_R(u_k, j), \text{ т. е. } \tilde{E}_k \text{ есть } k\text{-я строка матрицы } R.$$

Теперь для классификации качества услуг применим процедуру дефаззификации нечетких выходов примененной модели. Итак, для оценочного понятия производительности сети  $u_1$  нечеткой интерпретацией соответствующего ему уровня качества услуг связи будет нечеткое множество

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1 &= \frac{0,0606}{0} + \frac{0,1052}{0,1} + \frac{0,1052}{0,2} + \frac{0,1052}{0,3} + \\ &+ \frac{0,1052}{0,4} + \frac{0,1052}{0,5} + \frac{0,1052}{0,6} + \frac{0,1052}{0,7} + \\ &+ \frac{0,1052}{0,8} + \frac{0,1052}{0,9} + \frac{0,9216}{1,0}. \end{aligned}$$

Устанавливая уровневые множества  $E_{1\alpha}$  и вычисляя соответствующие их мощности  $M(E_{1\alpha})$  по

формуле  $M(E_{1\alpha}) = \sum_{j=1}^n \frac{x_j}{n}$ , имеем:

- для  $0 < \alpha < 0,0606$ :  $\Delta\alpha = 0,0606$ ,  $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,5$ ;
- для  $0,0606 < \alpha < 0,1052$ :  $\Delta\alpha = 0,0446$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ ;
- для  $0,1052 < \alpha < 0,9216$ :  $\Delta\alpha = 0,8164$ ,  $E_{1\alpha} = \{1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 1$ .

Для нахождения точечных оценок нечетких выходов  $\tilde{E}_k$  воспользуемся равенством

$$F(\tilde{E}_k) = \frac{1}{\alpha_{\max}} \int_0^{\alpha_{\max}} M(\tilde{E}_{k\alpha}) d\alpha, \quad (k = 1 \div 5), \quad (4)$$

где  $\alpha_{\max}$  — максимальное значение на  $\tilde{E}_k$  [6, с. 56]. В данном случае имеем

$$F(\tilde{E}_1) = \frac{1}{0,9987} \int_0^{0,9987} M(E_{1\alpha}) d\alpha = (0,5 \cdot 0,0606 + 0,55 \cdot 0,0446 + 1 \cdot 0,8164) = 0,9454.$$

Для оценочного понятия производительности сети  $u_2$ :

$$\tilde{E}_2 = \frac{0,4302}{0} + \frac{0,5302}{0,1} + \frac{0,6302}{0,2} + \frac{0,6321}{0,3} + \frac{0,6321}{0,4} + \frac{0,6321}{0,5} + \frac{0,6321}{0,6} + \frac{0,6321}{0,7} + \frac{0,6321}{0,8} + \frac{0,5797}{0,9} + \frac{0,4797}{1,0},$$

соответственно имеем:

- для  $0 < \alpha < 0,4302$ :  $\Delta\alpha = 0,4302$ ,  $E_{1\alpha} = \{0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,50$ ;
- для  $0,4302 < \alpha < 0,4797$ :  $\Delta\alpha = 0,0494$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ ;
- для  $0,4797 < \alpha < 0,5302$ :  $\Delta\alpha = 0,0506$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,50$ ;
- для  $0,5302 < \alpha < 0,5797$ :  $\Delta\alpha = 0,0494$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ ;
- для  $0,5797 < \alpha < 0,6302$ :  $\Delta\alpha = 0,0506$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,50$ ;
- для  $0,6302 < \alpha < 0,6321$ :  $\Delta\alpha = 0,0019$ ,  $E_{1\alpha} = \{0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$ ,  $M(E_{1\alpha}) = 0,55$ .

Точечной оценкой нечеткого выхода  $\tilde{E}_2$  будет

$$F(\tilde{E}_2) = \frac{1}{0,6321} \int_0^{0,6321} M(E_{2\alpha}) d\alpha = (0,5 \cdot 0,4302 + 0,55 \cdot 0,0494 + 0,5 \cdot 0,0506 + 0,55 \cdot 0,0494 + 0,5 \cdot 0,0506 + 0,55 \cdot 0,0019) = 0,5080.$$

Аналогичными действиями устанавливаем точечные оценки и для остальных выходов:

- при уровне производительности сети  $u_3$  —  $F(\tilde{E}_3) = 0,3161$ ;

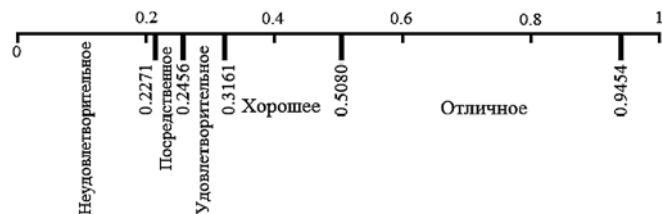


Рис. 4. Шкала градации качества услуг связи

- при уровне производительности сети  $u_4$  —  $F(\tilde{E}_4) = 0,2456$ ;
- при уровне производительности сети  $u_5$  —  $F(\tilde{E}_5) = 0,2271$ .

Таким образом, в принятых допущениях итоговая шкала для оценки качества IP-телефонии может выглядеть так, как это показано на рис. 4.

По существу, значение 0,2271, являющееся наименьшим дефазсифицированным выходом нечеткой модели многокритериальной оценки качества IP-телефонии, как верхняя граница соответствует консолидированной неудовлетворительной оценке пользователей сети. Аналогичным образом имеется в виду, что с точки зрения потребителей услуг IP-телефонии дефазсифицированный выход:

- 0,2456 — верхняя граница посредственной оценки;
- 0,3161 — верхняя граница удовлетворительной оценки;
- 0,5080 — верхняя граница хорошей оценки;
- 0,9454 — верхняя граница отличной оценки.

### Система оценки качества услуг связи и ее анализ (на примере IP-телефонии)

Теперь, после того как мы установили обоснованную шкалу для классификации качества услуг связи, рассмотрим, собственно, саму нечеткую модель для оценки качества услуг связи. Для этого воспользуемся следующими достаточно тривиальными имплицативными правилами.

1. Если задержка в передаче слишком низкая, и джиттер слишком низкий, и вероятность потерь слишком низкая, и вероятность ошибки слишком низкая, то качество IP-телефонии отличное.

2. Если задержка в передаче низкая, и джиттер низкий, и вероятность потерь низкая, и вероятность ошибки низкая, то качество IP-телефонии хорошее;

3. Если задержка в передаче достаточно низкая, и джиттер достаточно низкий, и вероятность потерь достаточно низкая, и вероятность ошибки достаточно низкая, то качество IP-телефонии удовлетворительное.

4. Если задержка в передаче существенная, и джиттер существенный, и вероятность потерь существенная, и вероятность ошибки существенная, то качество IP-телефонии посредственное.

5. Если задержка в передаче высокая, и джиттер высокий, и вероятность потерь высокая, и вероят-

ность ошибки высокая, то качество IP-телефонии неудовлетворительное.

В качестве входных характеристик здесь используются пять оценочных понятий, которые являются термами лингвистических переменных — параметров производительности сети. Используя диапазоны численных значений параметров про-

изводительности сети (см. таблицу), реализуем данные правила в нотации MATLAB/Fuzzy Sets Toolbox. Здесь выходной характеристикой является лингвистическая переменная "качество услуги связи", которая принимает пять нечетких значений (термов), формализуемых с помощью гауссовских функций принадлежности с вершинами соответственно в точках: 0,2271, 0,2456, 0,3161, 0,5080 и 0,9454.

Итак, после задания входных и выходных характеристик нечеткой модели в виде гауссовских функций принадлежности и нечетких импликативных правил приступим к анализу работы построенной системы. Реализация правил в нотации MATLAB/Fuzzy Sets Toolbox наглядно демонстрирует, что консолидированный уровень качества сети при гипотетически наилучших значениях параметров ее производительности не превышает значения 0,837 (рис. 5).

С увеличением задержек IP-пакетов до 376 мс уровень услуг падает до 0,417 (что согласно нашей градации соответствует хорошему качеству сети) и остается неизменным при дальнейшем их росте (рис. 6, а). При потере доли IP-пакета до  $10^{-3}$  качество услуг сети резко падает до значения 0,417 (рис. 6, б). Отметим также, что при данных сценариях качество услуг связи не меняется при увеличении уровня джиттера.

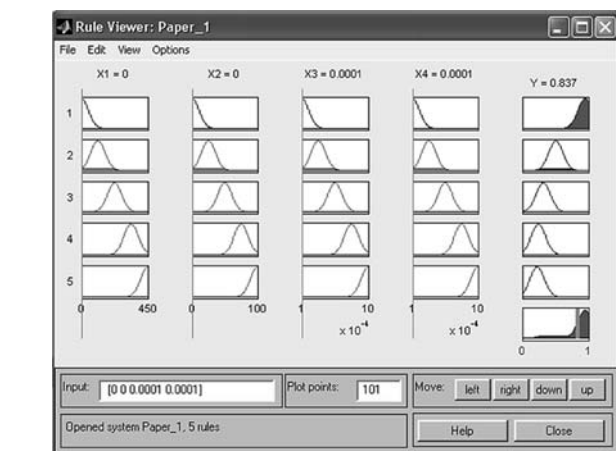
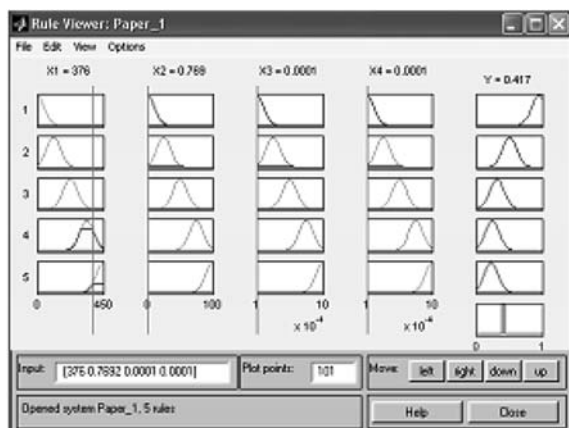
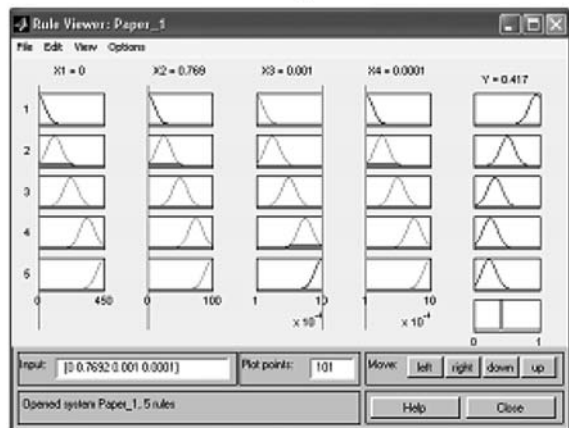


Рис. 5. Оценка качества услуг сети при наилучших значениях параметров производительности



а)



б)

Рис. 6. Качества услуг IP-телефонии при двух экстремальных значениях параметров сети

## Заключение

Как известно, нечеткая логика предоставляет возможность моделирования неопределенности естественного языка и позволяет вовлечь в вычислительный процесс неметризуемые субъективные категории, которыми, в частности, пользуются потребители при оценке предоставляемых им услуг [5, с. 25]. Применение нечеткой логики позволяет легко учитывать множество разнородных параметров для принятия решения и не требует сложных математических вычислений.

В данной работе посредством ограниченного набора непротиворечивых импликативных правил была получена относительно обоснованная шкала для градации консолидированных оценок пользователей IP-телефонии. Предлагаемая на этой основе система оценки качества IP-телефонии не отличается параметрической и структурной оптимизацией. Возможные неточности могут быть устранены за счет внедрения элемента самообучения системы на основе накопленных статистических данных. Тем не менее даже в таком "сыром" виде предлагаемая система может быть диверсифицирована на любые другие услуги связи и, тем самым, стать основой для создания модульной интеллектуальной системы оценки качества телекоммуникационных сетей связи (рис. 7).

Таким образом, нечеткая система оценки качества услуг телекоммуникационной сети связи способна автономно контролировать работу сети свя-



Рис. 7. Интеллектуальная система оценки качества телекоммуникационных сетей связи

зи через субъективную консолидированную удовлетворенность клиентов уровнем предоставляемых им услуг. Данная система достаточно простая с точки зрения проектирования и легко может быть адаптирована под различные условия.

1. **Соколов Д.** Нечеткая система оценки качества // Технологии и средства связи. 2009. № 4. С. 26—28.
2. **International Telecommunication Union Recommendation.** URL: <http://www.itu.int/rec/recommendation.asptype=series&lang=e&parent=T-REC> (дата обращения: 01.07.2014).
3. **Заде Л. А.** Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня. М.: Знание, 1974. С. 5—49.
4. **Заде Л. А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
5. **Заде Л. А.** Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных/интеллектуальных систем // Новости искусственного интеллекта. 2001. № 2—3. // Пер. с англ. И. З. Батыршина. URL: [http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol\\_mjagkikh\\_vychislenij.htm](http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol_mjagkikh_vychislenij.htm) (дата обращения: 03.07.2014).
6. **Рзаев Р. Р.** Интеллектуальный анализ данных в системах поддержки принятия решений. М.: Verlag: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 130 с.

**R. R. Rzayev**, Dr. Sc. (Tech.), Professor, [raminrza@yahoo.com](mailto:raminrza@yahoo.com),  
**A. I. Goyushov**, Post-Graduate Student, [geyushev@hotmail.com](mailto:geyushev@hotmail.com),  
**А. Ш. Алмасов**, Post-Graduate Student, [askalmasov@gmail.com](mailto:askalmasov@gmail.com),

Institute of Control Systems of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan, AZ 1141

## Estimation of the Telecommunication Services Quality on the Base of the Fuzzy Modeling Method

*At the present stage of development of telecommunication and wireless communications technologies improving the quality of telecommunication services is most nagging problem. Telecom services is constantly being improved by increasing the speed of data transmission, greater mobility of users, expanding the range of services, improving the utilization of radio frequency spectrum and the degree of network equipment intellectuality and subscriber gadgets. At the same time, improving the telecommunication links occurs at the junction of contradiction between the evergrowing consumer demand for subscription services and the limited number of frequencies that is completely objective. In turn, this causes a significant expansion of the range of services provided by the Capcom, increasing consumer demands for services quality and, as a result, improvement of existing control technologies. The main goal is the creation of the intelligent system of quality assessment and control of telecommunication services on the base of fuzzy inference system.*

*An approach to generation of modular intellectual system of the estimation of the telecommunication services qualities based on application of the fuzzy logical conclusion method is offered. The basic fuzzy estimation model offered within this approach in a necessary measure considers recommendations of the International Telecommunication Union in the part concerning functioning of networks of package switching on the base of the IP-protocol.*

*Developed system of quality assessment and control of telecommunication services is able to control the consolidated level of subjective satisfaction of users of telecommunications services through the correction of the network parameters and, thus, ensure effective decision making to increase the customer base. In the future, this system is able to operate in off-line mode, as during its development and adaptation it is not necessary to use heuristic knowledge and involve an expensive expert knowledge.*

**Keyword:** IP-telephony, quality of communication, performance parameter of the communication network, fuzzy set, fuzzy implication, fuzzy relation

### References

1. **Sokolov D.** Nечetkaja sistema ocenki kachestva // Tehnologii i sredstva svyazi. 2009. N. 4. P. 26—28.
2. **International Telecommunication Union Recommendation.** URL: <http://www.itu.int/rec/recommendation.asptype=series&lang=e&parent=T-REC> (date of appeal to: 01.07.2014).
3. **Zade L. A.** Osnovy novogo podhoda k analizu slozhnyh sistem i prosovov prinyatiya resheniy. *Matematika segodnya*. M.: Znanie, 1974. P. 5—49.
4. **Zade L. A.** Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennyh resheniy. M.: Mir, 1976. 165 p.
5. **Zade L. A.** Rol myagkikh vychisleniy i nechyotkoy logiki v ponimanii, konstruirovanii i razvitiit informacionnyh. *Intellektualnyh sistem. Novosti Iskusstvennogo Intellekta*. 2001. N. 2—3. Trans From eng. by I. Z. Bатыrшина. URL: [http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol\\_mjagkikh\\_vychislenij.htm](http://logic-bratsk.ru/radio/fuzzy/zadeh/Rol_mjagkikh_vychislenij.htm) (date of appeal to: 03.07.2014).
6. **Rzaev R. R.** Intellektualniy analiz dannyh v sistemah podderzhki prinyatiya resheniy. Verlag: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. 130 p.



# ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ SOFTWARE ENGINEERING

УДК 004.415.2

**В. А. Стенников**, д-р техн. наук, зам. директора по науке, e-mail: sva@isem.sei.irk.ru,  
**Е. А. Барахтенко**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: barakhtenko@isem.sei.irk.ru,  
**Д. В. Соколов**, канд. техн. наук, науч. сотр., e-mail: sokolov\_dv@isem.sei.irk.ru,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки,  
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева,  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), г. Иркутск

## Методический подход на основе концепции Model-Driven Engineering и онтологий к разработке программного обеспечения для проектирования теплоснабжающих систем

*Предложен методический подход к разработке программного обеспечения, основанный на применении концепции Model-Driven Engineering и онтологий. Этот подход позволяет автоматически получать сложные программные системы для оптимального проектирования теплоснабжающих систем с учетом особенностей решаемых прикладных задач и индивидуальных условий развития этих систем. На его базе разработан программный комплекс СОСНА для оптимизации параметров теплоснабжающих систем.*

**Ключевые слова:** Model-Driven Engineering, метапрограммирование, онтология, программный комплекс, компонентное программирование, онтологическая система, методический подход, автоматизация программирования, архитектура программного обеспечения, технологии программирования.

### Введение

В настоящей статье описан разработанный авторами методический подход к построению программного обеспечения для решения задач проектирования теплоснабжающих систем (ТСС). Этот подход основан на применении концепции Model-Driven Engineering ("управляемая моделями разработка", MDE), которая представляет собой совокупность методических принципов автоматического построения сложных программных систем на основе предварительно разработанных моделей [1, 2]. При построении программного обеспечения применяют современные технологии метапрограммирования [3] и формализованные в виде онтологической системы знания предметной области [4]. В данной статье изложены принципиальные положения разработанной в ходе выполненной работы методики автоматического построения программной системы.

В работе представлены принципы построения инструментальной платформы, которая служит в качестве единой основы при автоматическом построении программного обеспечения для решения задач оптимального проектирования ТСС. Приведено описание программного комплекса (ПК) СОСНА, разработанного на базе предложенного методического подхода.

### Описание проблемы и постановка задач исследования

Теоретической основой для решения задач проектирования и управления функционированием трубопроводных систем различного типа и назначения является разработанная и успешно развиваемая в ИСЭМ СО РАН теория гидравлических цепей (ТГЦ), которая является базой для моделирования, расчета, оценивания и оптимизации трубопроводных и гидравлических систем различного типа [5]. В рамках ТГЦ выделяется проблема оптимального проектирования ТСС, которая охватывает широкий круг задач и состоит в поиске оптимального направления изменения структуры и параметров систем, определения и устранения "узких" мест, замены устаревших технологий и оборудования на новые энергоэффективные решения, обеспечения требований надежности теплоснабжения и управляемости систем при удовлетворении физико-технических условий их функционирования и выполнении ограничений на режимные параметры [6]. Особенность решения проблемы оптимального проектирования ТСС состоит в том, что она предполагает формирование своего алгоритма из различного состава подзадач (оптимизация структуры, оптими-



Рис. 1. Алгоритм решения задачи проектирования ТСС

зация параметров, анализ надежности системы, тепловые и гидравлические расчеты, расчет параметров источников теплоты и др.), индивидуального для множества рассматриваемых ТСС, с учетом их конкретных особенностей. Как правило, это сложный итерационный вычислительный процесс, в ходе которого подзадачи для различных ТСС могут решаться в разной последовательности и различными методами в зависимости от поставленной цели. Один из возможных алгоритмов решения задачи представлен на рис. 1 [6].

Методические подходы, традиционно применяемые при разработке программного обеспечения для проектирования ТСС, не позволяют реализовать разработанную в рамках ТГЦ методику решения этих задач, которая требует применения гибких схем организации вычислительного процесса, замены элементов программной системы, учета особенностей развития конкретной ТСС и используемого для ее построения широкого спектра энергетического оборудования, многократного использования реализованного программного обеспечения и его настройки на особенности конкретного набора используемого оборудования.

Одна из особенностей предметной области проектирования ТСС состоит в том, что реализация программного обеспечения, предназначенного для решения этих задач, является завершающим этапом разработки методов, математических моделей элементов ТСС, методик и алгоритмов. Применение этого программного обеспечения при решении научных и практических инженерных задач приводит к накоплению опыта, который позволяет разраба-

тывать более точные математические модели, уточнять справочную информацию, повышать быстродействие алгоритмов, улучшать сходимость методов, получать оригинальное решение какой-либо практической задачи. Как правило, накопленный опыт фиксируется путем внесения изменений в программное обеспечение, что повышает его качество и соответствие реальным инженерным системам. Описанный подход к разработке приводит к тому, что программное обеспечение становится единственным средством формализованного хранения всего накопленного опыта. В результате этот опыт недоступен для изучения и использования широкому кругу специалистов.

В методических подходах, традиционно применяемых при построении программного обеспечения, отсутствует четкое разделение на методы (алгоритмы, методики) решения прикладных задач и математические модели элементов ТСС. В результате про-

граммные модули, реализующие алгоритмы, становятся ориентированными на конкретные классы задач и набор оборудования, что значительно затрудняет их настройку под конкретную решаемую задачу и многократное использование при построении различных программных систем. Отсутствует возможность для исследователя создавать свои модели элементов и интегрировать их в программное обеспечение при проведении научных или инженерных расчетов. Происходит многократное дублирование одной и той же модели элемента ТСС в различных вычислительных модулях, поэтому в случае корректировки модели необходимо вносить изменения во все программные модули.

Схема взаимодействия между вычислительными модулями скрыта в программном коде управляющего модуля программной системы, что значительно затрудняет понимание и развитие алгоритма решения задачи. При возникновении необходимости любого преобразования управляющего алгоритма программной системы требуется внести изменение в существующий алгоритм или создать новый управляющий модуль. Наличие перечисленных недостатков обуславливает невозможность гибкой организации управления вычислительным процессом, необходимого при реализации методик решения задач оптимального проектирования ТСС.

Для преодоления перечисленных трудностей необходимо разработать новый методический подход к построению программного обеспечения, который позволит автоматически создавать сложные программные системы, ориентированные на решение прикладных задач с учетом индивидуальных

особенностей моделируемых ТСС. В рамках этого подхода знания о предметной области должны быть формализованы в виде онтологий, что позволит многократно их использовать при автоматическом построении прикладных программных систем. Необходимо разработать единую инструментальную платформу, которая позволит автоматически формировать программную систему, ориентированную на решение конкретной прикладной задачи, и выполнять сложные инженерные расчеты по поиску оптимальных путей преобразования реальных ТСС в целях повышения их эффективности и надежности функционирования.

### **Новый методический подход**

В результате проведенных авторами исследований предложен новый методический подход к разработке программного обеспечения на базе концепции MDE, который позволяет успешно преодолевать перечисленные ранее проблемы. В рамках этого подхода MDE адаптирована к особенностям методического и программного обеспечения, применяемого при решении задач проектирования ТСС: программная система автоматически строится на основе компьютерной модели конкретной ТСС, предварительно разработанных моделей элементов ТСС, программных компонентов, реализующих методы и алгоритмы решения прикладных задач, и знаний, формализованных в виде онтологической системы.

Предложенный подход позволяет успешно решить задачу разделения методов решения прикладных задач и моделей элементов ТСС. Для этого методы реализуются в виде программных компонентов, которые не привязаны к свойствам и моделям конкретного оборудования. Модели элементов ТСС автоматически компилируются в программные компоненты. В процессе построения программной системы выполняется динамическая интеграция программных компонентов, реализующих модели элементов ТСС и методы решения задач, что позволяет создать программную систему, ориентированную на решение конкретной прикладной задачи.

Разработанный методический подход включает следующее:

- методику автоматического построения сложных программных систем на основе применения концепции MDE, современных методов метапрограммирования и онтологий;
- принципы построения расширяемой архитектуры программного обеспечения, ориентированного на особенности решаемой прикладной задачи;
- принципы построения инструментальной платформы как единой универсальной основы для разработки программного обеспечения решения комплекса задач проектирования ТСС;
- методические принципы разработки и применения универсальных программных компонентов.

В процессе автоматического построения программной системы используются онтологии, которые позволяют формализованно описать объекты предметной области, их свойства и взаимосвязи между этими объектами [4]. Онтологии в настоящее время получают все более широкое применение при решении инженерных задач [7]. Существуют работы, в которых описывается опыт применения онтологий при решении задач энергетики [8, 9].

Основные особенности разработанного методического подхода:

- методический подход ориентирован на разработку программного обеспечения для решения задач оптимального проектирования ТСС;
- модель программной системы строится автоматически на основе компьютерной модели ТСС, описания прикладной задачи и знаний, хранение которых организовано в виде онтологической системы;
- алгоритм верхнего уровня, определяющий схему взаимодействия программных компонентов и ход вычислительного процесса, строится автоматически во время построения программной системы на основе описания прикладной задачи и методики ее решения;
- привлечение современных технологий метапрограммирования предоставляет возможность автоматического формирования программной системы и гибкой настройки ее на особенности развития и состав оборудования конкретной ТСС.

Предложенный методический подход позволяет автоматически создавать сложные программные системы для решения задач проектирования ТСС и решать прикладные задачи, используя разработанные в рамках ТГЦ методики, методы и алгоритмы.

### **Методика автоматического построения программной системы**

Предложенная авторами методика автоматического построения программной системы состоит из следующих этапов.

**Этап 1.** Построение компьютерной модели конкретной ТСС.

На этом этапе инженер создает компьютерную модель конкретной ТСС, отражающую свойства сети: структуру, набор используемого оборудования и его свойства, параметры элементов системы (технические, гидравлические, граничные условия) [5]. Эта модель сохраняется в базе данных для многократного использования.

**Этап 2.** Формализация прикладной задачи.

На этом этапе происходит формализация прикладной задачи инженером: задаются параметры задачи математического моделирования и оптимизации ТСС, задается набор допустимого к установке оборудования, задаются ограничения и условия решения прикладной задачи.

**Этап 3.** Автоматическое построение модели программной системы.

На этом этапе автоматически создается модель программной системы, ориентированной на решение прикладной задачи (рис. 2). Эта модель представляет собой совокупность структур данных, описывающих свойства и структуру создаваемой прикладной системы.

Во время этого процесса решаются следующие подзадачи.

1. Преобразование компьютерной модели ТСС из базы данных в структуры данных.

2. Создание структур данных, описывающих решаемую прикладную задачу.

3. Создание списка используемого оборудования на основе модели ТСС и описания прикладной задачи.

4. На основе онтологии задач определение методики решения прикладной задачи, выделение этапов ее решения, создание списка используемых методов и алгоритмов.

5. Создание списка необходимых для решения прикладной задачи программных компонентов на основе списка методов и алгоритмов и онтологии программного обеспечения.

6. На основе описания методики из онтологии задач и описания программных компонентов из онтологии программного обеспечения построение графа решения прикладной задачи, отражающего взаимосвязь этапов решения этой задачи.

7. Создание структур данных, отражающих связи "задача—метод—компонент".

8. Формирование структур данных, описывающих набор входных и выходных параметров на основе описания методов, алгоритмов и программных компонентов.

**Этап 4.** Автоматическое построение программной системы на основе ее модели с помощью технологий метапрограммирования [10]. В рамках методики используются следующие технологии: 1) автоматическая генерация программного кода; 2) динамическая компиляция программного кода; 3) рефлексивное программирование.

Схема взаимодействия программных компонентов при построении программной системы представлена на рис. 3. Путем генерации программного кода и его компиляции создаются программные реализации моделей элементов тепловой сети. С помощью технологий рефлексивного программирования компоненты подключаются к программной системе и настраиваются на решение прикладной задачи. Рефлексивное программирование представляет собой парадигму программирования, основанную на рефлексии (англ. *reflection*) — подходе к программированию, в соответствии с которым программа может отслеживать и модифицировать собственную структуру и поведение во время выполнения [11].

Во время этого процесса решаются следующие подзадачи.

1. Преобразование математических и графических моделей элементов ТСС, формализованно описанных в

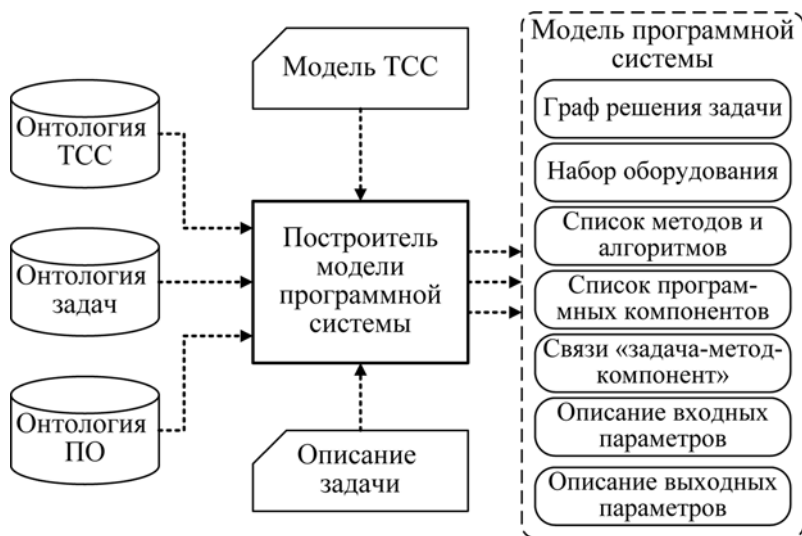


Рис. 2. Схема построения модели программной системы

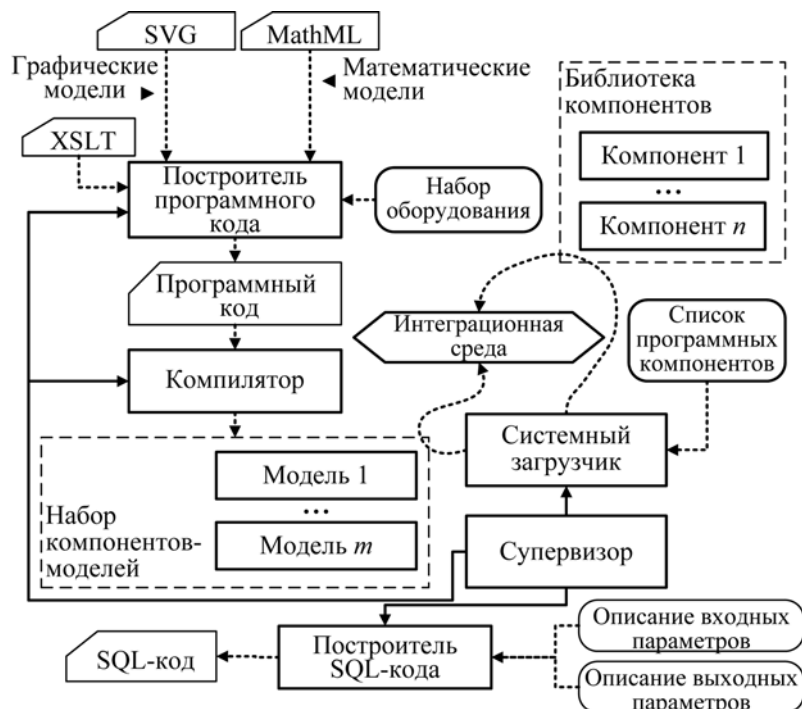


Рис. 3. Схема построения программной системы

форматах MathML<sup>1</sup> и SVG<sup>2</sup>, в программный код на основе правил, формализованных на языке XSLT<sup>3</sup>.

2. Построение SQL-кода на основе описания входных и выходных параметров.

3. Компиляция программного кода в программные компоненты, реализующие модели элементов ТСС.

4. Загрузка программных компонентов в память. Интеграция этих компонентов в память через стандартизированные интерфейсы, обеспечиваемые паттернами проектирования [12].

5. Формирование структур данных, описывающих используемые программные компоненты.

**Этап 5.** Применение программной системы при решении прикладных задач. В результате выполнения этапов 1—4 создается программная система, представленная на рис. 4.

Программная система состоит из трех архитектурных слоев: 1) подсистема управления вычислением, которая содержит компонент супервизор, управляющий ходом вычисленного процесса на основе графа решения задачи; 2) подсистема доступа к данным, которая обеспечивает обмен информацией между базами данных (БД) и структурами данных локальной памяти с помощью загрузчика данных и рефлексивного компонента; 3) вычислительная подсистема, которая решает прикладную задачу путем использования программных компонентов, реализующих методы и модели. Представленная схема отражает основные положения предложенной авторами расширяемой архитектуры программного обеспечения для решения задач проектирования ТСС.

### Инструментальная платформа

Программная система строится автоматически на основе разработанной инструментальной платформы. В качестве базового языка программирования для реализации инструментальной платформы использован Java. Выбор этого языка обусловлен следующими преимуществами [11—13]: 1) поддержка современных технологий программирования, таких как объектно-ориентированное, компонентное и функциональное программирование; 2) встроенная поддержка технологий метапрограммирования (рефлексивное программирование, возможность использовать компилятор для динамического создания программных компонентов, технология Java Scripting); 3) широкий набор технологий и инструментов для организации распределенных и парал-

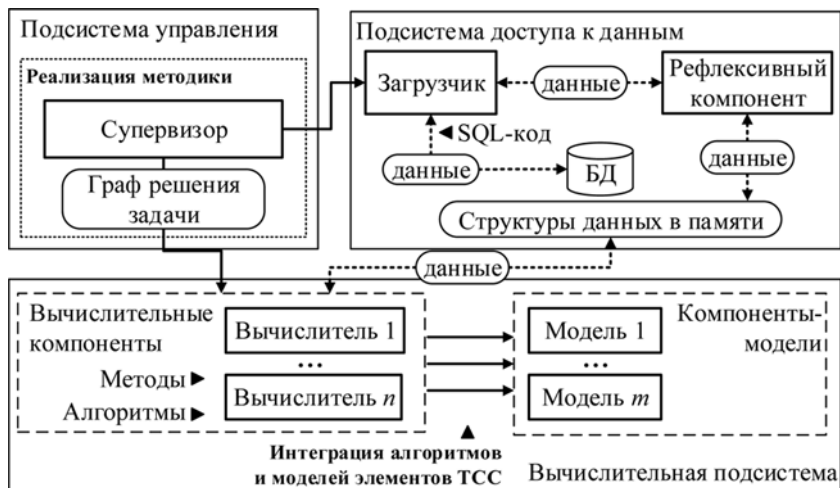


Рис. 4. Архитектура программной системы, получаемой в результате автоматического построения

ельных вычислений; 4) единая универсальная технология доступа к базам данных JDBC. Программные компоненты, реализующие методы и алгоритмы, могут быть реализованы на любых языках программирования (C, C++, Fortran и др.). Интеграция этих компонентов осуществляется через стандартизированные интерфейсы, реализуемые за счет применения паттернов проектирования (англ. *design patterns*) [12]. Применение паттернов Command и Adapter обеспечивает универсальный интерфейс доступа к программным компонентам [10].

Структура инструментальной платформы включает следующие составные части:

- библиотеки программных компонентов для разработки программного обеспечения, предназначенного для решения задач оптимального проектирования ТСС;
- супервизор — подсистема управления построением программной системы и решением прикладной задачи;
- подсистема построения модели программной системы;
- подсистема построения программной системы;
- онтологическая система как единое средство формализованного хранения знаний о теплоснабжающих системах, связанных с ними задачах и программном обеспечении, предназначенном для решения этих задач;
- программное обеспечение для работы с онтологической системой;
- библиотеки математических и графических моделей, описывающих элементы ТСС и набор стандартного оборудования.

*Библиотеки программных компонентов* инструментальной платформы разделены на три группы по функциональному назначению.

1. Библиотека вычислительных компонентов. Набор программных компонентов, содержащих реализации математических методов и алгоритмов для

<sup>1</sup> <http://www.w3.org/Math/>

<sup>2</sup> <http://www.w3.org/TR/SVG/>

<sup>3</sup> <http://www.w3.org/TR/xslt/>

решения задач проектирования ТСС, образует библиотеку вычислительных компонентов инструментальной платформы. Компоненты этой группы разрабатывают для решения задачи многократного использования программных реализаций математических методов и алгоритмов в соответствии со следующим принципом: однажды реализованные компоненты можно многократно использовать при создании программного обеспечения различного назначения и проведения вычислительных экспериментов при выполнении научных исследований.

2. Библиотека системных компонентов. Системные компоненты обеспечивают решение следующих задач: взаимодействие с базами данных, подготовка и экспертиза данных, формирование графического пользовательского интерфейса.

3. Библиотека управляющих компонентов. Набор программных компонентов, предназначенных для анализа состояния вычислительного процесса и принятия решения по его дальнейшему ходу. Например, эти компоненты проверяют условия схожести итерационного процесса.

Решение прикладных задач проектирования ТСС требует организации сложного итерационного процесса из различных подзадач, поэтому разработанная архитектура включает специальную подсистему — *супервизор*. Эта подсистема отвечает за выполнение следующих функций: 1) вызов программных компонентов, формирующих модель программной системы; 2) вызов программных компонентов, отвечающих за автоматическое построение программной системы; 3) управление ходом вычислительного процесса при решении прикладной задачи.

*Подсистема построения модели программной системы* на основе компьютерной модели ТСС, описания прикладной задачи и знаний из онтологической системы строит модель программной системы, которая представляет собой совокупность структур данных, содержащих описание создаваемого программного обеспечения.

*Подсистема построения программной системы* автоматически строит программную систему на основе ее модели. Эта подсистема включает программные компоненты, отвечающие за генерацию программного кода и его динамическую компиляцию, загрузку и интеграцию программных компонентов с помощью рефлексивного программирования.

В качестве единого средства для хранения формализованных знаний в рамках предлагаемого методического подхода используется *онтологическая система*. В ней хранятся знания о теплоснабжающих системах, связанных с ними задачах и программном обеспечении, предназначенном для решения этих задач. В качестве средства формализации онтологической системы в рамках предложенного методического подхода выбран язык XML

(англ. *eXtensible Markup Language* — расширяемый язык разметки).

Модель онтологической системы  $S^O$  имеет следующий вид:

$$S^O = (O^M, O^П, \Omega^{MB}),$$

где  $O^M$  — метаонтология;  $O^П$  — множество предметных онтологий;  $\Omega^{MB}$  — модель машины вывода.

Множество предметных онтологий  $O^П$  описывается выражением

$$O^П = \{O^{TCC}, O^3, O^{ПО}\},$$

где  $O^{TCC}$  — онтология теплоснабжающей системы (онтология ТСС);  $O^3$  — онтология задач;  $O^{ПО}$  — онтология программного обеспечения (онтология ПО).

Метаонтология — это онтология верхнего уровня, которая специфицирует множество предметных онтологий. Она содержит базовые понятия и отношения между ними, которые используются при построении предметных онтологий.

Онтология ТСС содержит описание свойств подсистем тепловой сети, типов и параметров оборудования, иерархии структуры элементов сети, их свойств, связей между элементами, а также классификацию и описание свойств используемых математических моделей (например, замыкающие уравнения, формулы расчета сопротивлений и др.). Фрагмент онтологии ТСС представлен на рис. 5.

Онтология задач содержит описание прикладных задач и методик их решения, описание алгоритмов верхнего уровня, перечисление параметров, являющихся исходными данными, и параметров, получаемых в результате решения задачи.

Онтология ПО предназначена для хранения знаний, необходимых для автоматизации построения и использования программного обеспечения. Эта онтология содержит описание программных компонентов и их свойств, метаданные (входные и выходные параметры, описание форматов данных) и описание технологий и интерфейсов доступа к программным компонентам системы. Она содержит описание групп, на которые разделены компоненты (вычислительные, системные и управляющие). В онтологии хранятся знания о программных компонентах, входящих в каждую группу.

*Программное обеспечение для работы с онтологической системой* предназначено для просмотра, добавления и редактирования знаний, формализованных в онтологиях. В его состав входит набор программ для работы с онтологической системой.

*Библиотека математических моделей* содержит математическое описание элементов ТСС, для формализованного хранения которых используется язык MathML. Для хранения *библиотеки графических моделей* используется векторный графический формат SVG. На основе математических и графических моделей при автоматическом построении программного обеспечения создаются программные

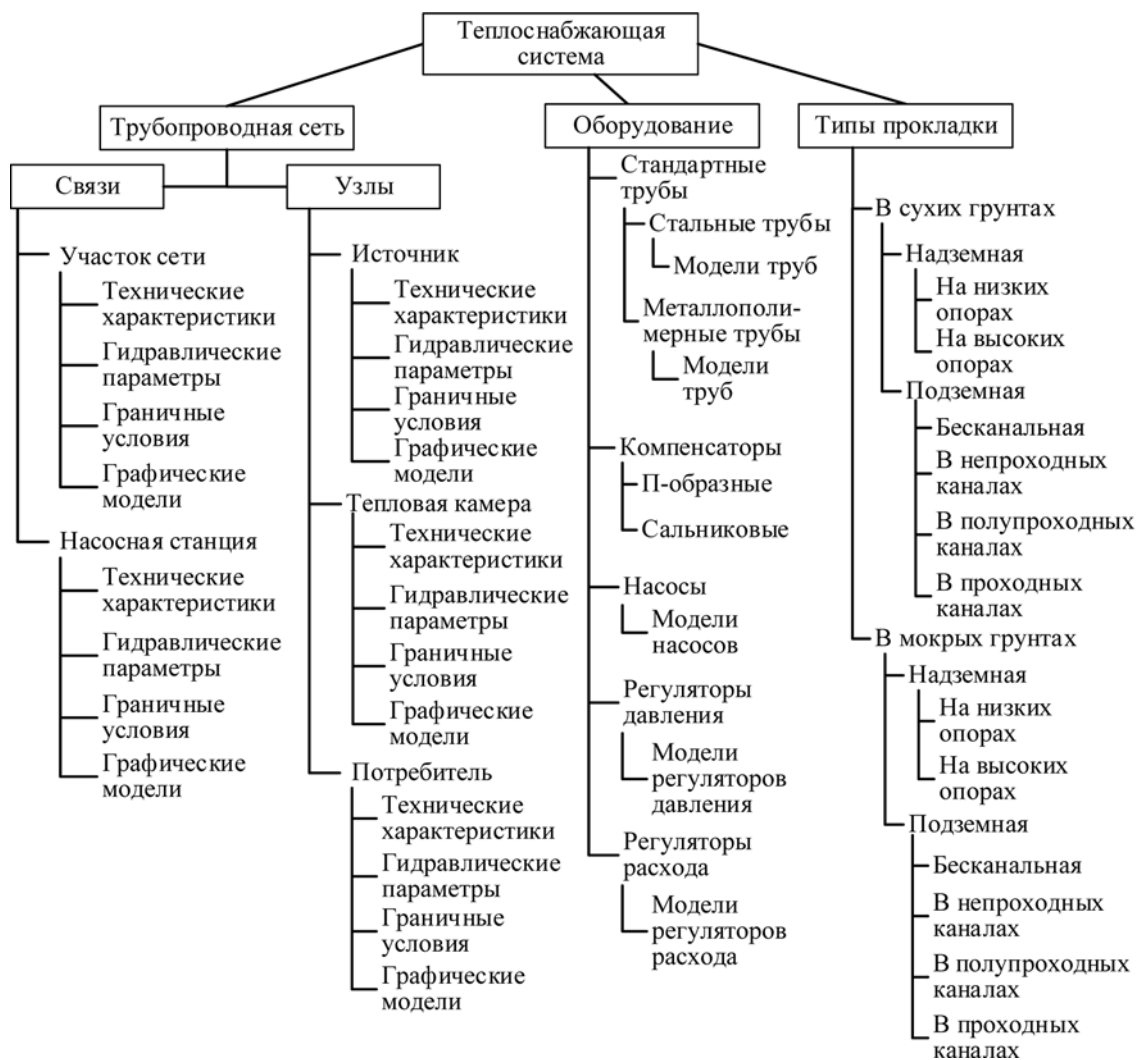


Рис. 5. Фрагмент онтологии ТСС

компоненты-модели, которые используются при проведении математических расчетов и отображении компьютерной модели ТСС во время решения научных и прикладных инженерных задач.

### Программный комплекс СОСНА

Предлагаемый авторами методический подход успешно применяется в ИСЭМ СО РАН при разработке программного обеспечения для решения задач проектирования ТСС. На основе этого подхода реализован программный комплекс нового поколения СОСНА (Синтез Оптимальных Систем с учетом надежности) [14], предназначенный для решения сложных инженерных задач оптимизации параметров тепловых сетей, многократно решаемых при проектировании ТСС [5]. ПК СОСНА позволяет определять: 1) "узкие места" в системе и способы их устранения; 2) способы реконструкции существующих участков; 3) диаметры новых участков сети; 4) места установки и параметры насосных станций.

ПК СОСНА представляет собой сложную прикладную программную систему, которая автоматически создается в контексте решения прикладной задачи на основе компьютерной модели исследуемой ТСС, формализованного описания решаемой задачи и знаний предметной области, хранение которых организовано в виде онтологической системы. В процессе автоматического построения программной системы используется разработанная авторами инструментальная платформа, которая позволяет за счет применения современных средств метапрограммирования автоматически построить ПК и настроить на решение конкретной задачи. Широкие возможности разработанного методического подхода обеспечили осуществление декомпозиции ПК на отдельные составляющие и их увязку в виде иерархической структуры взаимодействующих друг с другом компонентов. ПК СОСНА разработан в соответствии с архитектурой, представленной на рис. 4. Применение разработанного методического подхода при реализации ПК СОСНА обеспечило соз-

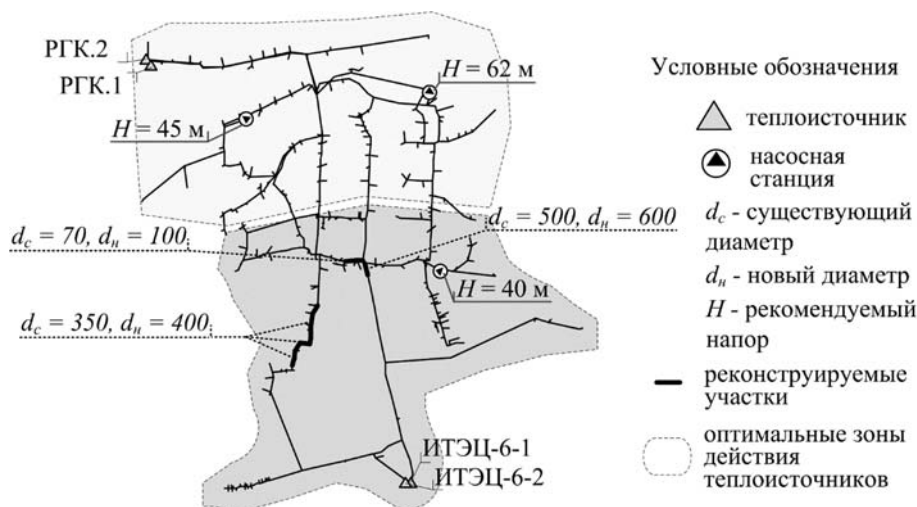


Рис. 6. Схема теплоснабжающей системы г. Братска с обозначенными рекомендованными мероприятиями по ее реконструкции

дание открытой программной системы, приспособленной для развития и сопровождения.

Применение онтологий при реализации программного обеспечения позволило получить следующие возможности:

- формализованно хранить и многократно использовать знания о подсистемах ТСС и их свойствах, задачах проектирования ТСС и применяемых при их решении программных компонентах;
- управлять процессом автоматического построения программной системы и настраивать ее на свойства конкретной ТСС и решаемую задачу;
- управлять процессом решения прикладной задачи с помощью изменения соответствующих онтологий;
- создавать модели элементов ТСС и выполнять их интеграцию в программное обеспечение при проведении научных или инженерных расчетов без изменения программного кода.

В ПК СОСНА реализованы эффективные методы оптимизации параметров ТСС, разработанные в ИСЭМ СО РАН в рамках ТГЦ. Для оптимизации разветвленных сетей реализован метод пошаговой оптимизации, разработанный на базе динамического программирования [5]. Для оптимизации кольцевых сетей реализован метод многоконтурной оптимизации (МКО), основанный на последовательном улучшении решений [5]. Важная особенность перечисленных методов состоит в том, что они позволяют полностью учесть особенности используемого дискретного набора оборудования, дискретных состояний системы и сложность математических моделей. В ПК СОСНА авторами реализована новая методика решения задач оптимизации параметров ТСС, основанная на многоуровневой декомпозиции модели тепловой сети.

С помощью ПК СОСНА были проведены многовариантные расчеты достаточно сложных ТСС для

решения задач их проектирования, а также выполнены научные исследования разработанных методов и алгоритмов. С помощью ПК выполнены расчеты ТСС Центрального и Адмиралтейского районов Санкт-Петербурга, г. Братска и поселка Магистральный. На рис. 6 приведены полученные по результатам расчетов целесообразные мероприятия по реконструкции теплоснабжающей системы г. Братска.

Результаты проведенных расчетов были использованы при подготовке рекомендаций по оптимальной реконструкции перечисленных выше и других ТСС.

## Заключение

Предложен методический подход к разработке программного обеспечения, основанный на применении концепции MDE, который позволяет автоматически создавать сложные программные системы для решения научных и прикладных задач оптимального проектирования сложных технических систем. На базе этого подхода разработан ПК СОСНА для оптимизации параметров ТСС. ПК можно применять в научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организациях, занимающихся вопросами теплоснабжения. Практическое применение разработанного методического и программного обеспечения позволяет получать рекомендации по преобразованию ТСС, повышающие эффективность их работы и качество снабжения потребителей тепловой энергией.

*Исследования выполняются при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-07-00297).*

## Список литературы

1. Brambilla M., Cabot J., Wimmer M. Model Driven Software Engineering in Practice: Synthesis Lectures on Software Engineering #1. San Rafael: Morgan & Claypool, 2012. 182 p.
2. Vöiter M., Stahl T., Bettin J., Haase A., Helsen S. Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management. New York: Wiley, 2006. 446 p.
3. Bartlett J. The art of metaprogramming, Part I: Introduction to metaprogramming // IBM homepage. URL: <http://www.ibm.com/developerworks/library/l-metaprogl/> (дата обращения: 22.10.2014).
4. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
5. Меренков А. П., Хасиев В. Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 280 с.
6. Стеников В. А., Сеннова Е. В., Ощепкова Т. Б. Методы комплексной оптимизации развития теплоснабжающих систем // Изв. РАН. Энергетика. 2006. № 3. С. 44—54.
7. Евгеньев Г. Б. Интеллектуальные системы проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 334 с.



8. **Загорюлько Ю. А., Загорюлько Г. Б.** Онтологический подход к разработке системы поддержки принятия решений на нефтегазодобывающем предприятии // Вестник НГУ. Серия "Информационные технологии". Новосибирск: НГУ, 2012. Т. 10. Вып. 1. С. 121—129.

9. **Ворожцова Т. Н., Скрипкин С. К.** Использование онтологий при моделировании программного комплекса // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13, ч. 1. С. 376—381.

10. **Стенников В. А., Барактенко Е. А., Соколов Д. В.** Применение метапрограммирования в программном комплексе для решения задач схемно-параметрической оптимизации теплоснабжающих систем // Программная инженерия. 2011. № 6. С. 31—35.

11. **Forman I., Forman N.** Java Reflection in Action. Greenwich: Manning Publications Co., 2005. 273 p.

12. **Martin R. C.** Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices. Upper Saddle River: Pearson Education, USA, 2002. 529 p.

13. **Gosling J., Joy B., Steele G., Bracha G., Buckley A.** Java Language Specification, Java SE 8 Edition. Boston: Addison-Wesley Professional, USA, 2014. 792 p.

14. **Стенников В. А., Барактенко Е. А., Соколов Д. В.** Применение онтологий при реализации программного комплекса для решения задач оптимального проектирования теплоснабжающих систем // Информационные технологии. 2013. № 3. С. 2—7.

**V. A. Stennikov**, Professor, Deputy Director, e-mail: sva@isem.sei.irk.ru,  
**E. A. Barakhtenko**, Senior Researcher, e-mail: barakhtenko@isem.sei.irk.ru,  
**D. V. Sokolov**, Researcher, e-mail: sokolov\_dv@isem.sei.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS),  
Irkutsk

## A Methodological Approach on the Basis of Model-Driven Engineering and Ontologies for the Development of a Software for Heat Supply System Design

*The authors suggest a methodological approach to the creation of software. The approach is based on the Model-Driven Engineering methodology and ontologies. This approach allow us automatically create complex software for optimal design of heat supply systems taking into account the peculiarity of application problems and the individual conditions of the development of these systems. The developed approach has been used for the implementation of the software SOSNA intended for solving the problem of heat supply system parameter optimization.*

**Keywords:** model-Driven Engineering, metaprogramming, ontology, software, component based programming, ontological system, methodological approach, automation of programming, software architecture, software engineering

### References

1. **Brambilla M., Cabot J., Wimmer M.** *Model Driven Software Engineering in Practice. Synthesis Lectures on Software Engineering #1.* San Rafael, Morgan & Claypool Publishers, 2012. 182 p.

2. **Völter M., Stahl T., Bettin J., Haase A., Helsen S.** *Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management.* New York, Wiley, 2006. 446 p.

3. **Bartlett J.** *The art of metaprogramming, Part 1: Introduction to metaprogramming.* URL: <http://www.ibm.com/developerworks/library/l-metaprogl/> (accessed 22.10.2014).

4. **Gavrilova T. A., Khoroshevskii V. F.** *Bazy znaniy intellektual'nykh sistem* (Knowledge bases of intelligent systems), Saint Petersburg, Piter, 2000, 384 p. (in Russian).

5. **Merenkov A. P., Khasilev V. Ya.** *Teoriya gidravlicheskikh tsepei* (The Theory of Hydraulic Circuits), Moscow, Nauka, 1985, 280 p. (in Russian).

6. **Stennikov V. A., Sennova E. V., Oshchepkova T. B.** *Metody kompleksnoi optimizatsii razvitiya teplosnabzhayushchikh sistem* (Methods of complex optimization for heat supply system development). *Izvestiya RAN: Energetika.* 2006, N. 3. P. 44—54 (in Russian).

7. **Evgenev G. B.** *Intellektual'nye sistemy proektirovaniya* (Intelligent design systems), Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2009. 334 p. (in Russian).

8. **Zagorul'ko Yu. A., Zagorul'ko G. B.** *Ontologicheskii podkhod k razrabotke sistemy, podderzhki prinyatiya reshenii na neftegazodobyvayushchem predpriyatii* (An ontological approach for the develop-

ment of a decision support system for an oil-production enterprise). *Novosibirsk, Vestnik NGU, series "Informatsionnye tekhnologii"*, 2012. Vol. 10, issue 1. P. 121—129 (in Russian).

9. **Vorozhtsova T. N., Skripkin S. K.** *Ispol'zovanie ontologii pri modelirovaniy programmnoy kompleksa* (The use of ontologies for modeling software system), *Novosibirsk, Vychislitel'nye tekhnologii*, 2008. Vol. 13, part I. P. 376—381 (in Russian).

10. **Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Sokolov D. V.** *Primenenie metaprogrammirovaniya v programmnom komplekse dlya resheniya zadach skhemno-parametricheskoy optimizatsii teplosnabzhayushchikh sistem* (Metaprogramming in the software for solving the problems of heat supply system schematic and parametric optimization). *Programmnaya inzheneriya.* 2011. N. 6. P. 31—35 (in Russian).

11. **Forman I., Forman N.** *Java Reflection in Action*, Greenwich, Manning Publications Co., 2005. 273 p.

12. **Martin R. C.** *Agile Software Development: Principles, Patterns and Practices.* Upper Saddle River, Pearson Education, 2002. 529 p.

13. **Gosling J., Joy B., Steele G., Bracha G., Buckley A.** *Java Language Specification, Java SE 8 Edition.* Boston, Addison-Wesley Professional, 2014. 792 p.

14. **Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Sokolov D. V.** *Primenenie ontologii pri realizatsii programmnoy kompleksa dlya resheniya zadach optimal'nogo proektirovaniya teplosnabzhayushchikh sistem* (Ontologies application for implementation of the software for solving optimal design problems of heat supply systems). *Informatsionnye tekhnologii.* 2013. N. 3. P. 2—7 (in Russian).

УДК 004.05 004.3-6

**Ю. В. Берчун**, зам. декана факультета, ст. преподаватель, e-mail: byv@bmstu.ru,  
**Р. Ш. Загидуллин**, канд. техн. наук, доц., e-mail: zag@bmstu.ru,  
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

### Комплексный подход к организации удаленного доступа к лабораторному оборудованию в учебном процессе

*Рассматривается методика построения интегрированных решений для проведения дистанционного лабораторного практикума. Представляются вопросы организации сетевых подключений удаленных пользователей, технологий управления и мониторинга лабораторного оборудования, повышения эффективности загрузки компьютеров. Анализируется пример реализации удаленного лабораторного практикума для студентов МГТУ им. Н. Э. Баумана по электронике.*

**Ключевые слова:** лабораторный практикум, удаленный доступ, консолидация, виртуализация, LabVIEW

#### Введение

Лабораторные работы и практические занятия составляют важную часть теоретической и профессиональной подготовки студентов. В соответствии с Типовым положением об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 05.04.2001 № 264, лабораторные работы и практические занятия отнесены к основным видам учебных занятий. Требованиями современного поколения Федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) предусматривается увеличение удельной составляющей лабораторных работ и практических занятий в общей аудиторной нагрузке студента.

Лабораторные занятия должны обеспечить знакомство студентов с современной техникой, новейшим оборудованием (в особенности с точными измерительными приборами), актуальными методами измерений, средствами автоматизации исследовательской деятельности и производственных процессов. Это определяет необходимость широкого использования в лабораторных занятиях вычислительной техники и планомерного комплектования лабораторий соответствующим оборудованием. Кроме этого, развитие автоматизированных лабораторий, основанных на использовании дорогостоящего (подчас уникального) реального оборудования, должно предполагать и использование методов математического моделирования такого оборудования и технических решений.

Поскольку оборудование такого высокого класса и специализированное программное обеспечение не могут быть массово поставлены в учебные лаборатории, то возникает задача организации доступа к этому оборудованию и программному обеспечению не только локально (непосредственно в лаборатории), но и дистанционно (посредством вычислительных сетей) для студентов как очной, так и смешанной форм обучения.

#### Постановка задачи

При разработке интегрированного проекта лаборатории удаленного доступа необходимо решить несколько взаимосвязанных задач:

- реализация программного управления лабораторным оборудованием с компьютера (сервера);
- реализация сетевого взаимодействия с указанным программным обеспечением в пределах локальной вычислительной сети лаборатории;
- обеспечение удаленного сетевого подключения к сети лаборатории.

Помимо указанных основных задач может быть поставлен ряд дополнительных:

- реализация визуального мониторинга лабораторной установки;
- реализация доступа к методическим материалам и тестам, фиксация результатов выполнения работ (в том числе с последующим контролем со стороны преподавателя).

При разработке проекта необходимо обеспечить:

- управляемость всей инфраструктуры;

- снижение числа привлекаемых компьютеров и другого ИТ-оборудования за счет оптимизации их загрузки (особенно при работе с несколькими лабораторными установками).

### Программное управление лабораторным оборудованием

Рассмотрим первую из обозначенных выше задач. Можно поставить ее чуть более широко, так как помимо управления натурным экспериментом (т. е. реальной лабораторной установкой, подключенной к компьютеру с помощью некоторого интерфейса) может быть реализовано и управление вычислительным (имитационным) экспериментом с программной моделью. Технология компьютерных измерительных приборов на базе программного комплекса LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) объединяет аппаратные средства и программное обеспечение с промышленными компьютерными технологиями для решения измерительных задач, причем свойства этих решений в значительной степени определяются пользователями. Компьютерная измерительная система может быть собрана из различных аппаратных и программных компонентов. Для контроля и управления каким-либо процессом или тестирования того или иного устройства могут быть использованы разнообразные технические средства измерений. И если ясен принцип действия этих устройств, то после подключения их к компьютеру они могут стать составной частью компьютерной измерительной системы (рис. 1).

Аппаратные средства могут быть как отечественного, так и импортного производства. Наилучшая совместимость в режиме работы "из коробки" достигается при использовании аппаратуры, изготовленной компанией National Instruments. Компания National Instruments специализируется в области разработки встраиваемых и распределенных технических устройств средств сбора данных (DAQ, Data Acquisition) и драйверов к ним, а также является разработчиком программного комплекса LabVIEW. Очевидно, программирование в случае использования среды LabVIEW и "родных" для нее аппаратных средств упрощается.

Распространенные методы сбора данных реализуются с помощью встраиваемых в компьютер устройств и автономных измерительных приборов, приборов, поддерживающих интерфейс GPIB, систем стандарта PXI (расширение шины PCI для измерительной техники) и даже приборов с портом RS-232. Обработка экспериментальных данных облегчается встроенными средствами математического анализа среды LabVIEW.

В лаборатории при наличии персональных компьютеров с установленным LabVIEW и соответствующей аппаратурой сбора данных можно:

- эффективно модернизировать уже имеющуюся и устаревшую лабораторную базу;
- использовать новейшую лабораторную базу;
- внедрять новую лабораторную базу посредством создания автоматизированных лабораторных практикумов.

Реализация обеспечения практикума должна предусматривать использование автономных, пригодных для тиражирования, несложных программно-аппаратных комплексов на основе персонального компьютера. Организация практикума должна предполагать удаленный доступ к лабораторным ресурсам как в локальных, так и в глобальных сетях. Причем сами практикумы могут быть уникальными, с использованием единичных образцов аппаратных реализаций.

Один из вариантов организации лабораторной работы основан на использовании программ моделирования. При выполнении лабораторной работы студент может взаимодействовать не с реальными приборами и объектами, а с их математическими моделями. Это не исключает на следующем этапе выполнения работы взаимодействия с реальными объектами и измерительными приборами. В лабораторных работах может быть активно использовано программное средство Circuit Design Suite (Multisim). Оно интегрируется со средой LabVIEW и позволяет проводить анализ схмотехнических и системотехнических решений, обеспечивает программирование микроконтроллеров и микропроцессоров и обеспечивает проведение физических экспериментов по сбору данных.

Расширяя сферу применения LabVIEW и Multisim, компания National Instruments выпустила специальный Toolkit — LabVIEW Multisim Connectivity Toolkit. Эта программа представляет собой надстройку для LabVIEW, которая позволяет легко и эффективно управлять работой ядром Multisim. Принцип ее работы основан на управлении Multisim через Multisim API. В принципе, любая программа может управлять ядром Multisim через COM интерфейсы, в том числе и программа LabVIEW.



Рис. 1. Схема компьютерной измерительной системы

Совместное использование Multisim и технологии виртуальных приборов позволяет преподавателям электротехнических специальностей достичь полной непрерывности цикла проектирования, состоящего из трех этапов: изучение теории; создание принципиальной схемы и моделирование; изготовление прототипа и проведение тестовых испытаний.

Поскольку автоматизированные стенды (в любой предметной области), реализованные в локальном варианте в среде LabVIEW, могут быть достаточно просто переведены в вид, пригодный для работы в режиме удаленного доступа, то для учебного процесса открываются значительные перспективы.

### Управление лабораторным оборудованием по сети

Разработанные программные средства изначально ориентированы на локальное применение, т. е. пользователь должен в интерактивном режиме работать непосредственно за компьютером, к которому подключен лабораторный стенд. Для организации доступа с другого компьютера необходимо задействовать сетевые технологии.

Наиболее простым способом является включение терминального доступа к лабораторному компьютеру, примером которого является подключение к удаленному рабочему столу (Remote Desktop) в операционных системах семейства Microsoft Windows. Однако использование удаленного рабочего стола даже для пользователей с ограниченными правами доступа к системе все равно является нежелательным фактором с точки зрения безопасности.

В связи с этим более перспективным видится предоставление доступа к программному обеспечению управления лабораторным оборудованием в соответствии с архитектурой "клиент-сервер". Это дает возможность четко регламентировать все сценарии, реализовав их на программном уровне. Рассмотренная выше система LabVIEW позволяет реализовать такой режим, причем встраивание интерфейса виртуальных приборов осуществляется в WEB-страницы, что дает возможность использовать в качестве клиента обычный браузер (однако для этого на клиентском компьютере должен быть установлен бесплатный плагин LabVIEW Runtime Engine).

Средой LabVIEW предоставлены большие возможности для реализации обмена данными через TCP/IP сети. Основой для передачи данных служит WEB-сервер LabVIEW и инструмент WEB Publishing Tool, которые входят в любой из вариантов поставки среды LabVIEW — Basic, Full Development System или Professional. LabVIEW обладает рядом встроенных возможностей для организации связи через Интернет, в том числе:

- функции TCP/IP и UDP;
- WEB-сервер;
- сервер виртуальных приборов;

- протокол DataSocket для обмена данными через LAN и Интернет;
- Java-приложения;
- элементы управления ActiveX;
- E-mail, ftp и telnet.

WEB-сервер LabVIEW в режиме диалога с разработчиком генерирует HTML-документ и публикует изображения передней панели компьютерного прибора в Сети путем встраивания его в WEB-страничку.

Для доступа к WEB-серверу через браузер необходимо проинсталлировать на клиентской машине бесплатный компонент LabVIEW Run-Time Engine. Если WEB-сервер запущен, то, запустив браузер и набрав строку адреса HTML-документа (URL), пользователи получают удаленный доступ к исполняемой на серверной машине программе LabVIEW. Строка должна содержать IP-адрес компьютера сервера и имя HTML-файла.

Для подготовки работы программного обеспечения — компьютерного прибора в режиме удаленного доступа — пользователю достаточно использовать встроенные средства LabVIEW и на основе ранее использованного в режиме локального доступа программного решения "в два щелчка" получить компьютерный прибор в Сети путем встраивания его в WEB-страничку.

Также в клиент-серверном режиме на лабораторном компьютере могут быть развернуты другие приложения, реализующие вспомогательные функции. Например, HTTP-сервер с методическими материалами, FTP-сервер для доступа к результатам эксперимента, сохраняемым в виде файлов, и т. д.

### Подключение из внешних сетей

С практической точки зрения наибольший интерес представляет возможность использования рассмотренных выше клиент-серверных приложений из других сетей, в том числе с использованием каналов глобальной сети Интернет. В том случае, если речь идет о единственном лабораторном компьютере, через который организуется работа со стендом, этот компьютер может быть непосредственно подключен к сети, и ему назначается публичный ("белый") IPv4-адрес (технологии IPv6 не рассматриваются ввиду их малой распространенности на сегодняшний день).

В учебном процессе гораздо более часто встречающейся является ситуация, когда в лаборатории имеется несколько стендов и, соответственно, компьютеров. Однако выделение нескольких публичных IPv4-адресов не всегда возможно. Поэтому следует говорить о том, что лабораторные компьютеры с подключенным к ним оборудованием размещаются во внутренней локальной сети (в которой применяется адресация на основе частных диапазонов адресов IPv4) и необходимо обеспечить подключение клиентов из других сетей к приложениям,

развернутым на этих компьютерах. Существует два механизма для реализации поставленной задачи:

- развертывание VPN-сервера;
- привязка портов на NAT-сервере.

Технология виртуальных частных сетей (VPN, Virtual Private Network) предполагает создание туннеля между внутренней сетью и удаленным компьютером. Туннель устанавливается после прохождения процедуры аутентификации, а при необходимости может быть защищен шифрованием на базе протоколов IPSec, в том числе с использованием сертификатов, подлинность которых может быть проверена с помощью инфраструктуры открытых ключей (PKI, Public Key Infrastructure). Очевидно, такие механизмы безопасности вряд ли будут востребованы в образовательном процессе. Клиентские компоненты для установки VPN-подключений с использованием наиболее распространенных протоколов (PPTP — Point-to-Point Tunneling Protocol, L2TP — Layer 2 Tunneling Protocol) имеются во всех современных операционных системах. Подключившись к VPN, клиентский компьютер фактически получает IP-адрес, относящийся к внутренней сети лаборатории. После этого клиент может получать доступ ко всем сетевым сервисам и приложениям, развернутым в данной сети. Для подключения к приложению на лабораторном компьютере удаленный пользователь должен:

- создать VPN-подключение (для этого необходимо знать публичный IP-адрес шлюза сети лаборатории, логин и пароль для аутентификации подключения);
- обратиться к приложению, развернутому во внутренней сети лаборатории (для этого необходимо знать внутренний IP-адрес лабораторного компьютера и номер порта TCP или UDP, который назначен для этого приложения).

Реализация VPN предполагает развертывание соответствующего сервера. Он может быть реализован как программный сервис для различных операционных систем, так и в виде аппаратного решения.

Технология преобразования сетевых адресов (NAT, Network Address Translation) позволяет преодолеть ограничения обычной IPv4-маршрутизации, связанные с невозможностью построения маршрутов между публичными и частными сегментами сетей. При использовании частная сеть представляется как единственный узел с внешним IP-адресом ее шлюза. Для разделения трафика между клиентами внутри сети используется его идентификация на основе замены порта TCP или UDP. Этот процесс осуществляется динамически и обеспечивается NAT-сервером, который также может быть реализован и как программный сервис, и как аппаратное решение. Однако следует заметить, что, в отличие от VPN, NAT-сервер всегда присутствует в сетях, имеющих частный диапазон адресов; в противном случае они просто не имели бы возможности дос-

тупа к любой публичной сети, в том числе к Интернету. Поэтому устройства, реализующие NAT, являются достаточно массовыми и дешевыми (в частности, относящимися к классу SOHO, Small Office — Home Office), что является определенным преимуществом перед VPN. Однако включение NAT как такового не делает доступными для внешних клиентов приложения, развернутые во внутренней сети лаборатории. В базовом режиме NAT позволяет передавать трафик из внутренней сети во внешнюю (и получать ответы), но внешние запросы не обрабатываются. Для этого необходимо осуществить так называемую публикацию виртуальных серверов. Технически это означает, что, когда NAT-сервер получает на своем внешнем интерфейсе запрос по определенному порту TCP (или UDP), он транслирует его заранее определенному компьютеру во внутренней сети на заранее определенном порту. Таким образом, для подключения к приложению на лабораторном компьютере удаленный пользователь должен знать лишь публичный адрес шлюза сети лаборатории и номер порта TCP или UDP, на котором опубликовано соответствующее приложение. Как видим, процедура является более простой по сравнению с установкой VPN-подключения.

Вместе с тем применение VPN может быть рекомендовано для выполнения административных задач (например, доступ к удаленному рабочему столу), так как является более безопасным ввиду необходимости дополнительной проверки подлинности. Обе технологии могут применяться для организации доступа как к приложениям, позволяющим управлять лабораторным оборудованием, так и к другим сетевым приложениям и службам, развернутым на лабораторных компьютерах. Кроме того, можно получать доступ и к сетевым устройствам во внутренней сети, например, IP-камерам для визуального мониторинга лабораторных стендов.

### Снижение стоимости решения

При выборе технологии предоставления доступа клиентам из внешних сетей необходимо учитывать стоимость (внедрение NAT обычно обходится дешевле). Однако следует рассмотреть и другие возможности для снижения стоимости решения.

Как уже отмечалось выше, в большинстве случаев в учебном процессе организуется доступ к нескольким (однотипным или разнотипным) лабораторным стендам. Поскольку программное обеспечение на лабораторных компьютерах позволяет одновременно работать лишь с одним экземпляром оборудования, то число компьютеров определяется числом стендов. Можно снизить стоимость применяемого оборудования, консолидировав управление этими компьютерами. Этого можно добиться или за счет полного отказа от работы с ними в интерактивном режиме (при этом административные задачи решаются в режиме удаленного рабочего

стола), или за счет применения KVM-переключателей (KVM — Keyboard-Video-Mouse). В последнем случае используется лишь один комплект устройств ввода и один монитор для управления всеми компьютерами.

Однако существует и еще один механизм снижения стоимости, который стал доступен в последние годы благодаря развитию технологий виртуализации. Виртуализация успешно применяется для консолидации серверов, что позволяет добиться более высокого уровня загрузки оборудования. Препятствием для применения этих технологий при построении лабораторий удаленного доступа являлись проблемы по взаимодействию виртуализованных компьютеров с реальной периферией. На данный момент стали доступными продукты виртуализации (в том числе бесплатные), в которых эта проблема решена.

Таким образом, к одному физическому компьютеру подключается несколько лабораторных стендов, для работы с каждым из которых выделяется своя виртуальная машина (или с одним из стендов может работать сама хостовая машина). С учетом того, что лабораторные компьютеры обычно не очень требовательны к вычислительной мощности, в качестве хост-машины может использоваться даже обычный персональный компьютер при наличии достаточного объема оперативной памяти (рекомендуется 1...2 Гбайт из расчета на одну виртуальную машину) и места на жестком диске (при большом числе виртуальных машин рекомендуется использовать несколько жестких дисков, объединенных в RAID-массив, или, по возможности, внешнюю систему хранения данных).

Еще одним преимуществом виртуализации является возможность быстрого получения нужного числа виртуальных машин на основе одного заранее подготовленного образа. При этом требуемое административное воздействие значительно меньше, чем выполнение тех же задач с парком физических компьютеров. Это свойство также полезно с точки зрения восстановления доступности после сбоев.

Наиболее подходящим для построения лаборатории удаленного доступа можно считать продукт Oracle VirtualBox. Он не привязан к какому-то одному семейству операционных систем (как, например, Microsoft Hyper-V), не имеет искусственных ограничений, свойственных бесплатным версиям коммерческих продуктов (как, например, VMware Player). Кроме того, VirtualBox поддерживает работу с различными форматами виртуальных жестких дисков, что позволяет готовить (или использовать ранее подготовленные) образы виртуальных машин в различных системах виртуализации.

## Пример построения лаборатории удаленного доступа

Появление программной среды LabVIEW и ее использование в вузах позволит решить проблемы создания инженерного лабораторного практикума как локального, так и удаленного вариантов. Компьютер, оснащенный измерительно-управляющей аппаратной частью и программной средой LabVIEW, позволяет полностью автоматизировать процесс физических исследований. С использованием LabVIEW достаточно просто реализуются сетевые приложения, позволяющие превратить лабораторный стенд лаборатории в стенд, управляемый удаленно через Интернет.

LabVIEW представляет собой среду прикладного графического программирования, используемую в качестве стандартного инструмента для проведения измерений, анализа их данных и последующего управления приборами и исследуемыми объектами. Среда LabVIEW закуплена МГТУ им. Н. Э. Баумана и может быть установлена на всех без исключения компьютерах университета как лицензированная. Обучение приемам программирования в этой среде не встречает трудностей и легко воспринимается как преподавателями, так и студентами университета.

В этом случае считается оправданным требование использования единой среды для проектирования систем управления и сбора данных, а также создания систем удаленного управления объектами.

Если рассматривать лабораторные работы в курсах электроники, то лабораторные исследования, автоматизированные с использованием технологии среды LabVIEW, могут существовать одновременно в нескольких формах проведения:

- в процессе занятий студенты самостоятельно собирают исследуемые электронные устройства на наборном поле макетного коннектора или устройства (например, NI ELVIS) и выполняют лабораторные задания на локальном рабочем месте (вариант не поддерживает удаленный доступ к стенду);
- в процессе занятий студенты получают макеты для исследования, заранее подготовленные на макетном коннекторе, и работы выполняются на локальном рабочем месте (этот вариант может быть использован и для удаленного доступа к лабораторным работам);
- демонстрационные лабораторные работы с использованием видеопотока данных, также реализуемые с использованием LabVIEW.

Учебная платформа NI Elvis 2+ (рис. 2, см. третью сторону обложки) содержит:

- порт USB для сопряжения с ПК;
- встроенную плату сбора данных 8/16 каналов аналогового ввода, 16 разрядов, 1,25 МГц;

- два канала аналогового вывода, 16 разрядов, 2,8 МГц;
- 24 цифровые линии ввода/вывода, 10 МГц;
- два счетчика/таймера;
- набор щупов для мультиметра и осциллографа;
- программно-реализованные функции приборов.

В качестве аппаратного средства также может быть использовано совместное решение компаний National Instruments и Texas Instruments (NI myDAQ) — портативная образовательная платформа для студентов инженерных специальностей. NI myDAQ (рис. 3) представляет собой измерительное устройство, подключаемое к ПК и позволяющее проводить студентам технических вузов практические занятия.

Устройство имеет встроенные аналоговые цепи, включающие в себя преобразователи сигналов, усилители, а также интерфейсные компоненты и микросхемы управления питанием. Платформа NI myDAQ тесно интегрирована со средой графической разработки NI LabVIEW и позволяет студентам работать с аналоговыми схемами, проводить измерения сигналов с датчиков и обработку сигналов.

Образовательная платформа NI myDAQ позволяет тесно связать теорию и практику благодаря набору из восьми программно-настраиваемых измерительных приборов, в том числе цифрового



Рис. 4. Панель измерительных приборов устройства myDAQ

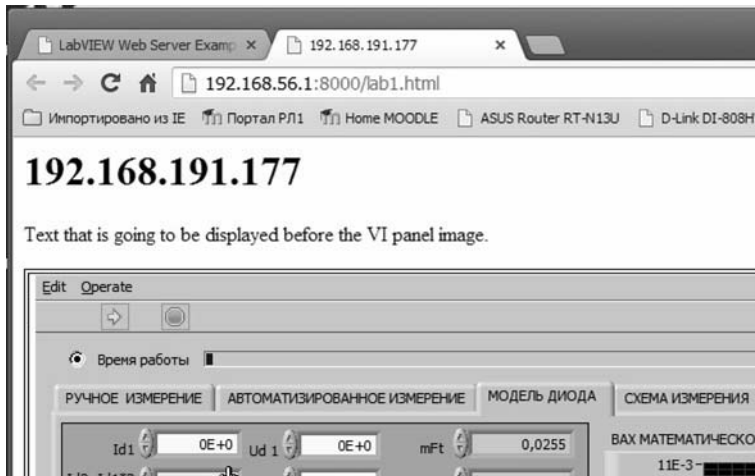


Рис. 5. Пример обращения к лабораторному стенду через браузер

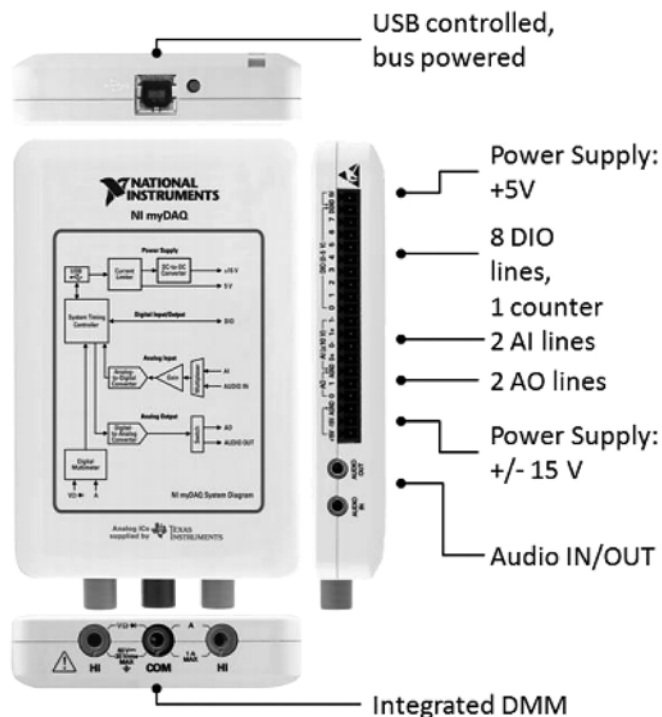


Рис. 3. Портативная платформа NI myDAQ

мультиметра, осциллографа, генератора функций, анализатора АЧХ/ФЧХ, анализатора динамических сигналов, генератора произвольных сигналов, цифрового устройства записи и чтения. Все эти компьютерные измерительные приборы могут быть использованы для проведения лабораторных экспериментов (рис. 4).

В сочетании со средой разработки LabVIEW, установленной на ПК, NI myDAQ предоставляет автоматизировать процесс эксперимента и использовать его как в локальных, так и в удаленных режимах работ для получения, сохранения и обработки экспериментальных данных.

В лаборатории электроники МГТУ им. Н. Э. Баумана развернуто четыре стенда ELVIS 2+ для обеспечения удаленных лабораторных работ по курсу "Электроника". На одном из физических компьютеров при этом задействованы три виртуальные машины, что позволяет использовать практически семь рабочих стендов. Обращение к ним пользователя происходит через WEB-браузер (рис. 5). Для получения пользователем данных от удаленных стендов на каждой машине присутствует FTP-сервер.

### Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующее заключение. Повышение качества образовательного процесса и снижение затрат на проведение лабораторных работ с уникальным оборудованием при сохранении требований Типового положения об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении), утвержденного постановлением Пра-

вительства Российской Федерации от 05.04.2001 № 264, и требований современного поколения Федеральных государственных образовательных стандартов возможно при использовании технологии автоматизации экспериментальных исследований на платформе LabVIEW и сочетании локального и удаленного доступа к оборудованию.

Управление натурным экспериментом и реализация имитационного эксперимента на платформе LabVIEW в сочетании с возможностями электронного САПР Multisim позволяет преподавателю создавать легко реконфигурируемые лабораторные стенды. Расширение числа одновременно работающих стендов при ограниченном числе физических машин в этом случае осуществляется при использовании интеграции LabVIEW и Multisim.

Экономия публичных IPv4-адресов достигается тем, что лабораторные компьютеры с подключенным к ним оборудованием размещаются во внутренней локальной сети, где и обеспечивается подключение клиентов из других сетей к приложениям, развернутым на этих компьютерах. Использование механизма развертывания VPN-сервера реализации поставленной задачи имеет некоторые особенности, которые указаны выше. Такое решение совместно с использованием WEB-сервера LabVIEW позволяет реализовать безопасность работы уникального оборудования и доступ к нему пользователя-студента.

Наиболее подходящим для построения лаборатории удаленного доступа в такой конфигурации можно считать продукт Oracle VirtualBox. Особенно необходимо отметить, что VirtualBox поддерживает работу с различными форматами виртуальных жестких дисков или позволяет использовать ранее подготовленные образы виртуальных машин в различных системах виртуализации.

Дальнейшие исследования видятся в отработке эффективных сочетаний физических и виртуальных машин с подключением к ним реального оборудования.

#### Список литературы

1. Загидуллин Р. Ш. Использование виртуальных машин ORACLE VIRTUALBOX и среды LabVIEW в лабораторных практикумах удаленного доступа // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments — 2013. Сб. тр. XII международной научно-практической конференции Москва 28—29 ноября 2013 г. М.: LVR Пресс. 2013. С. 337—338.
2. Загидуллин Р. Ш., Антипов В. Ю. Объединение LabVIEW 2009 и Moodle для организации удаленных лабораторных работ на оборудовании NI PXI // Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологии National Instruments — 2011. Сб. тр. X международной научно-практической конференции. Москва 8—9 декабря 2011 г. М.: ДМК-пресс, 2011. С. 309—310.
3. Гульязев А. К. Виртуальные машины: несколько компьютеров в одном (+CD). СПб.: Питер, 2006. 224 с.
4. Загидуллин Р. Ш. Multisim, LabVIEW и Signal Express. Практика автоматизированного проектирования электронных устройств. Горячая линия — Телеком, 2009. 366 с.

**Yu. V. Berchun**, Senior Lecturer, e-mail: byv@bmstu.ru,  
**R. S. Zagidullin**, Associate Professor, e-mail: zag@bmstu.ru,  
Bauman Moscow state technical university, Moscow

## Complex Approach to the Organization of Remote Access to the Labware in Educational Process

*The received results allow to make a following conclusion. Improvement of quality of educational process and decrease in expenses for carrying out of laboratory works with the unique equipment, at preservation of requirements of Typical position about educational institution of the higher vocational training (a higher educational institution), the confirmed governmental order of the Russian Federation from 4/5/2001 № 264 and Requirements of modern generation of Federal state educational standards probably at use of technology of automation of experimental researches on platform LabVIEW and a combination of local and remote access to the equipment.*

*Management combination natural experiment, and realisation of imitating experiment on platform LabVIEW in a combination to possibilities electronic САПР Multisim allows to the teacher to create easily реконфигурируемые laboratory stands. Possibility to expand number of simultaneously working stands at the limited quantity of physical cars in this case is carried out at use of integration LabVIEW and Multisim.*

*The economy of public IPv4-addresses is reached by that laboratory computers with the equipment connected to them take place in an internal local network where connection of clients from other networks to the appendices developed on these computers is provided. Use of the mechanism expansion of the VPN-server of realisation of a task in view has some features which are specified above. Such decision, together with use WEB of server LabVIEW, allows to realise safety of work of the unique equipment and access to it the user-student. As it has been noted above, the most suitable to construction of laboratory of remote access in such configuration, it is possible to consider product Oracle VirtualBox. It is especially necessary to notice that VirtualBox supports work with various formats of virtual hard disks, or to use earlier prepared images of virtual cars in various systems виртуализации.*

*The further researches see in working off of effective combinations of physical and virtual cars connection to them of the real equipment.*

**Keywords:** a laboratory practical work, remote access, consolidation, virtual laboratory, LabVIEW



## References

1. **Zagidullin R. Sh.** Ispol'zovanie virtual'nyh mashin ORACLE VIRTUALBOX i srede LabVIEW v laboratornyh praktikumah udalennogo dostupa. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tehnologii National Instruments — 2013: Sb. tr. XII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konf., Moskva 28—29 nojabrja 2013 g.* M.: LVR Press, 2013. P. 337—338.
2. **Zagidullin R. Sh., Antipov V. Ju.** Ob'edinenie LabVIEW 2009 i Moodle dlja organizacii udaljonnyh laboratornyh rabot na oboru-

dovanii NI PXI. *Inzhenernye, nauchnye i obrazovatel'nye prilozhenii na baze tehnologii National Instruments — 2011: Sb. tr. X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Moskva 8—9 dekabrja 2013 g.* M.: DMK-press, 2011. P. 309—310.

3. **Gul'tjaev A. K.** *Virtual'nye mashiny: neskol'ko komp'yutеров v odnom (+CD).* SPb.: Piter, 2006. 224 p.
4. **Zagidullin R. Sh.** *Multisim, LabVIEW i Signal Express. Praktika avtomatizirovannogo proektirovanija jelektronnyh ustrojstv.* M.: Gorjachaja linija — Telekom, 2009. 366 p.

УДК 004.4'232 + 004.4'41

**В. В. Лаптев**, канд. техн. наук, доц., e-mail: laptev@ilabsltd.com,

**Д. А. Грачев**, аспирант, e-mail: dagrachev@list.ru,

Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань

## Семантическая модель программы и ее реализация

*Рассматривается статическая семантическая модель программы, разработанная и реализованная в редакторе кода интегрированной среды для обучения программированию. Семантическое дерево позволяет выполнять фазу анализа кода в редакторе и обеспечивает возможность разнообразного внешнего представления программы. Реализация выполнена на языке C# с широким использованием паттернов проектирования, что существенно снизило затраты на разработку.*

**Ключевые слова:** семантический редактор кода, учебный язык программирования, семантическая модель программы, статическое семантическое дерево, паттерны проектирования

### Введение

В последние годы в вузы на ИТ-направления приходит довольно много абитуриентов, которых не обучали алгоритмизации и программированию в школе. Это весьма неприятное обстоятельство обусловлено тем, что стандарт среднего образования по информатике и ИКТ предусматривает изучение алгоритмизации и программирования только в профильных классах. В вузы же приходят много школьников, которых обучали информатике по стандарту общего среднего образования, где на алгоритмизацию отведено менее 10 ч. Поэтому в настоящее время в вузе требуется осуществлять обучение программированию с начального уровня.

При обучении программированию необходимо решить две важные проблемы: на каком языке и в какой среде проводить обучение.

Мы анализировали положение дел в сфере практического обучения программированию в российских вузах и в профильных классах средней школы (выпускники которых обычно поступают на программистские направления). Были выявлены следующие наиболее часто используемые для первоначального обучения языки: Basic, Pascal, C/C++, C#, Java, школьный алгоритмический язык Ершол. Другие языки (например, Python) используются достаточно редко.

Язык программирования обычно существует в рамках некоторой среды программирования, по-

этому были выявлены среды, используемые для начального обучения программированию:

- язык Basic: SmallBasic, Visual Studio 6, Visual Basic 7 Express;
- язык Pascal: Turbo Pascal, Free Pascal Lazarus, PascalABC.NET, Turbo Delphi, BlackBox Component Builder;
- язык C/C++: Visual Studio.NET, Visual C++ Express, Turbo C++, Dev-C++, wxDev-C++, Code::Blocks, CodeLite;
- язык C#: Visual Studio.NET, Visual C# Express, Turbo C#;
- язык Java: NetBeans, Eclipse, IntelliJ IDEA;
- язык Ершол: среда КуМир.

Такое разнообразие говорит о том, что в обучении программированию отсутствует общепринятый доминирующий язык и интегрированная среда — каждый преподаватель самостоятельно принимает решение, какой язык в какой среде использовать. Проблема состоит в том, что все используемые языки и среды (исключениями являются среда КуМир с языком Ершол [1—3] и среда PascalABC.NET с языком PascalABC [4]) являются промышленными системами для разработки программного обеспечения и не предназначены для обучения.

Во-первых, все промышленные языки имеют англоязычную лексику. Однако практика обучения показала, что при начальном обучении программированию русская лексика предпочтительнее английской. К. Ю. Поляков, обучавший школьников

и в среде КуМир, и в среде Turbo Pascal, отмечает, что русские команды воспринимаются учениками намного легче английских [5]. Ф. В. Ткачев, обучавший школьников в среде BlackBox (школьная сборка — разработка Ф. В. Ткачева, в которой имеется возможность включить русскую лексику ключевых слов языка Component Pascal), тоже говорит о том, что "для начинающих программистов все-таки важно видеть понятные слова на родном языке" [6].

Во-вторых, промышленные языки велики по объему и весьма сложны, в связи с чем их изучение требует весьма значительных усилий. Например, современный стандарт языка C++ — это книга объемом более 1300 страниц, из которых более 750 страниц занимает описание стандартной библиотеки. Промышленные языки обычно включают множество мелких деталей, относящихся к архитектуре ЭВМ (например, в C++ пять знаковых целых типов и пять беззнаковых, которые отличаются размером и диапазоном). В этом плане язык PascalABC, позиционируемый авторами как обучающий, практически не отличается от промышленных языков.

В-третьих, среды, поддерживающие тот или иной язык программирования, тоже не являются обучающими. Обучающая среда обязана включать набор упражнений и заданий, которые будет выполнять ученик. Из рассмотренных выше сред только PascalABC.NET включает в качестве отдельного компонента электронный задачник Programming Taskbook [7, 8], содержащий более 1000 заданий. Заметим, что в настоящее время этот электронный задачник является единственным программным продуктом (кроме нашей системы), позволяющим хоть в какой-то степени автоматизировать работу преподавателя по подготовке вариантов заданий для программирования.

И наконец, в-четвертых, в промышленных средах редактор кода является обычным текстовым редактором. Хотя интегрированная среда обеспечивает некоторую поддержку языка программирования, но основные операции выполняются с символами, строками и блоками текста. Применение текстовых операций к коду программы приводит к регулярному нарушению синтаксиса языковых конструкций, что существенно повышает риск возникновения мелких синтаксических ошибок. Сообщения о синтаксических ошибках часто бывают неинформативными и часто сбивают начинающего с толку.

Редактор интегрированной среды сохраняет код программы в текстовом виде. Это приводит к тому, что код программы можно открыть, просмотреть и изменить вне интегрированной среды. При профессиональной разработке это бывает полезно, но при обучении провоцирует обучаемых на нечестные способы выполнения заданий по программированию.

Многолетняя практика преподавания программирования одного из авторов статьи показывает, что именно "текстоориентированность" редактора

кода приводит к тому, что обучаемый сосредоточен не на решаемой задаче, а на синтаксисе языка программирования. Между тем исследования мыслительной деятельности профессиональных программистов показали [9], что программист при решении задач использует знания двух типов: семантические и синтаксические.

*Семантические знания* — это долговременные знания, приобретаемые в результате усвоения опыта решения многочисленных задач с использованием разнообразных средств разработки. Эти знания представляют собой обобщенные базовые понятия программирования и схемы алгоритмов и не связаны ни с конкретным языком программирования, ни с конкретной системой разработки.

*Синтаксические знания* — краткосрочные, они приобретаются в процессе изучения конкретного языка программирования в конкретной среде разработки. Эти знания довольно легко забываются при смене средств программирования. Поэтому при начальном обучении важно учить именно программированию (что подчеркивает И. Р. Дединский [10]), а не языку — язык программирования является только инструментом реализации при решении задач.

Из всех рассмотренных языков и сред только язык Ершол в среде КуМир [1] создавался специально для начального обучения программированию. Язык обладает русскоязычной лексикой, и в среде реализован набор исполнителей (Робот, Черепашка и другие), предназначенных именно для начального обучения алгоритмизации. Однако язык устарел и не содержит объектно-ориентированных конструкций.

Таким образом, ввиду практического отсутствия как языков для обучения, так и поддерживающих сред авторами было принято решение о разработке специального учебного языка программирования и поддерживающей этот язык интегрированной среды обучения, в которой редактор кода не оперирует символами текста, а ориентирован на язык программирования.

В работе [11] были сформулированы требования к подобной среде, в работе [12] описаны учебный язык программирования Semantic Language и реализация его интерпретатора в рамках интегрированной среды [13, 14] для обучения программированию. Интегрированная среда строится вокруг редактора кода, который не является обычным текстовым редактором, а оперирует конструкциями языка программирования и объектами программы. Для реализации подобного подхода авторами разработана семантическая модель программы. В статье описана формальная семантическая модель, внутреннее представление модели в системе и ее реализация на языке C#.

### **Формальная семантическая модель программы**

Программа на учебном языке представляет собой либо единственный модуль, либо несколько модулей, один из которых является стартовым. Поэтому

семантическая модель программы — это семантическая модель модуля. Модуль включает список импортируемых модулей, секцию определения и секцию инициализации. Секция инициализации содержит последовательность операторов, исполняемых при загрузке модуля в память. В секции определения задаются константы и переменные, определяемые типы, процедуры и функции. В общем случае все части модуля могут быть пустыми.

Для определения формальной семантической модели программы нужно определить формальную семантическую модель оператора. В общем виде формальная семантическая модель оператора представляет собой пару:

имя = <параметры, правила>

Имя — это уникальный идентификатор оператора. В учебном языке каждый оператор начинается ключевым словом, поэтому имя — это ключевое слово оператора. Параметры и правила определяют семантику оператора. Состав параметров зависит от оператора, набор правил представляет собой множество логических выражений и условий, которые должны быть истинными. Эти выражения и условия проверяются редактором при вставке оператора в программу.

В качестве примеров рассмотрим несколько формальных моделей простых и блочных операторов учебного языка [1]. Простыми операторами являются оператор импорта, операторы определения констант и переменных, операторы ввода и вывода, оператор присваивания и операторы вызова подпрограммы. К блочным операторам относятся следующие: оператор определения модуля, операторы определения подпрограмм, оператор цикла, условный оператор и оператор определения типа.

Сначала опишем семантику оператора неформально, а затем приведем формальную модель.

Оператор определения переменной включает тип переменной и ее имя. Если тип переменной является простым (целый, вещественный, символ, булевский), то разрешается инициализировать переменную начальным значением. Инициализатор — это выражение, тип значения которого должен совпадать с типом переменной. Имя переменной не должно совпадать с ранее объявленными именами. Тип переменной должен быть либо определенным в языке, либо определенным в программе. Таким образом, формальную модель оператора объявления переменной можно представить следующим образом:

```
variable =
< param = < type, name, value >,
rules = < ~ (name ∈ Names), (type ∈ Types),
if ~ (value = null) then
(type = integer)|(type = real)|(type = boolean)|
(type = character)
>
>
```

В этой модели определены следующие элементы:

- variable — ключевое слово оператора определения переменной в английской нотации;
- param — параметры формальной модели оператора;
- rules — правила и условия.

Параметры:

- type — тип переменной;
- name — имя переменной;
- value — инициализирующее выражение переменной.

Модель включает два логических выражения:

- $\sim$  (name ∈ Names) — это выражение истинно при отсутствии имени определяемой переменной в множестве Names объявленных имен;

- (type ∈ Types) — это выражение истинно, если тип переменной присутствует в множестве Types встроенных или определенных типов программы.

В модели определено одно условие, при истинности которого проверяется истинность вложенных выражений и условий:

if  $\sim$  (value = null) then

Это условие определяет, какие выражения должны быть истинными, если в определении переменной присутствует инициализирующее выражение. В данном случае выражение

(type = integer) | (type = real) | (type = boolean) |  
(type = character)

является истинным, если тип переменной является простым.

Блочные операторы отличаются тем, что включают тело — последовательность операторов учебного языка, которую обозначим как  $P$ :

$$P = m_1, m_2, \dots, m_k,$$

где  $k$  — произвольное целое положительное число. Последовательность операторов является обязательным параметром блочного оператора. Однако для разных блочных операторов на состав операторов в теле накладываются семантические ограничения. Например, оператор определения типа разрешается задавать только в секции определений модуля, как и операторы определения процедур и функций. Поэтому в модели блочного оператора требуется для параметра  $P$  указывать ограничения.

Определим множества  $S$ , элементами которых являются модели операторов, их разрешается задавать в теле того или иного блочного оператора:

- $S_{\text{exe}} = \{\text{constant, variable, let, input, output, call}\}$
- $S_{\text{dcl}} = \{\text{constant, variable, type, procedure, function}\}$
- $S_{\text{imp}} = \{\text{import}\}$ .

Множество  $S_{\text{exe}}$  включает операторы, которые разрешается задавать в теле операторов определения процедур, функций, методов, в секции инициализации модуля, в теле оператора цикла и условного оператора. Операторы объявления константы и переменной включены в это множество, по-

сколькx с помощью них во время выполнения определяются локальные в блоке переменные и константы. С помощью множества  $S_{dcl}$  определяется состав операторов объявления, которые разрешается задавать в секции определения модуля. И множество  $S_{imp}$  определяет возможности конструирования последовательности операторов импорта. Тогда формальную модель оператора определения модуля можно задать таким образом:

```

module =
< param = < name, Pimp, Pdcl, Pexe >
  rules = < ~(name, ModuleNames), (Pimp ∈ Simp) &
    (Pdcl ∈ Sdcl) & (Pexe ∈ Sexe) >
>

```

Эта модель устанавливает, что параметрами оператора определения модуля является имя модуля и три последовательности операторов: последовательность операторов импорта, последовательность операторов объявления в секции определения, последовательность исполняемых операторов в секции инициализации. Правила истинны, если операторы последовательностей принадлежат соответствующим множествам и имя модуля не должно совпадать с именами системных и других входящих в программу модулей.

Из моделей блочных операторов самой простой является модель оператора цикла:

```

while =
< param = < exp, P >
  rules = < (type(exp) = boolean), (P ∈ Sexe) >
>

```

Параметрами, очевидно, являются булевоe выражение — условие цикла и тело оператора. Более сложную модель имеет условный оператор, поскольку для условного оператора требуется определить еще модели вложенных ветвей `else_if` и `else`:

```

else_if =
< param = < exp, P >
  rules = < (type(exp) = boolean), (P ∈ Sexe) >
>
else =
< param = < P >
  rules = < (P ∈ Sexe) >
>

```

Определим множество операторов, которые могут входить в тело условного:

$$S_{if} = S_{exe} \cup \{ else\_if, else \}.$$

Тогда семантическая модель условного оператора определяется так:

```

if =
< param = < exp, P >
  rules = < (type(exp) = boolean), (P ∈ Sif),
    (last(P) = else) >
>

```

Третье семантическое правило устанавливает, что ветка `else` должна быть последней в теле.

Таким образом, семантическая модель программы определяется формальной моделью оператора определения модуля, который включает последовательность операторов импорта, операторов объявления и последовательность исполняемых операторов в секции инициализации. Тела блочных операторов, входящих в эти последовательности, содержат новые последовательности операторов.

### Реализация семантической модели программы

Внутренним представлением семантической модели программы в системе является многоуровневый список списков. Каждый оператор программы представлен узлом списка, в котором сохраняется полная информация о семантике (в частности, каждый узел имеет внутреннее имя, соответствующее оператору). В каждом узле имеются ссылки на следующий и предыдущий. Комментарий в учебном языке `Semantic Language` тоже является оператором, поэтому представляется отдельным узлом списка. В узлах, соответствующих блочным операторам, имеется ссылка на тело, которое представляет собой дочерний список данного узла. Соответственно, первый оператор дочернего списка имеет ссылку на родительский узел.

Эту структуру строит редактор кода в соответствии с действиями программиста. При загрузке готового проекта строится такая же структура. Мы называем такое представление статическим *семантическим деревом* программы.

Первоначально (в момент включения в проект первого модуля, в котором еще нет ни одного оператора) дерево состоит из одного специального пустого узла, который имеет внутреннее имя `NullOperator`. Этот же узел представляет в дереве пустые строки, которые вставляются в программу для повышения читабельности. Обычно новый оператор вставляется в программу на месте некоторой пустой строки. В дереве эта операция представляет собой простую замену узла `NullOperator` на конкретный узел-оператор. Если вставляемый оператор является блочным, то на месте тела также вставляется `NullOperator`. Например, после вставки первого оператора **модуль** дерево выглядит, как показано на рис. 1 (показаны связи только вперед).

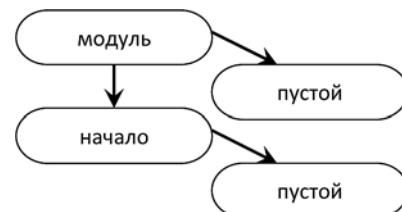


Рис. 1. Семантическое дерево при вставке первого оператора **модуль**

Дочерняя вершина узла **модуль** — это тело секции определений, а дочерний узел вершины **начало** — это тело секции инициализации. Эти пустые узлы будут заменены на конкретные узлы-операторы при вставке. В качестве примера приведем простую программу, вычисляющую факториалы от 1 до  $N$ .

```
#Вычисление факториалов#
модуль Факториал
  подключить Математика;
  закр процедура (входное целое  $x$ ) Факт
    переменная-целое  $K$ ;
    переменная-целое тФакт;
    присвоить тФакт := 1;
    присвоить  $K$  := 1;
    пока  $K \leq x$  повторять вывести тФакт;
      вывести '\n';
      присвоить  $K$  :=  $K + 1$ ;
      присвоить тФакт := тФакт *  $K$ ;
    конец цикла;
  конец Факт;
начало
  вызвать Факт(15);
конец Факториал.
#Конец модуля вычисления факториалов#
```

В этой простой программе имеются в наличии все основные конструкции, которые могут быть представлены в семантическом дереве: комментарии, пустые строки, простые и блочные операторы. Дерево, которое построил редактор по этой программе, показано на рис. 2 (показаны связи только вперед).

Решение о явном представлении программы в виде семантического дерева привело к важным последствиям при реализации интегрированной среды Semantic IDE [13, 14]. Во-первых, регулярная структура семантического дерева делает алгоритм обхода [12] тривиальным. Во-вторых, ошибки выявляются в редакторе, поэтому на вход интерпретатора поступает правильная программа. Интерпретатор при обходе дерева не выполняет ни лексического, ни синтаксического анализа — это существенным образом упростило реализацию и повысило быстродействие. Вместо интерпретатора можно достаточно легко реализовать конвертер в семантически эквивалентный императивный язык программирования (например, в С или в Component Pascal) — для этого достаточно в алгоритме обхода вызов интерпретирующей функции заменить на вызов функции, формирующей текстовое представление оператора на языке программирования.

В-третьих, в виде семантического дерева может быть представлен любой документ, состоящий только из узлов-комментариев. Система позволяет включать в комментарий текст, рисунки, таблицы — все, что позволяет включать формат RTF. Поэтому справочный и методический обучающий материал можно создавать непосредственно в редакторе кода.

И наконец, явное отделение внутреннего представления программы от внешнего позволило реализовать идею сменяемого синтаксиса во внешнем представлении [13, 14].

Фундаментом реализации семантического дерева является паттерн Наблюдатель (Observer) [15]. Как известно, в этом паттерне устанавливаются отношения между субъектом и наблюдателем. Субъект хранит у себя список наблюдателей, которых оповещает при каких-либо изменениях в своем состоянии.

В рамках данной реализации субъект наблюдения реализуется абстрактным классом Semantic Subject, который является корнем обширной иерархии классов, часть которой показана на рис. 3. Символом «A» помечены абстрактные классы.

В этой иерархии определены все классы-операторы, которые, как и операторы учебного языка, делятся на два вида: однострочные (простые) и

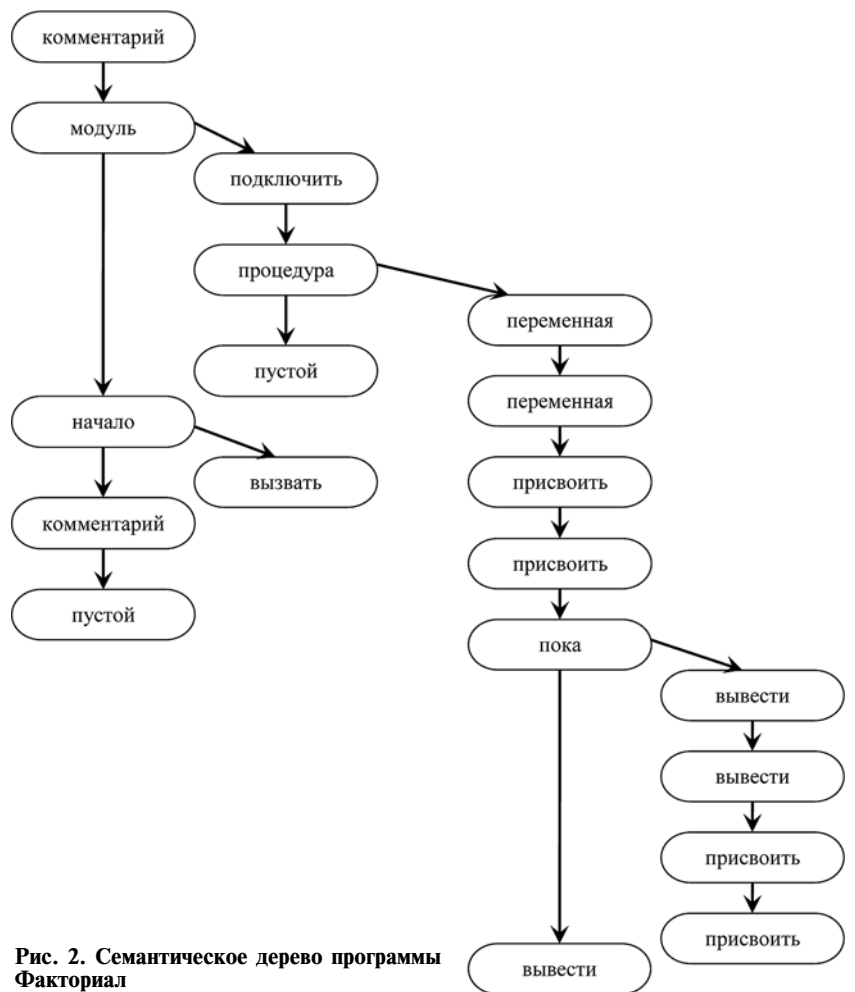


Рис. 2. Семантическое дерево программы Факториал

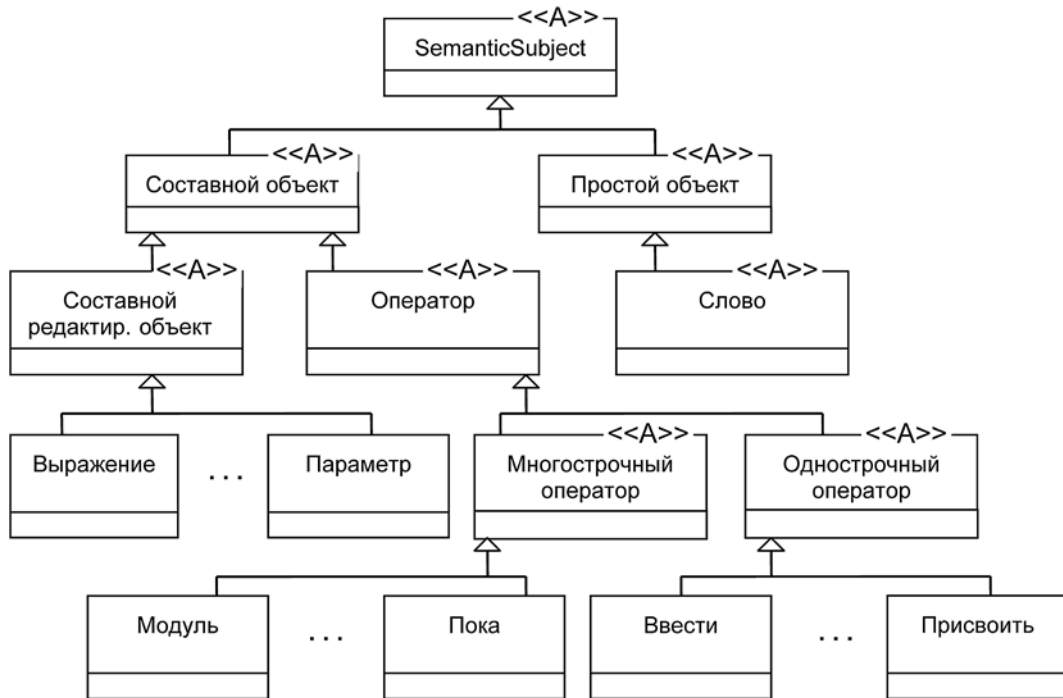


Рис. 3. Иерархия классов субъекта наблюдения

многострочные (блочные). Помимо операторов, в иерархию семантических объектов включены элементы операторов, которые сами имеют сложную структуру: выражения, список параметров процедур-функций-методов, не элементарные типы. Как правило, эти элементы операторов разрешено редактировать в составе оператора.

Семантическое дерево, элементами которого являются объекты-операторы, реализуется отдельным классом *SemanticTree*. В абстрактном классе *SemanticOperator* (см. на рис. 3 класс *Оператор*) определены все необходимые поля-ссылки.

Множество классов-наблюдателей, составляющих иерархию классов-блоков с базовым абстрактным классом *Block*, реализуют интерфейс *ISemanticObserver*. Все эти классы так или иначе связаны с отображением семантического дерева в окне редактора. Сам редактор, реализуемый классом *Editor*, также является наблюдателем. Паттерн Наблюдатель используется еще в некоторых случаях, в частности для наблюдения за курсором.

Помимо паттерна Наблюдатель, в реализации широко применяется паттерн Команда [15] (*Command*). В *Semantic IDE* определен классический базовый абстрактный класс *Command* с методами *Execute()* и *Undo()*. Посредством паттерна Компонент (Composite) реализован классический класс *MacroCommand*, определяющий составную команду. Такой подход позволил определить наборы базовых команд для различных объектов модели, а уже из них компоновать более сложные составные команды. Например, базовые команды определены для выражения, списка параметров, модуля, семантического

дерева, слова и т. п. В системе реализован класс *CommandHistory* для хранения истории выполненных команд.

Команды IDE составляют отдельную иерархию с базовым абстрактным классом *IDECommand*, но тоже скомпонованы по "тематическим" группам. Например, все команды для работы с проектом собраны в одну группу. Для хранения команд IDE реализован классический стек команд с методами *Undo()* и *Redo()*.

### Заключение

Описанный подход с широким использованием паттернов позволил существенным образом снизить затраты времени и сил при модификации и развитии системы. Построение семантического дерева программы редактором позволяет полностью отказаться от фазы анализа (как лексического, так и синтаксического) при реализации конвертеров учебного языка в промышленные языки — это также существенным образом упрощает разработку.

### Список литературы

1. Система программирования Кумир — <http://www.niisi.ru/kumir/index.htm>
2. Кушниренко А. Г., Лебедев Г. В. Программирование для математиков: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 384 с.
3. Кушниренко А. Г., Лебедев В. Г. 12 лекций о том, для чего нужен школьный курс информатики и как его преподавать. Методическое пособие. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. 464 с.
4. Система программирования PascalABC.NET. URL: <http://pascalabc.net/>

5. Поляков К. Ю. КуМир и школьная информатика. [http://kpolyakov.blogspot.ru/2011/04/blog-post\\_5678.html](http://kpolyakov.blogspot.ru/2011/04/blog-post_5678.html)

6. Куркина Л. Г., Ткачев Ф. В., Цвеляя И. А. Русифицированные мини-исполнители во вводных курсах программирования. URL: <http://www.inr.ac.ru/~info21/texts/bytic-xx-2009.htm>

7. Абрамян М. Э. Электронный задачник Programming Taskbook: опыт разработки и применения / II Международная научно-практическая конференция "Современные информационные технологии и ИТ-образование", Москва, 18—21 декабря 2006 г. Сборник докладов научно-практической конференции. М.: МАКС пресс, 2006. С. 194—199.

8. Абрамян М. Э. Новые возможности задачника Programming Taskbook: обработка динамических структур и конструктор учебных заданий // IV Международная научно-практическая конференция "Современные информационные технологии и ИТ-образование", Москва, 14—15 декабря 2009 г. Сборник трудов. М.: ИНТУИТ.РУ, 2009. С. 282—289.

9. Шнейдерман Б. Психология программирования. Человеческий фактор в вычислительных и информационных системах. М.: Радио и связь, 1984.

10. Дединский И. Р. Аналитический подход к довузовскому преподаванию программирования. URL: <http://storage.ded32.net.ru/Lib/Doc/AnalyticApproach2010.pdf>

11. Лаптев В. В. Требования к современной обучающей среде по программированию // Объектные системы-2010 (Зимняя сессия): материалы II Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 10—12 ноября 2010 г. / Под общ. ред. П. П. Олейника. Ростов-на-Дону, 2010. С. 104—110.

12. Грачев А. Д., Лаптев В. В. Разработка учебного языка программирования и интерпретатора для обучающей среды // Объектные системы—2012: материалы VI Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 10—12 мая 2012 г. / Под общ. ред. П. П. Олейника. Ростов-на-Дону: ШИ ЮРГТУ (НПИ), 2012. С. 92—101.

13. Грачев А. Д., Лаптев В. В. Интегрированная среда для обучения программированию // Объектные системы — 2013: материалы VII Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 10—12 мая 2013 г. / Под общ. ред. П. П. Олейника. Ростов-на-Дону: ШИ ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 17—24.

14. Грачев А. Д., Лаптев В. В. Семантическая интегрированная среда для обучения программированию // Педагогическая информатика. 2013. № 2. С. 71—81.

15. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2013. 368 с.

V. V. Laptev, Associate Professor, e-mail: [laptev@ilabsltd.com](mailto:laptev@ilabsltd.com),  
D. A. Grachev, Post Graduate Student, e-mail: [dagrachev@list.ru](mailto:dagrachev@list.ru),  
Astrakhan state technical university, Russia, Astrakhan

## Semantic Model of the Program and its Realization

*In article the static semantic model of the program developed and realized in the code editor of the integrated environment for training in programming is considered. The semantic tree allows to carry out a phase of the analysis of a code in the editor and provides possibility of various external submission of the program. Realization is executed in the C# language with wide use of design patterns that significantly lowered costs of development.*

**Keywords:** *semantic editor of a code, educational programming language, semantic model of the program, static semantic tree, design patterns*

### References

1. Система программирования Kumir. URL: <http://www.niisi.ru/kumir/index.htm>

2. Kushnirenko A. G., Lebedev G. V. Программирование для математиков: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, ГИ. ред. физ.-мат. лит., 1988. 384 п.

3. Kushnirenko A. G., Lebedev V. G. 12 лекций о том, для чего нужны школьный курс информатики и как его преподавать. Методическое пособие. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. 464 п.

4. Система программирования PascalABC.NET. URL: <http://pascalabc.net/>

5. Поляков К. Ю. КуМир и школьная информатика. URL: [http://kpolyakov.blogspot.ru/2011/04/blog-post\\_5678.html](http://kpolyakov.blogspot.ru/2011/04/blog-post_5678.html)

6. Куркина Л. Г., Ткачев Ф. В., Цвеляя И. А. Русифицированные мини-исполнители во вводных курсах программирования. URL: <http://www.inr.ac.ru/~info21/texts/bytic-xx-2009.htm>

7. Абрамян М. Э. Электронный задачник Programming Taskbook: опыт разработки и применения. II Международная научно-практическая конференция "Современные информационные технологии и ИТ-образование", Москва, 18—21 декабря 2006 г. Сборник докладов научно-практической конференции. М.: МАКС пресс, 2006. С. 194—199.

8. Абрамян М. Э. Новые возможности задачника Programming Taskbook: обработка динамических структур и конструктор учебных заданий. IV Международная научно-практическая конференция "Современные информационные технологии и ИТ-образование", Москва, 14—15 декабря 2009 г. Сборник трудов. М.: ИНТУИТ.РУ, 2009. С. 282—289.

9. Шнейдерман Б. Психология программирования. Человеческий фактор в вычислительных и информационных системах. М.: Радио и связь, 1984.

10. Дединский И. Р. Аналитический подход к довузовскому преподаванию программирования. URL: <http://storage.ded32.net.ru/Lib/Doc/AnalyticApproach2010.pdf>

11. Лаптев В. В. Требования к современной обучающей среде по программированию. *Объектные системы—2010* (Зимняя сессия): материалы II Международной научно-практической конференции. Россия, Ростов-на-Дону, 10—12 ноября 2010 г. / Под общ. ред. П. П. Олейника. Ростов-на-Дону, 2010. С. 104—110.

12. Грачев А. Д., Лаптев В. В. Разработка учебного языка программирования и интерпретатора для обучающей среды. *Объектные системы—2012*: материалы VI Международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 10—12 мая 2012 г.) / Под общ. ред. П. П. Олейника. — Ростов-на-Дону: ШИ ЮРГТУ (НПИ), 2012. С. 92—101.

13. Грачев А. Д., Лаптев В. В. Интегрированная среда для обучения программированию. *Объектные системы — 2013*: материалы VII Международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 10—12 мая 2013 г.) / Под общ. ред. П. П. Олейника. Ростов-на-Дону: ШИ ЮРГТУ (НПИ), 2013. С. 17—24.

14. Грачев А. Д., Лаптев В. В. Семантическая интегрированная среда для обучения программированию. *Педагогическая информатика*. 2013. № 2. С. 71—81.

15. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2013. 368 п.

УДК 004.6 (004.62)

С. К. Дулин<sup>1, 3</sup>, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: s.dulin@ccas.ru,

Н. Г. Дулина<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ngdulina@mail.ru,

Д. А. Никишин<sup>3</sup>, канд. техн. наук, зав. сектором, e-mail: dmnikishin@mail.ru

<sup>1</sup> Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО НИИАС) РАН

<sup>2</sup> Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН

<sup>3</sup> Институт проблем информатики РАН

### Особенности моделей геоданных и методов их обработки в аспекте обеспечения семантической геоинтероперабельности\*

*Ключевой задачей обеспечения семантической геоинтероперабельности является создание единой концептуальной модели представления геоданных на основе интеграции пространственно-распределенной информации. Такая модель должна строиться на основе существующих метасхем баз геоданных с учетом многофакторности взаимодействия пользователей и семантики, заложенной в пространственные онтологии и/или геотезаурусы и классификаторы. Работа посвящена исследованию и анализу существующих моделей и методов представления геоданных и имеет целью оценку релевантности существующих структур геоданных методам и подходам обеспечения их семантической геоинтероперабельности при решении задач концептуального поиска геоданных. Для анализа были выбраны те структуры геоданных, которые совмещают в себе средства отображения всех трех групп пространственно-распределенной информации: семантической, метрической и топологической. Рассмотрены различные уровни представления геоинформационного контента, которые требуют принципиально различных методов обработки.*

**Ключевые слова:** семантическая геоинтероперабельность, моделирование геоданных, онтологии, концептуальный поиск

#### Введение

За последнее десятилетие в области геоинформатики произошла значительная эволюция способов организации информационных процессов. Можно выделить следующие модели организации информационных процессов:

- автономная модель, объединяющая в себе как прикладные интерфейсы пользователя, так и функции хранения данных в едином аппаратно-программном комплексе, т. е. "все в одном". Эта модель является наиболее очевидным подходом, существовавшим достаточно долго в виде так называемых настольных геоинформационных систем;
- модель клиент-сервер (Client/Server, C/S) — данные хранятся централизованно в виде выделенного ресурса, к которому посредством стандартных запросов обращаются многочисленные клиенты-обработчики данных, т. е. представляет

собой "звездообразную" структуру, реализующую отношения "один ко многим";

- облачная, или сетевая, модель (GRID) — имеется множество серверов, предназначенных как для хранения данных, так и для выполнения некоторых базовых процедур, а также имеется множество клиентов, которые решают в этой среде свои прикладные задачи. То есть такая модель представляет собой сетевую структуру, реализующую отношения "многие ко многим". Важным компонентом такой системы должна являться посредническая структура, которая сообщает клиентам, где искать нужные им данные.

В настоящее время произошел практически полный переход от автономных, "настольных" комплексов в сторону распределенных геоинформационных систем [1]. В связи с этим немаловажным фактором работы с геоданными, ввиду их значительного объема, становится скорость их передачи по каналам связи в сети Интернет или в корпоративных сетях.

Вместе с тем, ежедневно в отрасли геоинформационных технологий проявляется и используется

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 14-07-00040 и 14-07-00785).



все большее число географических данных. Высокая стоимость как создания и эксплуатации массивов геоданных, так и сбора собственно геоданных и их своевременного обновления, сопровождаемого необходимостью их согласования с уже существующими данными, обуславливает необходимость обеспечения возможности совместного и многократного использования геоинформационных ресурсов различными заинтересованными пользователями.

Обобщая сказанное, можно отметить, что геоинформационный контент в современных реалиях зачастую представляет собой сложную распределенную систему, включающую в себя совокупность множества источников геоданных и прикладных геоинформационных сервисов (в том числе облачных), создаваемых и эксплуатируемых различными организациями-операторами, каждая из которых, в свою очередь, может иметь собственные представления о способах организации геоданных и правилах их предоставления потребителям, использовать различные устройства для сбора геоданных.

Для обеспечения как самой возможности совместной работы, так и ее эффективности географическая информация должна быть рационально организована таким образом, чтобы любой пользователь, независимо от специфики решаемых задач или используемого им аппаратно-программного обеспечения, мог обратиться к тем или иным геоданным через эффективный и удобный метод запроса, чтобы быстро получить точную и исчерпывающую информацию по интересующему его вопросу [2].

При этом должна обеспечиваться возможность предоставления геоданных с различной степенью обобщения (генерализации) как в пространственном, так и в семантическом аспектах.

*Пространственный аспект* предполагает возможность представления геоданных (в частности, пространственного положения геообъектов) с различной степенью точности в пространствах различной размерности (2D, 3D), различных системах координат и проекциях.

*Семантический аспект* может предусматривать отбор и обобщение данных в различных смысловых категориях.

Все это обуславливает проблемы совместимости и сопоставимости геоданных различного происхождения.

Под *совместимостью* будем понимать принципиальную возможность совместного использования данных различного происхождения в том или ином информационном процессе.

Под *сопоставимостью* будем понимать соответствие данных из различных источников определенным требованиям, в частности, по точности, полноте, достоверности, актуальности и т. п. [3].

Проблема совместимости геоданных, или их интероперабельности, в последние годы является одной из актуальных тем исследований в области геоин-

формационных технологий [4, 5]. В некоторых работах [2] используется термин "функциональная совместимость", близкий по смыслу приведенному выше определению интероперабельности. В дальнейшем изложении будем пользоваться термином "интероперабельность" как более удобным.

Основополагающими предпосылками исследований в области обеспечения геоинтероперабельности являются [1]:

- переносимость структур геоданных в различные предметные области;
- использование открытого программного обеспечения;
- обеспечение возможности обогащения структур геоданных дополнительными семантическими характеристиками;
- обеспечение возможности автоматизированного формулирования логических выводов между семантическими описаниями;
- использование общепринятых и распространенных стандартов для обеспечения функциональной совместимости.

Актуальность проблемы обеспечения геоинтероперабельности проявляется наиболее наглядно в тех ситуациях, когда необходимо обеспечить взаимодействие геопорталов, использующих сервисы и приложения, в которых реализованы разные модели представления геоданных или синтаксис их описания и которые различаются методическими и функциональными подходами к обработке данных.

Сложность решения этой проблемы существенно возрастает, если модель представления данных или синтаксис ее описания имеет динамический аспект, т. е. изменяется во времени. В этом случае говорят об обеспечении свойства динамической геоинтероперабельности [6].

При ближайшем рассмотрении проблема интероперабельности распадается на ряд частных проблем как в плане представления геоданных в информационном процессе (протоколов передачи геоданных, моделей геоданных или форматов файлов и т. п.), так и в плане составляющих модели геоданных (пространственные, семантические, а также их топологические расширения).

Целью данной работы является исследование, в первую очередь, проблемы семантической интероперабельности геоданных относительно способов их организации. С этой целью в работе рассмотрен ряд традиционных моделей геоданных, на примере которых анализируются проблемы интероперабельности геоданных вообще и их семантической интероперабельности в частности.

### **Модели, методы и технологические схемы представления геоданных**

Пространственные данные устроены гораздо сложнее и разнообразнее традиционных видов деловой информации, поэтому проектирование храни-

лишь пространственных данных требует специальных компетенций из области географии, геодезии, картографии, наук о Земле и других областей естествознания.

Модели пространственной информации обычно объединяются в две большие группы: полевые и объектные [7]. Применительно к геоданным эти группы образуют соответственно классы "растровых" геоизображений и "векторных" моделей местности.

*Полевая модель* преобладает в сфере дистанционного сбора первичных данных о Земле. Получаемые в результате аэро- или космической съемки материалы представляют собой в основном растровые геоизображения; исключением можно считать разве что данные лазерного сканирования, представляемые в виде диффузного облака точек (MTD-модель).

Представление геопространства как непрерывного поля тех или иных свойств является наиболее естественным и простым, но в то же время такой подход затрудняет некоторые виды анализа и преобразования этих данных.

Для расширения возможностей анализа полевой модели и повышения эффективности ее обработки могут применяться квадротомическое, трихотомическое, гексатомическое, октотомическое представления, основанные на разделении пространства поля на отдельные участки/блоки, организованные в виде иерархической структуры [8].

Форматы растрового представления данных более или менее сопоставимы друг с другом, что обусловлено простотой растровой модели данных. Их многообразие объясняется, в значительной мере, различиями в способах описания метаданных, сопровождающих такое изображение<sup>1</sup>.

*Объектная модель* предполагает выделение (декомпозицию) в геопространстве отдельных объектов — структур, обладающих схожими комплексами качеств (классами); формальное описание качеств, их совокупность и образуемые ими структуры определяют модель данных того или иного класса объекта.

Такой подход предполагает наличие некоторой систематизированной совокупности моделей объектов различного рода, эта совокупность обычно называется концептуальной схемой, или онтологией. Классы объектов могут существовать независимо друг от друга или входить в структуру более сложных объектов (например, иерархическую). Существует множество различных онтологий, относящихся к различным областям знания, например, топографии, геологии, геоморфологии, инженерным задачам. При этом в каждой из областей могут использоваться различные альтернативные онтологии,

<sup>1</sup> Например, из почти 100 растровых форматов, поддерживаемых в ArcGIS, многие являются специфическими форматами для представления данных, получаемых различными спутниковыми съемочными системами.

имеющие свою область применения, специфику, степень конвенциональности и т. п.

Геообъект как объектная модель географических данных предполагает наличие двух категорий атрибутов: пространственных (координатных) и непространственных (смысловое описание объекта, представленное либо в текстовом виде, либо в виде его цифрового кода). Например, еловый лес в пространственном отношении определяется полигональным контуром своих границ, а непространственным атрибутом является характеристика древостоя со значением "ель".

Способы представления числовых или текстовых полей данных, а также состав и структура геообъекта в целом определяются задачами, которые будут решаться на его основе. В связи с этим среди векторных форматов геоданных наблюдается значительно большее разнообразие по сравнению с растровыми форматами.

Объектная модель существенно расширяет возможности анализа. Характерными прикладными применениями объектной модели являются задачи кадастрового учета земельных участков или построения графов транспортных сетей (например, дорог).

В контексте объектных моделей можно выделить еще один аспект — топологический, определяющий взаимосвязи между несколькими геообъектами. В данном аспекте также можно выделить пространственную и непространственную составляющие. Первая определяет взаимное пространственное расположение объектов, например, предыдущий/следующий участок дороги в маршруте как сегменты дорожного графа. Вторая отвечает за смысловую, семантическую взаимосвязь объектов, например, объединение всех лесных массивов в общий слой "леса". Топологические зависимости по своей природе могут быть пространственными, временными, функциональными, структурными и т. п.

Задача обеспечения преемственности геообъектов в пространственно-временном континууме обусловлена тем, что геообъект в общем случае имеет ограниченный по времени период своего существования.

Один из примеров: некоторый участок коренного леса был вырублен — превратился в район вырубki леса, затем распахан — превратился в сельхозугодие, которое, в свою очередь, было заброшено, на его месте появился кустарник или молодая поросль, которые впоследствии превратились в новый лес (но уже не коренной). В этом случае геообъект как определенная территория (скажем, землевладение) не менял своей пространственной локализации во времени, однако происходило изменение его сущности, т. е. семантической составляющей.

Другой пример: в определенный момент шахта была построена и введена в эксплуатацию, впоследствии была закрыта и, наконец, разрушилась и прекратила свое существование как геообъект.

Однако в результате проседания грунта на месте шахты образовалось озеро, т. е. возник другой геообъект. Таким образом, некоторая область местности (не определенная по своим границам) в различные периоды времени принадлежит различным геообъектам: различным как в семантическом плане, так и по своей пространственной конфигурации. При этом между этими объектами существует причинно-следственная связь, которая может быть отражена в базе геоданных.

Еще одной задачей топологии может быть обеспечение полимасштабного представления геообъектов, заключающееся в определении взаимосвязей между серией контуров, описывающих пространственную локализацию объекта с различной степенью детализации и предназначенных для использования в том или ином масштабе.

Любые данные, независимо от своей природы, должны в том или ином виде сопровождаться информацией, которая описывает сущность и свойства данных, хранящихся в базе данных или файлах, — метаданными. При отсутствии такой информации данные оказываются бессмысленными и, соответственно, бесполезными. Вместе с тем, метаданные — описание свойств конкретного информационного объекта, которое может отчуждаться от этого объекта [5].

Среди метаданных можно выделить две составляющие:

- метаданные, определяющие структуру модели данных и способы представления значений данных;
- метаданные, отражающие свойства предметной области, моделируемой данными.

Согласно стандарту ГОСТ Р 51353—99 [9] метаданные позволяют описывать содержание, объем, положение в пространстве, качество (точность, полноту, достоверность и современность) и другие характеристики.

Стандарт ISO 19115:2003 — Geographic information — Metadata определяет методологию формирования метаданных географической информации и содержит концептуальную модель метаданных [10]. Стандарт ISO 19139:2007, в свою очередь, определяет правила кодирования этой модели и ее реализацию в виде XML-схем [11]. Стандарт ISO 19115-2:2009 содержит расширения ISO 19115:2003 для описания сеточных данных, а также изображений, полученных от камер, инфракрасных и мультиспектральных сканеров, радаров и подобных устройств [12].

Согласно стандарту ISO 19115:2003 имеют место следующие определения:

- *метаданные* — это данные о данных;
- *элемент метаданных* — это дискретная единица метаданных, элемент метаданных должен быть уникален в пределах сущности метаданных, элемент эквивалентен понятию "атрибут" в терминологии UML;

- *сущность метаданных* — это набор элементов метаданных, описывающих один и тот же аспект данных; может включать в себя одну или несколько других сущностей метаданных, сущность эквивалентна понятию "класс" в терминологии UML;
- *раздел метаданных* — это подмножество метаданных, которое состоит из связанных (родственных) сущностей и элементов метаданных (это понятие эквивалентно понятию "пакет" в терминологии UML).

Другими словами, разделы метаданных представлены в виде UML-пакетов. Каждый пакет содержит одну или более сущностей (UML-классов). Сущности содержат элементы (UML-атрибуты и UML-ассоциации). Сущности могут являться дочерними или родительскими для других сущностей. На рис. 1 в качестве иллюстрации представлена диаграмма пакетов метаданных с отношениями между ними [13].

Стандарт ISO 19115:2003 также определяет ядро метаданных для географических данных — минимальное подмножество элементов метаданных, которое следует использовать при описании набора данных.

Элементы ядра метаданных требуются для идентификации набора данных и позволяют документировать следующие характеристики набора данных: тематику, формат, язык описания, местоположение, временной период, к которому относятся данные, контактную информацию лица, ответственного за данные.

Лишь часть элементов ядра является обязательной для заполнения, однако стандарт ISO 19115:2003 рекомендует использовать все элементы для достижения большей совместимости метаданных и для более полного понимания пользователями природы и содержания набора данных.

Стандарт ISO 19115:2003 определяет и другие структурные элементы модели данных:

- *модель* — это абстракция некоторых аспектов предметной области;
- *набор данных* — идентифицируемая совокупность данных, которая в частном случае может состоять из одного элемента;
- *тип данных* — совокупность характеристик, наличие которых у группы данных позволяет выделить эту группу из множества других данных. Примеры типов данных: Integer, Real, Boolean, String, Date, GMPoint;
- *структурированные данные* — данные, разделенные на элементы с однозначно трактуемой семантикой в соответствии с заранее известными синтаксическими правилами (соглашениями) [5];
- *схема данных* — стандартизованное машиночитаемое описание типового способа представления структурированных данных об определенной разновидности объектов (сущностей) или сово-

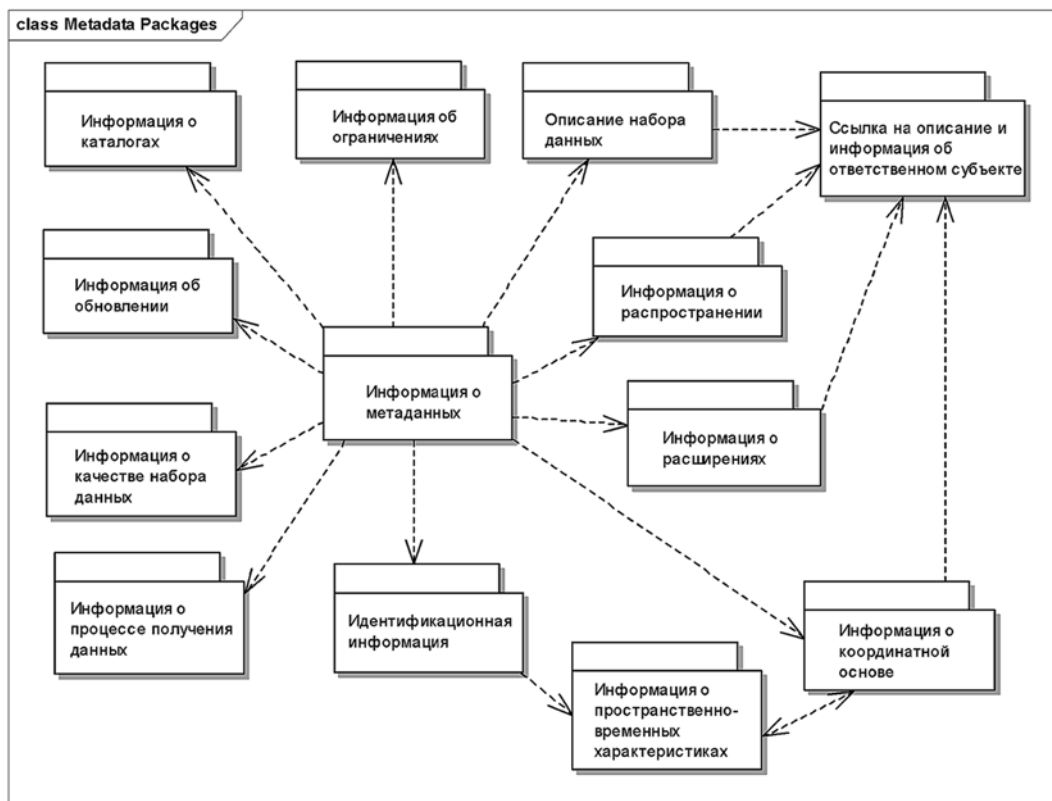


Рис. 1. Диаграмма пакетов метаданных

купности объектов и отношений между ними в определенной предметной области. Схема данных устанавливает формализованные требования к взаимному расположению и иерархии элементов данных, их кодировке, обозначениям, допустимым типам и значениям;

- *формат массивов данных* (файлов или БД) — набор синтаксических, структурных и логических правил кодирования и упорядочивания (организации) данных, обеспечивающих их корректное и эффективное восстановление в виде структуры, соответствующей определенной модели данных.

Формат данных может быть оптимизирован как под способы решения определенных задач (например, хранение "пирамиды" для визуализации изображения, использование особых моделей цвета типа СМΥΚ, разбиение изображения на блоки/полосы), так и под особенности обработки данных на различных аппаратно-программных платформах (например, LE/BE-последовательность байтов, выравнивание на границу слова и т. п.).

В форматах, предназначенных для архивного хранения или для передачи данных, могут быть заложены возможности выявления ошибок и восстановления данных в случае их повреждения, обычно реализуемые за счет избыточности.

Еще одной задачей, решаемой посредством так называемых обменных форматов, является обеспе-

чение возможности более или менее корректного и полного преобразования одной модели данных в другую, например, между различными приложениями — т. е. обеспечение интероперабельности.

### Особенности пространственного описания геоданных

Пространственное моделирование включает в себя два функциональных аспекта:

- аналитический — модель данных, описывающая пространственное положение и форму геообъекта в функциях пространственного анализа данных;
- графический — модель данных, обеспечивающая частную, но совершенно необходимую задачу отображения пространственной информации (на экране/принтере).

Как аналитические, так и графические построения в "векторной" графике основаны на аппроксимации контуров геообъектов между пространственно определенными узловыми точками (вершинами) с помощью тех или иных функциональных зависимостей, для этого обычно используются линейные функции или полиномы (полиномиальные функции, сплайны).

Число и взаимное расположение узловых точек определяются требованиями к точности модели, т. е. к допустимому расхождению между траекторией аппроксимирующей функции и положением ре-

альных контуров. Различные требования к точности контуров на реальном примере двух карт различного масштаба [14] иллюстрирует рис. 2 (см. третью сторону обложки).

Полилинейная аппроксимация является наиболее распространенным способом, что обусловлено ее единообразным и простым с точки зрения пространственного и топологического анализа представлением метрики геоинформационного контента в виде линейных сегментов. Недостатком этого метода является более значительный объем данных за счет большего числа узловых точек.

Полиномиальная (сплайновая) аппроксимация является методом, более емким в информационном отношении, но более сложным с точки зрения пространственного и топологического анализа. Например, здесь становится неоднозначным распространенный способ выявления смежности объектов по совпадению координат узловых точек соответствующих сегментов их общей границы.

В векторном моделировании пространственных объектов можно выделить два уровня: примитивы и собственно объекты, состоящие из примитивов. Для сложных или составных объектов роль примитивов могут играть более простые объекты.

Можно выделить следующие топологические классы пространственных моделей объектов:

- точечная, морфологическая локализация которой не имеет смысла ввиду малоразмерности объекта;
- ориентированная — по сути это точечная модель, для которой определена ориентация вдоль определенного направления;
- линейная (в том числе замкнутая), образуемая осевой линией объекта;
- площадная, образуемая граничной линией (контуром) объекта и описывающая разделяемые им внутреннюю и наружную области геопространства.

Моделирование поверхностей является более сложной задачей.

В векторном виде модель рельефа описывается как топологическая сеть на плоскости посредством различных способов:

- изолиниями: изогипсами (горизонтали) или изобатами. Изолинию можно представить как область пространства с высотами не ниже/выше высоты данной горизонтали. В частности, горизонталь образует область, снаружи которой высоты не могут превышать значение высоты горизонтали, а внутри, соответственно, быть ниже. Таким образом, возникает топологическая зависимость, накладывающая ограничения на соседство горизонталей с несоответствующими высотами. В практике картографии такая зависимость отражается так называемым бергштрихом, указывающим направление ската;
- структурными линиями (в этом числе ориграфические). Аналогично изолинии структурную

линию можно представить как область с определенным градиентом уклона местности;

- TIN (Triangle Irregular Model) — моделью рельефа, основанной на принципе аппроксимации поверхности посредством нерегулярной триангуляционной сети. Ее структурными элементами являются высотные точки (пикеты), между которыми назначаются треугольники, аппроксимируемые плоскостями. В триангуляционной модели качество аппроксимации зависит от плотности высотных точек (узлов триангуляционной сети) на определенном участке модели. На практике TIN в той или иной степени опирается на сеть структурных линий. Модель TIN допускает ее непосредственную визуализацию как поверхности (рендеринг). Существуют различные методы построения триангуляции, различающиеся способами представления и поиска необходимых узлов, ребер и треугольников [15].

Все три перечисленные выше способы теоретически инвариантны друг другу. Для передачи немасштабных особенностей рельефа используются линейные и точечные объекты.

Для моделирования поверхностей используются также полевые (регулярные) модели. Для моделирования рельефа как функции высоты от планового положения точки используется регулярная модель высот (Digital Elevation Model, DEM), которая в русскоязычной литературе соответствует понятию матрицы высот. Для моделирования непространственных свойств местности используются так называемые матрицы качеств. По своим основным свойствам они аналогичны другим растровым изображениям.

Основным недостатком регулярных моделей является громоздкость данных, здесь остро стоит проблема выбора между степенью детализации такой модели (размером ячейки) и объемом данных.

Подводя итоги, можно сказать, что основными препятствиями к обеспечению интероперабельности пространственных данных являются:

- преобразования в пространства более низкой размерности — обратное преобразование становится неполноценным;
- преобразования, связанные с понижением (загрублением) точности представления координат или с прореживанием узловых точек;
- нарушения, связанные с неполным соответствием исходной и конечной пространственных моделей. Например, если в одной модели порядок цифрования объекта не определен, то его перенос на модель, которая использует такой признак, чреват непредсказуемыми последствиями (например, озеро может превратиться в остров и т. п.) [16].

Что касается растровых изображений, то любое их преобразование, связанное с перепроектированием на новую сетку разбиения (геометрическое

трансформирование), связано с безвозвратными потерями исходной информации и, соответственно, снижением его информационных свойств.

### Основные аспекты интероперабельности

Геоинтероперабельность (англ. — Geointeroperability) — это способность к взаимодействию в геопространстве в широком смысле этого слова.

При более подробном рассмотрении проблемы интероперабельности можно выделить несколько ее аспектов, которые упоминаются в работах [4, 2]:

1. Свойство интероперабельности применительно к геоданным означает, что при решении задач обеспечивается возможность совместного использования геоданных из различных источников (баз геоданных) независимо от их происхождения, моделей для описания семантической и пространственной составляющих данных, синтаксических особенностей представления этих моделей и т. п. Решение проблемы интероперабельности данных реализуемо, например, посредством автоматизированного преобразования данных на основе обменных форматов геоданных или стандартизированных запросов к базам пространственных данных. Процесс преобразования должен быть прозрачным пользователям.

2. Аналогично можно определить функциональную интероперабельность программных модулей как возможность использования тех или иных стандартных методов и их программных реализаций (процедур/функций) для решения частных задач, возникающих в ходе решения основной задачи. Альтернативные процедуры, например, могут различаться методом получения одного и того же результата, способом оптимизации вычислительного процесса под конкретную аппаратно-программную платформу или другими особенностями. Такая возможность обеспечивается использованием парадигмы процедурной абстракции, основанной на стандартизации интерфейсов системных вызовов функций и программных модулей или стандартов удаленного вызова процедур. Необходимым условием для функциональной интероперабельности является обеспечение интероперабельности данных.

3. Наконец, можно определить интероперабельность геоинформационных систем (в частности, геопорталов) как возможность для решения той или иной прикладной геоинформационной задачи в сложной распределенной среде, с использованием как различных источников геоданных, так и различных инструментальных средств (программных реализаций методов обработки данных). Это дает пользователям свободу выбора платформы географической информационной системы в гетерогенной вычислительной среде.

Таким образом, решение проблемы интероперабельности в геоинформационных технологиях сосредотачивается на обеспечении обмена данными между геоинформационными системами с различ-

ной архитектурой и обеспечении возможности совместного использования как данных, так и функциональных методов их обработки.

В работе [2] также упоминаются два подхода к обеспечению интероперабельности, основанные на стандартизации спецификаций:

- способов представления и кодирования геоданных (стандартных форматов);
- интерфейсов методов доступа к геоданным и их функциональной обработки, главным образом через приложения, с помощью программных интерфейсов (API). В этом случае проще организовать сетевое взаимодействие, но, вместе с тем, у прямого доступа к глобальным сетевым данным могут быть некоторые проблемы, такие как безопасность, полные узкие места, юридические ограничения.

Принятие стандартов — важное средство для формирования и развития взаимодействующих геопространственных данных и служб. Деятельность на рынке геоинформационных услуг должна основываться на немногих согласованных и хорошо продуманных стандартах и действиях. В настоящее время многие международные организации работают над проблемой стандартизации, например, Консорциум открытой геопространственной информации (Open Geospatial Consortium, OGC) и Технический комитет международной организации по стандартизации 211 (ISO's Technical Committee 211. Geomatics, Geographic Information) [4]. Например, OGC имеет концепцию OGIS, которая включает в себя единую открытую модель геоданных, модель функционального взаимодействия и информационную модель группы [2]. В спецификациях OGC функциональная совместимость осуществлена применительно к C/S (клиент-серверной) модели.

Для успешного взаимодействия различных геоинформационных систем должны обеспечиваться [5]:

- аппаратная совместимость — соответствие размеров, уровней электрических сигналов, способов физической записи информации на машинный носитель и т. п.;
- коммуникационная совместимость — единство используемых протоколов, форматов служебных сообщений и иных средств, используемых для организации передачи данных и команд по каналам связи;
- совместимость моделей/форматов данных.

Оставляя за рамками вопросы аппаратной и коммуникационной совместимости, сосредоточимся на вопросах совместимости моделей данных.

При оценке функциональной совместимости тех или иных данных следует учитывать как совместимость моделей данных вообще, так и соответствие свойств того или иного источника<sup>2</sup> геоданных условиям решаемой задачи.

<sup>2</sup> А возможно, и свойств конкретного информационного объекта, например, набора данных/файла.

В плане совместимости моделей данных необходимо учитывать следующие аспекты:

- характер используемой модели данных (полевая/объектная), размерность модельного пространства и т. п.;
- способ сегментации геопространства на геообъекты, определяемый используемой объектной моделью предметной области (например, в разных моделях могут использоваться объекты типа "кварталы" и "улицы", их инвариантность будет определяться условиями конкретной задачи);
- структура модели геоданных, особенности топологического связывания элементов геопространства (в частности, моделей геообъектов), различия в способах описания модели (например, полилинейная или сплайновая модель пространственных данных);
- способы представления числовых и текстовых полей данных, определяемые требуемой конечной степенью детализации пространственной и семантической составляющих модели геоданных: точностью координат (или габаритными размерами моделируемого пространства — extent), а также используемыми системами семантических классификаций и способами их кодирования;
- гарантированная номенклатура и способы представления метаданных;
- синтаксические особенности массивов данных (определяемые форматом, например, кодировка данных, об этом речь будет идти ниже).

В плане оценки возможности использования для решения задачи того или иного источника геоданных (даже при условии совместимости моделей данных) необходимо учитывать:

- происхождение данных, ограничения на их использование и т. п.;
- конкретные особенности описания метрики или семантики, например, система координат, способ представления координат (в частности, в градусной/ радианной мере и т. п.);
- точность конкретного источника данных — даже использующие одинаковый тип данных (например, double) данные, поступающие из различных источников и с различных устройств измерения, могут существенно различаться действительной точностью координат. Это обстоятельство определяет пригодность данных для решения задачи. Вместе с тем, при решении задач в глобальном масштабе необходимо обеспечить закругление высокоточных координат до требуемого уровня (например, координат пунктов государственной геодезической сети при нанесении их на карту). Аналогичный подход применим и в практике засекречивания истинных координат важных объектов.

Различные приложения также могут предъявлять различные требования к степени детализации (разрешению) геоданных.

## **Семантические и синтаксические аспекты интероперабельности**

Одной из ключевых задач, связанных с обработкой данных вообще и геоданных в частности, является одинаковая и однозначная трактовка их сути, т. е. семантики.

В том случае, когда данные интерпретируются людьми, подобная проблема стоит не так остро, при ручном вводе оператор самостоятельно "разбирает" данные документа и без строгой формализации может определить, что является датой, что инициалами, а что, например, исходящим номером. Оператор может даже выявить и исправить ошибки в структуре и содержании заполненных бланков и форм [5].

В случае, когда данными обмениваются электронные автоматизированные системы (например, клиентское приложение и сервер геоданных или два геопортала между собой), однозначная интерпретация передаваемых данных становится уже необходимостью.

Синтаксис данных, как правило, не зависит от их смыслового содержания и диктуется только формальными правилами. И наоборот, семантически идентичные данные могут быть выражены с помощью различных синтаксисов.

Например, в текстовом виде может быть представлено как текстовое описание местности, так и "векторная" карта местности (в виде текстовой структуры, содержащей координаты узловых точек геообъектов, например, форматы TXF, SHP, KML и т. п.). Несмотря на принципиальное различие этих данных с точки зрения семантики их синтаксис будет одинаков — они используют одинаковые кодировку и способ разбиения на строки (различия, относящиеся к способам структурирования данных, в данном контексте не рассматриваем). Но на более высоком синтаксическом уровне возникают различия между упомянутыми выше форматами: в одних используется обычное представление текста, разделенного табуляторами и строками, в других используется более сложный синтаксис, например KML, основанный на синтаксисе XML.

Вместе с тем, "векторная" карта местности может быть представлена и в бинарном формате (например, SXF). Хотя синтаксис текстовых и бинарных файлов несопоставим, их семантика (смысловое наполнение данных) отличаться не будет, примером этого является дуплет TXF/SXF, используемый в продуктах КБ "Панорама" [17].

Наконец, карта местности может быть представлена в растровом графическом формате (например, TIFF), который несопоставим как с векторными бинарными данными (по семантике), так и с текстовыми форматами данных (как по семантике, так и по синтаксису). Но, вместе с тем, все эти данные объединяет общая сущность — все они являются графическим изображением некоторой местности.

Бинарный вариант файла занимает меньше места, чем текстовый, чтение/запись таких данных в разы быстрее. В свою очередь, текстовый вариант переносим на аппаратно-программную платформу с другим представлением чисел, при этом числа могут иметь произвольное число знаков.

Итого, на основании вышесказанного можно выделить следующие аспекты совместимости данных [5]:

- синтаксическая совместимость — использование одинаковых правил кодирования и разметки данных. Например, символы латинского алфавита в большинстве компьютерных систем задаются одними и теми же битовыми последовательностями в соответствии с кодовой таблицей ASCII, все служебные элементы (теги) веб-страницы в формате HTML заключены в угловые скобки, что позволяет отличить их от основного текста;
- семантическая совместимость — одинаковая смысловая трактовка элементов данных. Например, символ "М" в определенной позиции документа может означать и мужской пол, и единицу измерения длины (метр), и инициал имени.

Согласно [5] имеют место следующие определения:

- синтаксическая совместимость — способность информационных систем к взаимодействию благодаря единству представления и структуры данных;
- семантическая совместимость — способность информационных систем к взаимодействию благодаря единству интерпретации и классификации данных.

Семантическая интероперабельность геоданных заключается в обеспечении их пользователей средствами согласованного понимания семантической составляющей геоданных, полученных в результате обмена, а также в выявлении и исправлении тех ситуаций, когда имеет место несогласованное понимание [6].

Семантическая геоинтероперабельность принципиально отличается от синтаксической, так как в последнем случае речь идет только об обеспечении обмена и совместного использования геоданных потребителями на нескольких уровнях взаимодействия: сетевых протоколах передачи данных, вызовах удаленных процедур, унифицированных запросах к базам геоданных. Обеспечение синтаксической геоинтероперабельности является необходимым условием решения проблемы обеспечения семантической геоинтероперабельности.

### 5. Схемы преобразования (конвертации) форматов данных

Использование в процессе работы геоданных из ряда источников, использующих различные подходы к представлению данных и, соответственно, форматы данных, предполагает их автоматическое

или автоматизированное преобразование. Поэтому задача обеспечения межсистемного обмена данными предполагает существование определенной схемы преобразования форматов данных между собой.

В работе [2] упоминались три схемы преобразования (конвертации) форматов данных, которые имеет смысл рассмотреть более тщательно.

1. *Сетевая схема* — наиболее очевидный способ обеспечения преобразования данных, который заключается в создании процедур конвертации (трансляторов) для каждой из пар интероперабельных форматов (рис. 3). Таким образом, данные могут быть напрямую (и, соответственно, наиболее оптимальным образом) оттранслированы к другому формату.



Рис. 3. Сетевая схема преобразования форматов

Недостатком этого метода является то, что трансляторы необходимы между каждой парой форматов данных, что является весьма трудоемкой задачей: для  $N$  форматов необходимо создать до

$$K = \sum_{i=1}^N (N - i) \text{ парных процедур трансляции. На}$$

практике их число может быть значительно меньшим, поскольку для некоторых пар форматов обеспечение преобразования не требуется (и даже в принципе невозможно). Кроме того, для некоторых случаев достаточно преобразования в одну сторону, т. е. только для того, чтобы прочитать некоторый специфический формат, сохранять данные в него нет необходимости<sup>3</sup>.

Достоинством этой схемы является то, что добавление в нее нового формата практически не влияет на уже существующие элементы схемы, достаточно только обеспечить необходимые процедуры трансляции.

<sup>3</sup> В частности, форматы первичных данных, а также в случае, когда преобразование связано с невозможной утратой информации и обратное преобразование в принципе бессмысленно, например, преобразование двухмерных координат в трехмерные.



2. *Звездообразная схема* — этот подход заключается в использовании некоторого единого (унифицированного) формата данных, в этом случае преобразование происходит в два этапа: сначала данные из исходного специфического формата преобразуются в унифицированный, из которого затем выполняется преобразование в целевой специфический формат (рис. 4).



Рис. 4. Звездообразная схема преобразования форматов

Это позволяет значительно сократить теоретическое число пар трансляторов до  $K = N - 1$ , однако в данном случае возникает ряд проблем.

Единый формат должен быть достаточно сложным, чтобы нести в себе все важные особенности, присутствующие в специфических форматах. Если специфические особенности в унифицированном формате не предусмотрены, даже если исходный и целевой форматы их предполагают, то такое преобразование приведет к потерям, которые могут оказаться неприемлемыми. Таким образом, при разработке унифицированного формата необходимо

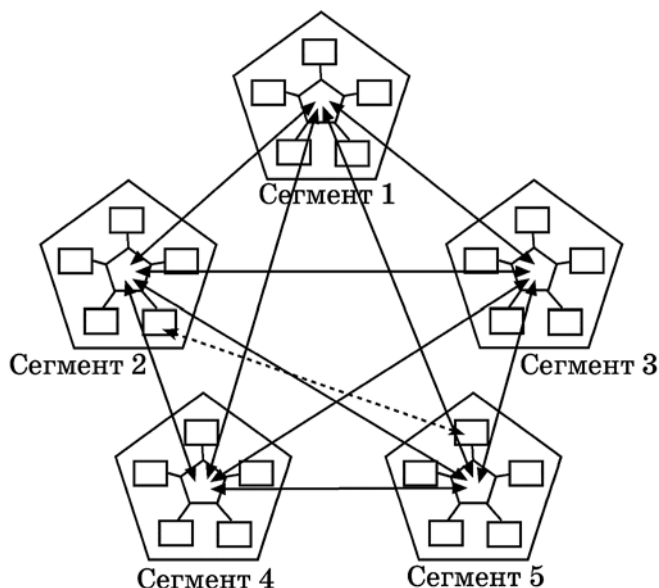


Рис. 5. Иерархическая схема преобразования форматов

сразу учесть все возможные случаи, которые могут возникнуть при эксплуатации такой схемы интероперабельности.

Это же обстоятельство обуславливает проблематичность расширения такой схемы.

Также следует иметь в виду, что многоступенчатое преобразование приводит к более низкой производительности.

3. *Многоуровневая иерархическая схема* преобразования (рис. 5) является разумным компромиссом между приведенными выше радикальными подходами.

В своих общих чертах она подобна сетевой схеме, однако каждый из узлов такой сети представляет собой не конкретный специфический формат, а некую достаточно автономную подсистему (сегмент). Подсистемы строятся уже по звездообразной схеме, т. е. обладают центральным узлом — локальным унифицированным форматом, относительно которого строится окружение из родственных специфических форматов. Аналогичный подход применим и на более локальных уровнях.

Другими словами, основу схемы представляет сеть относительно небольшого числа локальных унифицированных форматов, каждый из которых образует звездообразную схему для семейства родственных специфических форматов или же унифицированных форматов подсистем более низкого ранга.

Такая схема на глобальном уровне обеспечивает простоту и расширяемость сетевой схемы, а на локальных уровнях, где форматы уже более сопоставимы друг с другом, обеспечивает сокращение числа необходимых трансляторов.

В большинстве случаев выполняются преобразования форматов внутри локальной "звезды", так как она объединяет наиболее однородные (близкие по своей структуре и свойствам) форматы, конвертация между которыми сопряжена с наименьшими потерями.

Если необходимо преобразование между форматами из различных подсистем, то оно происходит через более глобальный формат. Последнее обстоятельство можно рассматривать в качестве недостатка такой схемы, так как в этом случае процесс преобразования может включать достаточно большое число этапов трансляции. Однако, если иметь в виду, что форматы, находящиеся в разных подсистемах, достаточно разнородны, то такие преобразования являются скорее исключением, чем правилом, поэтому для таких случаев могут быть предусмотрены специальные процедуры прямой трансляции (показана на рис. 5 штриховой линией).

Предназначением схемы преобразования форматов данных в структуре совместного использования различных источников геоданных является обеспечение возможности клиентскому приложению или серверу геоданных (в зависимости от того, на чьей стороне выполняется преобразование дан-

ных) получить четкие указания относительно того, какие процедуры конвертации и в какой последовательности должны быть проведены в процессе преобразования данных, получаемых или возвращаемых по запросу. Отсюда вытекает следствие, что такая схема должна носить характер стандарта обмена данными, по крайней мере, на межсистемном уровне.

### Заключение

Геоинформационные системы в современных реалиях зачастую представляют собой сложные распределенные системы (в том числе облачные), включающие в себя множества источников геоданных и прикладных геоинформационных сервисов, создаваемых и эксплуатируемых различными организациями-операторами, каждая из которых, в свою очередь, может иметь собственные представления о способах организации геоданных и правилах их предоставления потребителям, использовать различные устройства для сбора геоданных.

Вместе с тем, высокая стоимость как создания и эксплуатации хранилищ геоданных, так и сбора и своевременного обновления собственно геоданных, сопровождаемого необходимостью их согласования с уже существующими данными, обуславливает необходимость обеспечения возможности совместного и многократного использования геоинформационных ресурсов различными заинтересованными пользователями.

Для обеспечения как самой возможности совместной работы, так и ее эффективности геоинформационный контент должен быть рационально организован таким образом, чтобы любой пользователь, независимо от специфики решаемых задач или используемого им аппаратно-программного обеспечения, мог обратиться к тем или иным геоданным через эффективный и удобный метод запроса, чтобы быстро получить точную и исчерпывающую информацию по интересующему его вопросу. При этом должна обеспечиваться возможность предоставления геоданных с различной степенью обобщения (генерализации) как в пространственном, так и в семантическом аспектах.

Актуальность проблемы обеспечения геоинтероперабельности (определяемой как способность к взаимодействию в геопространстве) проявляется наиболее наглядно в тех ситуациях, когда необходимо обеспечить взаимодействие геопорталов, использующих сервисы и приложения, в которых реализованы разные модели представления геоданных или синтаксис их описания, а также различающихся методическими и функциональными подходами к обработке данных. Семантическая интероперабельность геоданных заключается в обеспечении их пользователей средствами согласованного понимания семантической составляющей геоданных,

полученных в результате обмена, а также выявлении и исправлении тех ситуаций, когда имеет место несогласованное понимание. В целях выработки подходов к решению проблемы интероперабельности в данной работе был рассмотрен ряд традиционных моделей геоданных.

Подводя итоги, можно сказать, что основными проблемами интероперабельности пространственных данных являются:

- преобразования между пространствами различной размерности;
- различные требования к точности представления координат, а также к точности аппроксимации контуров геообъектов;
- необратимые потери информации при перепроектировании растровых изображений, несоответствия между различными моделями данных (касающиеся пространственной, семантической и топологической составляющих, а также метаданных) и т. п. Вопрос интероперабельности данных должен решаться как на уровне модели данных, так и на уровнях источника данных (ресурса), а в ряде случаев — и конкретного набора данных.

Решение проблемы интероперабельности в геоинформационных технологиях сосредотачивается на обеспечении адекватного обмена данными между геоинформационными системами с различной архитектурой и обеспечении возможности совместного использования как данных, так и функциональных методов их обработки. Разработка и принятие стандартов является важным средством для формирования и развития взаимодействующих геопространственных данных и служб. Вместе с тем, задача обеспечения межсистемного обмена геоданными предполагает существование определенной схемы преобразования различных моделей и форматов данных между собой. Из трех рассмотренных в статье схем наиболее оптимальной представляется многоуровневая иерархическая схема преобразования, она обеспечивает гибкость и расширяемость (масштабируемость) на глобальном уровне и сокращение числа видов преобразований и процедур трансляции на локальных уровнях.

### Список литературы

1. **Lemmens R.** Semantic interoperability of distributed geoservices // Publications on Geodesy "63 Netherlands Geodetic Commission (NCG). — Rotterdam: Optima Graphic Communication, 2006. 312 p.
2. **Liu Q., Zhou L. Z., Chen J.** Data Models for Interoperability // Towards Digital Earth — Proceedings of the International Symposium on Digital Earth Beijing: Science Press, 1999. P. 1—6.
3. **Комков А. М., Николаев С. А., Шилов Н. И.** Составление и редактирование карт. М.: Изд-во ВИА, 1958. 248 с.
4. **Дулин С. К., Дулина Н. Г., Никишин Д. А.** О проблемах реализации семантической геоинтероперабельности в Semantic WEB // Системы и средства информатики. 2014. Вып. 24. № 2. С. 143—165.
5. **Интероперабельность** информационных систем. Сб. матер. (сост. М. Брауде-Золотарев). М.: INFO-FOSS.RU, 2008. 128 с.

6. **Zatsman I. M.** Pictorial Signs for Geoimages in Digital Libraries. URL: [http://www.researchgate.net/publication/257150374\\_Pictorial\\_Signs\\_for\\_Geoimages\\_in\\_Digital\\_Libraries](http://www.researchgate.net/publication/257150374_Pictorial_Signs_for_Geoimages_in_Digital_Libraries).

7. **Шекхар Ш., Чаула С.** Основы пространственных баз данных / Пер. с англ. М.: Кудлиц-Образ, 2004. 336 с.

8. **Берлянт А. М., Кошкарёв А. В., Серапинас Б. Б.** и др. Толковый словарь по геоинформатике. М.: ГИС-обозрение, 1998.

9. **ГОСТ Р 51353—99.** Геоинформационное картографирование. Метаданные электронных карт. Состав и содержание. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. 8 с.

10. **ISO 19115:2003.** Geographic information — Metadata.

11. **ISO 19139:2007.** Geographic information — Metadata — XML schema implementation.

12. **ISO 19115-2:2009.** Geographic information — Metadata. Part 2: Extensions for imagery and gridded data.

13. **Профиль** метаданных ЕБГД на основе стандартов ISO 19115, ISO 19115-2 и ISO 19139. М.: НИИТП, 2010. 135 с.

14. **Мартыненко А. И., Никишин А. Н., Никишин Д. А.** Единая географическая информационная система: проблемы и стратегии формирования // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2007. Т. 17. № 1. С. 355—390.

15. **Скворцов А. В., Мирза Н. С.** Алгоритмы построения и анализа триангуляции. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. 168 с.

16. **Формат** цифрового классификатора RSC и библиотеки условных знаков. М.: Панорама, 2009. 34 с.

17. **Открытый** формат цифровой информации о местности SXF. Редакция 4.0. Ногинск: Панорама, 2011. 39 с.

**S. K. Dulin**<sup>1, 3</sup>, Chief Researcher, e-mail: s.dulin@ccas.ru,

**N. G. Dulina**<sup>2</sup>, Senior Researcher, e-mail: ngdulina@mail.ru, **D. A. Nikishin**<sup>3</sup>, Head of Dextor

<sup>1</sup> Research & Design Institute for Information Technology,  
Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIAS)

<sup>2</sup> Dorochnyyn Computing Center, Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup> Institute of Informatics Problems, Russian Academy of Sciences

## Features of Models of Geodata and Methods of their Processing in Aspect of Maintenance Semantic Geointeroperability

*The Key problem of maintenance of semantic geointeroperability is creation of uniform conceptual model of representation of geodata on the basis of integration of the spatially-distributed information. Such model should be create on the basis of existing metaschemes of bases of geodata with the account multyfactority interactions of users and semantics which has been put in pawn in spatial ontologies and-or geothesauruses and qualifiers. Work is devoted research and the analysis of existing models and methods of representation of geodata and has for an object an estimation of relevance of existing structures geogiven to methods and approaches of maintenance of their semantic geointeroperability at the decision of problems of conceptual search of geodata. For the analysis those structures of geodata which combine in itself means of display of all three groups of the spatially-distributed information have been chosen: semantic, metric and topological. Various levels of representation of a geoinformation content which demand essentially various methods of processing are considered.*

**Keywords:** semantic geointeroperability, modelling of geodata, ontologies, conceptual search

### References

1. **Lemmens R.** Semantic interoperability of distributed geo-services. *Publications on Geodesy 63 Netherlands Geodetic Commission (NCG)*. Netherlands, Rotterdam: Optima Graphic Communication, 2006. 312 p.

2. **Liu Q., Zhou L. Z., Chen J.** Data Models for Interoperability. *Towards Digital Earth — Proceedings of the International Symposium on Digital Earth*. Beijing: Science Press, 1999.

3. **Komkov A. M., Nikolaev S. A., Shilov N. I.** *Sostavlenie i redaktirovanie kart*. М.: Изд-во VIA, 1958. 248 p.

4. **Dulin S. K., Dulina N. G., Nikishin D. A.** O problemah realizacii semanticheskoy geointeroperabel'nosti v Semantic WEB. *Sistemy i sredstva informatiki*. 2014. V. 24. N. 2. P. 143—165.

5. **Interoperabel'nost' informacionnyh sistem**. Sbornik materialov (sost. M. Braude-Zolotarev). М.: INFO-FOSS.RU, 2008. 128 p.

6. **Zatsman I. M.** Pictorial Signs for Geoimages in Digital Libraries. URL: [http://www.researchgate.net/publication/257150374\\_Pictorial\\_Signs\\_for\\_Geoimages\\_in\\_Digital\\_Libraries](http://www.researchgate.net/publication/257150374_Pictorial_Signs_for_Geoimages_in_Digital_Libraries).

7. **Shekhar S., Chaula S.** *Osnovy prostranstvennyh baz dannyh*. Пер. с англ. М.: Kудлиц-Образ, 2004. 336 p.

8. **Berljant A. M., Koshkarev A. V., Serapinas B. B.** i dr. *Tolkovyj slovar' po geoinformatike*. М.: GIS-obozrenie, 1998.

9. **ГОСТ Р 51353—99.** *Geoinformacionnoe kartografirovanie. Metadannye jelektronnyh kart. Sostav i sodержanie*. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. 8 p.

10. **ISO 19115:2003.** *Geographic information — Metadata*.

11. **ISO 19139:2007.** *Geographic information — Metadata — XML schema implementation*.

12. **ISO 19115-2:2009.** *Geographic information — Metadata. Part 2: Extensions for imagery and gridded data*.

13. **Profil' metadannyh EBGD na osnove standartov ISO 19115, ISO 19115-2 i ISO 19139**. М.: НИИТП, 2010. 135 p.

14. **Martynenko A. I., Nikishin A. N., Nikishin D. A.** Edinaja geograficheskaja informacionnaja sistema: problemy i strategii formirovanija. *Sistemy i sredstva informatiki*. М.: Наука, 2007. V. 17. P. 355—390.

15. **Skvorcov A. V., Mirza N. S.** *Algoritmy postroenijai analiza trianguljacii*. Tomsk: Изд-во ТГУ, 2006. 168 p.

16. **Format cifrovogo klassifikatora RSC i biblioteki uslovnyh znakov**. М.: Panorama, 2009. 34 p.

17. **Otkrytyj format cifrovoj informacii o mestnosti SXF. Redakcija 4.0**. Nогинск: Panorama, 2011. 39 p.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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

УДК 004:316.77-043.86

**В. В. Таран**, аспирант, e-mail: kingdom.of.culture@lenta.ru,  
Международный университет в Москве

### Информационно-коммуникационные технологии и их социально-экономическое и культурологическое влияние на инновационно-ориентированное развитие

*Рассматривается роль инноваций в обеспечении конкурентоспособности различных стран мира. Приводятся данные по рейтинговым позициям России в глобальном индексе конкурентоспособности и в фазах развития экономики. Обосновывается факт, что информационно-коммуникационные технологии являются базисом инновационного развития мировой цивилизации. Определено место России в рейтинге индексов сетевой готовности. Показаны преимущества и недостатки методологических подходов к оценке уровня развития информационно-коммуникационных технологий. Подчеркивается высокая значимость компьютерных наук, преодоления компьютерной неграмотности, необходимость развития Интернет-телевидения, в том числе с учетом соответствующего культурологического влияния. Сформулированы общие предложения по развитию информационно-коммуникационных технологий в России.*

**Ключевые слова:** конкурентоспособность, культурология, культурологическое влияние, глобальный индекс конкурентоспособности, фаза развития, технологический уклад, инновации, информационно-коммуникационные технологии, индекс сетевой готовности, информационное поле, Интернет-телевидение, компьютерные науки, компьютерная неграмотность

Современную эпоху развития цивилизации часто называют постиндустриальной. Ее отличительной особенностью является то, что экономический рост и повышение жизненного уровня во все возрастающем числе стран обеспечивается не за счет вовлечения в хозяйственный оборот все большего объема ресурсов и даже не благодаря совершенствованию управленческих решений, созданию оптимальной конкурентной среды и развитию технологий, обеспечивающих более эффективное потребление необходимых производственных ресурсов, а за счет разработки и широкого внедрения инноваций в различные сферы человеческой деятельности.

С экономической точки зрения инновации играют существенную роль в обеспечении конкурентоспособности стран мира [1]. Начиная с 2005 г. Мировой экономической форум (WEF) ежегодно публикует рейтинги стран мира по глобальному индексу конкурентоспособности (GCI). Помимо групп показателей инновационного развития он включает, в том числе, и группы показателей, которые отражают состояние институциональной и макроэкономической среды, состояние образования, здоровья населения, состояние рынка труда, технологическую готовность [2].

По оценкам на 2013—2014 гг. группа десяти наиболее конкурентоспособных стран мира включает относительно небольшие по населению, технологически развитые и социально-ориентированные страны Северной и Западной Европы (Швейцария, Финляндия, Швеция, Нидерланды), так называемые "восточноазиатские тигры" (Сингапур, Гонконг), но также и такие ведущие страны, как Германия, США, Япония и Великобритания.

Россия по уровню GCI занимает 64-е место. При этом весьма существенной причиной ее отставания является отставание в области инноваций и модернизаций (99-е место).

Несмотря на это, WEF весьма высоко оценивает позиции нашей страны с точки зрения фазы развития, в которой она находится. Следует отметить, что относительно фаз (стадий) развития (stage of development) или технологических укладов (как это принято в российской терминологии) единого мнения пока не выработано. Например, в работах российских ученых-экономистов (С. Г. Глазьев, 2010) с конца XVIII века выделяется шесть технологических укладов [3]. При этом предпоследний, пятый уклад завершился в 2010 г., и его ядром в основном являются информационно-коммуникационные

технологии и обслуживающие их отрасли, а также производство и переработка газа.

Современный, шестой технологический уклад, который будет продолжаться до 2050 г., базируется на различных направлениях нанотехнологий, в том числе ориентированных на совершенствование биотехнологий (нанобиотехнологии).

Вопрос содержания ядра каждого из двух последних технологических укладов является дискуссионным, однако, безусловно, следует согласиться с тем, что оба они базируются на инновационно-ориентированных направлениях деятельности.

WEF же в своих исследованиях делает упор не на историческую смену технологических укладов, связанную с экономическими циклами, а на различиях в степени влияния критериев, определяющих конкурентоспособность отдельных стран. При этом все обследуемые страны распределяются по пяти различным фазам развития. Три из них являются сформировавшимися.

В группе стран, находящихся в *первой фазе*, основной "двигатель" развития — факторный, при котором конкурентоспособность достигается в основном за счет развития институциональной базы, инфраструктуры, низкооплачиваемого труда, эксплуатации природных ресурсов, незначительной доли издержек на природоохранные мероприятия.

Во *второй фазе* находятся страны, более активно использующие факторы повышения эффективности для обеспечения конкурентоспособности, в том числе развитие высшего образования и повышение квалификации, доступность информационных технологий, развитие финансовых и товарных рынков.

Наконец, на *третьей фазе* развития находятся страны, конкурентоспособность которых уже весьма существенным образом (на 30 %, тогда как для первой фазы — только на 5 %, а для второй — на 10 %) определяется за счет использования инновационных факторов.

Среди них выделяются так называемые бизнес-инновации (нововведения в маркетинговой политике и в организации системы товародвижения) и собственно инновации, непосредственно относящиеся к производству товаров и услуг (технологические, интеллектуальное ноу-хау).

Кроме полностью сформировавшихся трех фаз развития, выделяют две промежуточные фазы, располагающиеся между первой и второй и между второй и третьей фазами развития.

Россия в оценках WEF находится на второй промежуточной фазе развития (число таких стран в 2013—2014 гг. составляет 22), приближаясь к группе развитых стран (37), ориентированных на инновационное развитие, и опережая большинство других страны с быстроразвивающейся экономикой, таких, например, как Индия, Китай, ЮАР и др. На данной фазе развития Россия находится вот уже три года подряд, однако для того, чтобы войти в

группу стран, конкурентоспособность которых определяется широким внедрением инноваций, предстоит сделать еще очень много.

Позиционирование России в данной переходной фазе, хотя и способствует укреплению ее международного авторитета, но в значительной мере авансировано. Прежде всего, в недостаточной степени задействованы или методически не учитываются некоторые ключевые факторы, характерные для первой и второй фаз развития. Например, это относится к развитию общей инфраструктуры экономики. Взять хотя бы транспортную ее составляющую, где имеется масса нерешенных проблем.

Другой пример — высокая энергоемкость и ресурсоемкость производства товаров и услуг в России. Показатель весьма важный для конкурентоспособности, но, к сожалению, не учитываемый в методике WEF.

По оценкам WEF для переходной фазы, в которой сегодня находится Россия, удельный вес инновационного фактора в обеспечении конкурентоспособности составляет от 10 до 30 %. Однако следует учитывать качественные аспекты данного фактора. Инновационные товары, технологии, оборудование в значительной степени являются импортными, в то время как удельный вес собственной инновационной продукции в структуре общего объема отгруженных товаров, выполненных работ, оказанных услуг в промышленном производстве в период 2005—2012 гг. увеличился незначительно: с 5,0 до 7,8 %. Удельный вес крупных и средних организаций промышленного производства, осуществлявших технологические инновации в России, при этом изменялся в пределах 9,3...9,9 %, а субъектов малого предпринимательства (2005—2011 гг.) — от 1,5 до 5,1 %.

Не менее серьезные проблемы связаны со структурой инноваций. В структуре затрат на технологические инновации в промышленном производстве в 2010—2012 гг. примерно от 55 до 61 % приходилось на приобретение готовых машин и оборудования, тогда как на прогрессивные направления, потенциально способствующие развитию собственной инновационной деятельности (такие, например, как приобретение программных средств, обучение и подготовка персонала, маркетинговые исследования), суммарно приходилось всего лишь 1,3...2,5 %.

В последние 20 лет базисом инновационного развития мировой цивилизации в отдельных наиболее передовых странах являлись информационные технологии (ИТ). В настоящее время, рассматривая данный процесс в инновационной плоскости, следует говорить уже об информационно-коммуникационных технологиях (ИКТ), поскольку с каждым годом все большее значение приобретает фактор интерактивности процесса.

По упрощенному определению ИКТ представляет собой совокупность технологий, обеспечи-

вающих мониторинг, сбор, обработку, накопление и передачу информации. Однако в действительности ИКТ — это не простой набор технологий, а сложная система, в структуру которой в обязательном порядке входят функции анализа и прогнозирования, а также обеспечивающая ее интеллектуальная инфраструктура, а именно: компьютерные науки (computer science) и образование в области компьютерных наук (education in computer science). Значение обеих составляющих интеллектуальной инфраструктуры трудно переоценить, поскольку и для нашей страны, и для всех других без исключения стран серьезнейшей проблемой является компьютерная неграмотность, что в конечном итоге существенно снижает эффективность инновационных процессов в экономике.

В процессе своего функционирования система ИКТ создает информационное поле, протяженность и сила которого в пространстве определяются обеспеченностью информационно-коммуникационными технологиями и соответствующей интеллектуальной инфраструктурой.

От силы и протяженности информационного поля зависят не только воспроизводственные процессы в самой системе ИКТ, но также эффективность развития других направлений инновационной деятельности, поскольку нанотехнологии, биотехнологии, спутниковые технологии, технологии, предусматривающие использование возобновляемых источников энергии, все они зависят напрямую от компьютеризации. Поэтому в перспективе основой всех фаз развития и технологических укладов будут являться ИКТ.

В дальнейшем по мере развития искусственного интеллекта их роль будет только усиливаться. Вопрос состоит лишь в том, что в конечном итоге будет доминировать искусственный интеллект на кремниевой основе (пока все ИКТ развиваются именно на базе кремниевых носителей) или на биологической основе.

Попытки измерить уровень развития ИКТ предпринимаются различными международными организациями. Наиболее комплексный подход демонстрирует тот же WEF, где по отдельным странам совместно со специалистами Европейского института управления бизнесом (Institut Européen d'Administration des Affaires, INSEAD) и французской бизнес-школы ежегодно рассчитывается индекс сетевой готовности (The Networked Readiness Index, NRI).

Индекс NRI учитывает более 50 показателей, сгруппированных в четыре критерия, в общем виде отражающих состояние внешней среды, в которой развиваются ИКТ, степень готовности к использованию ИКТ (доступность, инфраструктура), различные аспекты фактического их использования, а также оказываемое ими социально-экономическое влияние.

По последним доступным данным, в 2013 г. лидирующие позиции в области развития ИКТ занимали Финляндия, Сингапур, Швеция. Из ведущих развитых стран в первой десятке находятся Великобритания (7-е место) и США (9-е место) [4].

Наблюдается довольно высокая степень корреляции между позицией страны в рейтинге конкурентоспособности (индекс GCI) и рейтинге уровня развития ИКТ (индекс NRI). Так, в первой десятке стран в обоих рейтингах в семи из десяти случаев это одни и те же страны. Что касается России, то она занимает 54-е место, уступая всем ведущим развитым странам, но опережая такие быстро развивающиеся страны, как Индия, Китай и Бразилия.

То, что наша страна в рейтинге индекса NRI стоит на десять пунктов выше, чем в рейтинге индекса GCI, можно объяснить учетом некоторых важных показателей, по которым Россия традиционно занимает хорошие позиции, но которые непосредственно не связаны с развитием информационно-коммуникационных технологий (например, производство электроэнергии на душу населения, уровень грамотности взрослого населения).

Например, в 2012—2013 гг. Россия обошла Китай в рейтинге индекса NRI, в частности, благодаря быстрому росту общего числа пользователей Интернета и увеличению подписок на широкополосную сеть мобильной связи. Вместе с тем, в рейтинге индекса NRI не учитываются некоторые субкритерии и показатели, которые очень важны для повышения потенциала развития ИКТ, диверсификации его влияния, но в результате учета которых Россия, скорее всего, еще в большей степени будет отставать от развитых стран. К ним, в том числе, относится уже упоминавшаяся выше интеллектуальная инфраструктура системы ИКТ с соответствующими показателями, характеризующими состояние компьютерных наук (число соответствующих научно-исследовательских организаций, специалистов, научных публикаций, патентов на разработки), образования в области компьютерных наук (число вузов и кафедр по соответствующей проблематике, число подготовленных специалистов, доступ к повышению квалификации в области компьютерных наук).

Весьма существенное значение имеет также более объективный учет структурных особенностей системы ИКТ, отражающий изменения, происходящие в ней в результате научно-технического прогресса. В этой связи целесообразно, в частности, учитывать показатели развития и доступа населения к таким быстро развивающимся направлениям, как Интернет-телевидение, Интернет-радио, социальные сети, интранет.

Среди них наиболее существенное значение, безусловно, имеет Интернет-телевидение. Стимулом развития Интернет-телевидения стал стремительный рост обеспеченности доступа к высокоскоростной

стному и доступному Интернету. Сам способ передачи информации через Интернет-телевидение предоставляет возможности для реализации все новых и новых идей и в этом смысле является устойчивой сферой приложения инноваций. В потенциале Интернет-телевидение является одним из самых совершенных средств технического отражения действительности, жизнедеятельности общества в ее различных проявлениях, и, соответственно, оно является богатейшим источником информации. Кроме того, оно является очень удобным инструментом изучения общества и его развития.

Интернет-телевидение оказывает большое и важное влияние на формирование определенных потребностей у различных слоев общества и является зеркалом современной жизни человека. Интернет-телевидение благодаря своей интерактивности является одним из новейших коммуникативных инструментов в образовании и воспитании современного человека.

Содержанию Интернет-телевидения в нашей стране целесообразно придать образовательный вектор. Научно-образовательное Интернет-телевидение, являясь фактором инновационного развития, низкозатратно для большей части конечных потребителей, требует относительно меньших финансовых издержек для его владельцев, а стратегическое значение для будущего социально-экономического развития страны трудно переоценить [5]. Кроме того, учитывая пока недостаточную развитость данного направления, в большинстве зарубежных стран его реализация, безусловно, будет являться залогом повышения рейтинговых позиций нашей страны в сфере информационно-коммуникационных технологий, а значит, и в общем инновационном развитии.

Однако важен не только учет фактора диверсификации структуры ИКТ за счет Интернет-телевидения и других направлений, но и их влияние на общественное развитие.

В методике расчета индекса NRI важное значение имеет критерий оказываемого ими социального (в том числе влияние ИКТ на доступ к основным услугам, доступ к Интернету в школах, использование ИКТ и эффективность деятельности правительства) и экономического (в том числе влияние ИКТ на новые товары и услуги, влияние ИКТ на новые организационные модели, занятость в наукоемких отраслях) влияния. Однако и здесь некоторые показатели воздействия ИКТ нуждаются в корректировке. Так, в части социального влияния выделен показатель, отражающий доступ к Интернету только в школах, тогда как не менее важным показателем является доступ к нему в сельской местности, причем не только в органах местного управления и других организациях, но также и среди физических лиц.

В современном мире ИКТ оказывают более широкое влияние, чем то, которое описывается социальными и экономическими показателями в рамках методических подходов, предлагаемых при расчете индекса NRI. Информационное поле, генерируемое системой ИКТ, начинает неизбежно воздействовать на общество также и в культурологическом плане, поэтому целесообразно критерий влияния ИКТ дополнить соответствующим блоком, в котором соответствующее влияние будет учитываться через экспертные оценки, а также социологические опросы населения относительно культурного, образовательного и информационного влияния со стороны Интернет-телевидения, Интернет-радио, социальных сетей.

Учитывая то, что развитие ИКТ в долгосрочной перспективе является залогом развития и других ключевых инновационных направлений, а значит, и устойчивого развития цивилизации в целом, Россия свои стратегии развития должна строить исходя из этой парадигмы. Поскольку наша страна является активным членом международных организаций (таких как Мировой экономический форум, Международный союз электросвязи), разрабатывающих рейтинги развития ИКТ, следует разработать и представить в данные организации усовершенствованную методику подсчета соответствующих рейтингов на основе более объективных показателей, включающих, в том числе, уровень развития компьютерных наук, образования в области компьютерных наук, уровень развития Интернет-телевидения и его культурологического воздействия. Как минимум, также следует усилить содержание федеральных программных документов, прямо или косвенно направленных на развитие информационно-коммуникационных технологий в нашей стране. При этом должны быть внесены изменения и дополнения (в части развития Интернет-телевидения и Интернет-радио и оценки его воздействия на общество) в базовый программный документ, обеспечивающий развитие ИКТ — Государственную программу "Информационное общество (2011—2020 годы)".

Учитывая крайнюю серьезность проблемы компьютерной неграмотности в нашей стране, Федеральная целевая программа развития образования на 2011—2015 гг. должна быть усилена положениями, касающимися целевого финансирования мероприятий по преодолению данной проблемы на стадии среднего и высшего образования, а также в процессе переподготовки кадров в целях повышения их квалификации.

В заключение отметим, что в связи с принятием на высшем государственном уровне решения о прекращении финансирования фундаментальных и поисковых научных исследований за счет федеральных целевых программ, но в то же время принимаемая во внимание отсутствие единого подхода к

базовым научным понятиям в области компьютерных наук, их классификационное позиционирование в области наук об информации, а также существенное отставание нашей страны в области данного научного направления, целесообразно обеспечить приоритетное грантовое финансирование фундаментальных исследований в области компьютерных наук через Российский научный фонд.

#### Список литературы

1. **Статистика** инноваций в России. Федеральная служба государственной статистики. Презентация. Обновлено 23.09.2013. 39 с. URL: [www.gks.ru](http://www.gks.ru).

2. **The Global Competiveness Report 2013—2014**. Full Data Edition. Insight Report / Ed. By Schwab, X. Sala-i-Martin, World Economic Forum, Geneva, 2013. 569 p.

3. **Глазьев С. Ю.** Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. М.: Экономика, 2010. 287 с.

4. **The Global Information Technology Report 2013**. Growth And Jobs In A Hyberconnected World / Ed. by Bilbao-Osorio B., Dutta S., Lanvin B., World Economic Forum And INSEAD, Geneva, 2013. 409 p.

5. **Таран В. В.** Интернет-телевидение в системе российского образования и науки // Сб. матер. Международной научно-практической конференции, проведенной в Университете РАО при поддержке Посольства Швейцарской Конфедерации в Российской Федерации и Государственного секретариата по образованию, научным исследованиям и инновациям Швейцарии, Москва, 2013. С. 189—193.

V. V. Taran, Graduate Student, e-mail: [kingdom.of.culture@lenta.ru](mailto:kingdom.of.culture@lenta.ru), International University in Moscow

## Information and Communication Technologies and their Socioeconomic and Culturological Impact on the Innovation — Oriented Development

*The role of innovations in the secure of competitiveness of the various countries is considered. The Russia's ranking position in a global index of competitiveness and the stage of its economic development are determined. The key role of ICT in the innovative development of a world civilization are substantiated. The Russia's ranking place in the international Networked Readiness Indices is defined. The advantages and shortages of methodological approaches when estimating the development level of information and communication technologies are shown. The high importance computer science, the overcoming of computer illiteracy, necessity of the Internet TV development, including proper culturological impacts are emphasized. The general proposals for the development of information and communication technologies in Russia are formulated.*

**Keywords:** competitiveness, culturology, culturological impact, the global competitiveness index (GCI), stage of development, technological mode, innovations, Information And Communication Technologies (ICT), The Networked Readiness Index(NRI), information realm, Internet TV, computer science, computer illiteracy

#### References

1. **Statistika** innovacij v Rossii. *Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki*. Presentacija. Obnovleno 23.09.2013. 39 p. URL: [www.gks.ru](http://www.gks.ru).

2. **The Global Competiveness Report 2013—2014**. Full Data Edition. *Insight Report*. Ed. By Schwab, X. Sala-i-Martin, World Economic Forum, Geneva, 2013. 569 p.

3. **Glaz'ev S. Ju.** *Strategija operezhajushhego razvitiya Rossii v uslovijah global'nogo krizisa*. M.: Jekonomika, 2010. 287 p.

4. **The Global Information Technology Report 2013**. *Growth And Jobs In A Hyberconnected World*. Ed. by Bilbao-Osorio B., Dutta S., Lanvin B., World Economic Forum And INSEAD, Geneva, 2013. 409 p.

5. **Taran V. V.** Интернет-телевидение в системе российского образования и науки. *Sb. mater. mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, provedennoj v Universitete RAO pri podderzhke Posol'stva Shvejcarskoj Konfederacii v Rossijskoj Federacii i Gosudarstvennogo sekretariata po obrazovaniju, nauchnym issledovanijam i innovacijam Shvejcarii*, Moskva — 2013. P. 189—193.

---

#### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 30.12.2014. Подписано в печать 20.02.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT315. 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.