

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 21  
2015  
№ 4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

УЧРЕДИТЕЛЬ  
Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Мочалов И. А., Хрисат М. С., Шихаб Еддин М. Я. Нечеткие дифференциальные уравнения в задачах управления. Часть II . . . . . 243

### ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Белим С. В., Селиверстов С. А. Использование метода анализа иерархий для выявления импульсного шума в графических объектах . . . . . 251

Дворников С. В., Манаенко С. С., Дворников С. С. Параметрическая мимикрия сигналов, модулированных колебаниями и сформированных в различных функциональных базисах . . . . . 259

### БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

Барабанов А. В., Марков А. С., Цирлов В. Л. Оценка соответствия средств защиты информации "Общим критериям" . . . . . 264

### СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Струченков В. И. Новый алгоритм поэлементного расчета трасс в САПР линейных сооружений . . . . . 271

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

Мистров Л. Е. Метод синтеза стратегий управления конфликтной устойчивостью социально-экономических организаций . . . . . 277

Мамедова М. Г., Джабраилова З. Г., Мамедзаде Ф. Р. Методы управления согласованием спроса и предложения на рынке труда специалистов по информационным технологиям . . . . . 286

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Зак Ю. А. Вероятностные динамические модели анализа работы сборочных конвейерных линий . . . . . 296

### Журнал в журнале

### НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Гридин В. Н., Солодовников В. И., Евдокимов И. А. Нейросетевой алгоритм симметричного шифрования . . . . . 306

Кульчин Ю. Н., Ким А. Ю., Ноткин Б. С., Люхтер А. Б. Обработка сигналов распределенной волоконно-оптической сети для распознавания динамических образов с применением нейронных сетей . . . . . 312

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.  
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.  
ГАЛУШКИН А. И., д. т. н., проф.  
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.  
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.  
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.  
ПОЛЕЩУК О. М., д. 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.

# INFORMATION TECHNOLOGIES

## INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 21  
2015  
No. 4

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

### CONTENTS

#### INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Mochalov I. A., Khrisat M. S., Shihab Eddin M. Ya.** Fuzzy Differential Equations in Control. Part II . . . . . 243

#### DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Belim S. V., Seliverstov S. A.** Hierarchy Analysis Method as a Way to Detect Impulse Noise on Images . . . . . 251
- Dvornikov S. V., Manaenko S. S., Dvornikov S. S.** Parametric Mimicry Signals Modulated Oscillations Formed in Various Functional Basis. . . . . 259

#### CRYPTOSAFETY INFORMATION

- Barabanov A. V., Markov A. S., Tsirlov V. L.** The Conformity Assessment of Information Security Solutions According to the Common Criteria . . . . . 264

#### CAD-SYSTEMS

- Struchenkov V. I.** New Algorithm for Perelement Calculation of Line Structures Routes . . . . . 271

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

- Mistrov L. E.** Method of Synthesis of Strategy of Management of the Conflict Stability of the Social and Economic Organizations. . . . . 277
- Mammadova M. H., Jabrayilova Z. G., Mammadzada F. R.** Management Methodology of Demand and Supply Matching at the Labor Market of Information Technologies Specialists . . . . . 286

#### APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES

- Zack Yu. A.** Probabilistic Dynamic Models of the Analysis of Functioning of Assembly Conveyor Lines . . . . . 296

#### Journal-in-journal

#### NEUROTECHNOLOGIES

- Gridin V. N., Solodovnikov V. I., Evdokimov I. A.** Neural Network Algorithm for Symmetric Encryption . . . . . 306
- Kulchin Yu. N., Kim A. Yu., Notkin B. S., Lyuhter A. B.** Signal Processing of Distributed Fiber-Optic Measuring Network for Recognition of Dynamic Images Using Neural Networks . . . . . 312

#### Editor-in-Chief:

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

#### Deputy Editor-in-Chief:

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

#### Chairman:

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

#### Editorial Board Members:

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

**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 II\*

*Изложены основные положения нечетких вычислений и теории нечетких обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассмотрены различные типы решений и их взаимосвязь. Приведены разнообразные примеры решения нечетких дифференциальных уравнений первого порядка.*

**Ключевые слова:** нечеткие системы, нечеткие обыкновенные дифференциальные уравнения

### Введение

Широкое использование теории нечетких множеств при решении прикладных задач позволяет более полно учитывать различные возмущения в системе и создавать более адекватные модели и алгоритмы по сравнению с традиционным подходом. Особо следует выделить направление, связанное с нечеткими вычислениями, нечеткими линейными системами алгебраических уравнений, нечеткими дифференциальными уравнениями в частных производных и обыкновенного типов [1–3]. Это обусловлено тем, что в нечетком случае появляются новые свойства перечисленных объектов, что приводит к изменению традиционных свойств различных их приложений. Эти два обстоятельства, состоящие в наличии традиционных систем, и достижения в области теории нечетких множеств позволяют реализовывать алгоритмы решения задач управления, идентификации и другие, когда имеют место разнообразные модели возмущений, описываемые нечеткими терминами.

Ниже реализуются задачи по решению нечетких обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

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

\* Ч. I в журнале "Информационные технологии", Том 21, № 3, 2015.

### 1. Нечеткая начальная задача [2]

Нечеткая начальная задача рассматривается для производных типа  $\dot{y}_n^{PR}(x)$ ,  $\dot{y}_n^S(x)$ ,  $\dot{y}_n^{KFM}(x)$ . Для нечетких производных  $\dot{y}_n^{GV}(x)$ ,  $\dot{y}_n^{DP}(x)$  нечеткая начальная задача, как правило, не рассматривается. Это обусловлено тем, что возможна ситуация, когда эти производные для какого-то  $x = x_*$  не выражаются нечеткими числами (см. п. 1.2 (ii), Часть I), т. е. один из углов их функций принадлежности относительно основания больше  $90^\circ$ , и тогда эти производные не существуют. Для  $\dot{y}_n^{PR}(x)$ ,  $\dot{y}_n^S(x)$ ,  $\dot{y}_n^{KFM}(x)$  эти производные всегда существуют, так как в случае, отмеченном ранее, используются нечеткие "слабые" числа.

**1.1. Постановка задачи.** Пусть имеем четкое обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y, k); y(x = 0) = c = \text{const}, \quad (1.1)$$

где  $k = (k_1, \dots, k_n)$  — вектор констант;  $x \in I$  — некоторый промежуток (закрытый и ограниченный), который также содержит константу, равную нулю. Полагается, что  $f(\cdot)$  удовлетворяет условиям, когда (1.1) имеет единственное решение

$$y = g(x, k, c) \text{ для } x \in I \subset R_1, k \in K \subset R^n, c \in C \subset R_1.$$

Пусть  $I_1$  является промежутком для  $y$  и  $R = I \times I_1$  — область в  $R_2$ . Известны условия, при которых (1.1) имеет единственное решение:

- $k$  и  $c \in (0; c) = R$ ;
- $f$  — непрерывна в  $R$  для фиксированного и выбранного  $k$ ;
- $f_y$  — непрерывна в  $R$ .

Если эти условия выполняются, то  $y = g(x, k, c)$  является единственным решением для  $x \in I^*$ . Далее полагается, что  $g(\cdot)$  является непрерывной на  $I \times k \times c$ .

Константы  $k_i, c$  всегда являются неточно заданными (неопределенными). Пусть эта неопределенность моделируется посредством нечетких треугольных чисел (п. 1.2, Часть I) для  $k_i, c$  уравнения (1.1). Заменяем  $k_i \rightarrow k_{iH}, c \rightarrow c_H$ , где индекс "H" — символ нечеткости для треугольных чисел, тогда в результате получим:

$$\frac{dy_H}{dx} = f(x, y_H, k_H), y_H(x=0) = c_H, \quad (1.2)$$

где  $\dot{y}_H$  — некоторое определение производной для нечеткой функции  $y_H$  (см. 3.1, Часть I). Необходимо получить решение (1.2) относительно  $y_H(x)$ , которое для любого  $x$  является нечетким числом.

**1.2. Типы нечетких решений.** Рассмотрим (1.2) с использованием производных Сейккалы (см. 3.2, Часть I) —  $\dot{y}_H^S(x)$ , Пури—Ралеску (см. п. 3.4, Часть I) —  $\dot{y}_H^{PR}(x)$  и Кэндела—Фридмана—Минга (см. 3.5, Часть I) —  $\dot{y}_H^{KFMS}(x)$ . Для них решение соответствующих задач (1.2) обозначим:

(i)  $\hat{y}_H^{SS}(x)$  — решение Сейккалы (Seikkala solution-SS);

(ii)  $\hat{y}_H^{PRS}(x)$  — решение Пури—Ралеску (Puri-Ralescu solution-PRS);

(iii)  $\hat{y}_H^{KFMS}(x)$  — решение Кэндела—Фридмана—Минга (Kandel—Friedman—Ming solution—KFMS). Далее пусть существует  $\hat{y}_H^{SS}(x)$ , тогда также вводится нечеткое решение:

(iv)  $\hat{y}_H^{BFS}(x)$  — решение Баклей—Фейринга (BFS, Buckley—Feuring solution). Оно существует при выполнении следующих условий:

$$\dot{f}_i > 0; \dot{g}_c > 0, (\dot{f}_{k_i})(\dot{g}_{k_i}) > 0, i = \overline{1, n}, \quad (1.3)$$

где  $f$  — правая часть (1.1);  $g$  — решение (1.1);  $k_i$  — компоненты вектора  $k$ .

**1.3. Взаимосвязь нечетких решений.** Имеют место следующие теоремы (без доказательства).

**Теорема 1.1.** Если существует  $\hat{y}_H^{SS}(x)$ , то при выполнении (1.3) имеем:

$$\hat{y}_H^{BFS}(x) = \hat{y}_H^{SS}(x).$$

Если хотя бы одно из условий (1.3) не выполняется, то  $\hat{y}_H^{BFS}(x) \neq \hat{y}_H^{SS}(x)$  и  $\hat{y}_H^{BFS}(x)$  не существует.

**Теорема 1.2.** Если четкое обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\dot{y} = f(x, y, k); y(x=0) = c$$

имеет решение, то существует  $\hat{y}_H^{SS}(x)$  и из системы четких обыкновенных дифференциальных уравнений определяется

$$\begin{cases} \dot{\underline{y}}^S(x) = f(x, \underline{y}, \underline{k}); \\ \dot{\bar{y}}^S = f(x, \bar{y}, \bar{k}); \\ \underline{y}(y=0) = \underline{c}, \bar{y}(x=0) = \bar{c}, \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $k_H = (\underline{k}(r), \bar{k}(r)) | r \in [0; 1]$ ;  $c_H = (\underline{c}(r), \bar{c}(r)) | r \in [0; 1]$ ;  $y_H = (\underline{y}(x, r), \bar{y}(x, r)) | r \in [0; 1]$ .

**Теорема 1.3.** Если существует  $\hat{y}_H^{SS}(x)$ , то имеем:

$$\hat{y}_H^{PRS}(x) = \hat{y}_H^{SS}(x).$$

**Теорема 1.4.** Если существует  $\hat{y}_H^{SS}(x)$ , то имеем:

$$\hat{y}_H^{KFMS}(x) = \hat{y}_H^{SS}(x).$$

**1.4. Алгоритм решения нечеткой начальной задачи.**

Теоремы по п. 1.3 позволяют сформулировать следующий алгоритм решения нечеткой начальной задачи. Первоначально решается четкая начальная задача. Ее решение обозначается как  $y = g(x, k, c)$ . Для  $g(\cdot)$  и  $f(\cdot)$  правой части (1.1) проводится процедура фаззификации (fz) для четких параметров  $k, c$  и независимой переменной  $y(x)$ , т. е. четкие переменные заменяются на нечеткие:  $k \rightarrow k_H, c \rightarrow c_H, y \rightarrow y_H$ . В результате появляется нечеткая начальная задача (1.2). Для нее определяется существование BF решения (BFS) путем проверки условий (1.3). Если (1.3) выполняется, то BFS существует, поэтому оно существует для всех остальных решений  $y_H^{PRS}(x), y_H^{BFS}(x)$ . Решение BF находится из (1.1)  $y_H^{BFS}(x) = g(x, k, c, r), r \in [0; 1]$ , в котором после fz выделяются  $\min g(\cdot), \max g(\cdot)$ . Это дает BFS в виде

$$y_H^{BFS}(x) = \left( \frac{g(\cdot), \bar{g}(\cdot)}{\min g(\cdot) \max g(\cdot)} \right) | r \in [0; 1].$$

Если же хотя бы одно из условий (1.3) не выполняется, то BFS не существует, поэтому ищется S-решение (SS), т. е.  $y_H^{SS}(x)$  находится из системы (1.4).

При существовании  $y_H^{SS}(x)$  существуют  $y_H^{PRS}(x), y_H^{KFMS}(x)$ . Если же  $y_H^{SS}(x)$  не существует, то не существует решение (1.2). Таким образом, первоначально находится BF-решение, если же оно не существует, то ищется S-решение, которое является более общим, чем BF-решение.

Результаты, приведенные в разделе 1, позволяют сделать следующие выводы:

- нечеткая начальная задача имеет два типа решений: BFS (Buckley-Feuring solution) и SS (Seikkala solution). Между ними имеется следующая взаимосвязь:

$$BFS \Rightarrow SS; SS \not\Rightarrow BFS \Rightarrow \Rightarrow BFS \Leftrightarrow SS;$$

- достаточное условие  $\exists$  BFS состоит в выполнении (1.3), которые эквиваленты условиям одновременно возрастания (убывания)  $g(\cdot), f(\cdot)$  относительно параметров.

Здесь символ  $\exists$  — квантор "существования",  $\bar{\exists}$  — отрицание  $\exists$ .

## 2. Примеры решения нечетких дифференциальных уравнений первого порядка [2, 3]

В общем виде задача формулируется следующим образом. Имеется четкая начальная задача. Необходимо сформулировать нечеткую начальную задачу и исследовать типы решений. Ниже на основании типовых примеров решения четких начальных задач формулируются соответствующие их нечеткие аналоги и для них находятся различные типы нечетких решений, рассмотренные в разделе 1.

**2.1. Нечеткие уравнения с разделяющимися переменными.** Такими уравнениями будем называть уравнения, в которых зависимая и независимые переменные разделяются относительно знака равенства между ними с помощью элементарных преобразований. Для простоты полагаем, что производная, входящая в уравнение, имеет первый порядок.

**Пример 1.** Имеем четкую начальную задачу:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(x, y, k) = ky(x); \\ y(x=0) &= c; \quad k, c = \text{const.} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Необходимо сформулировать нечеткую начальную задачу и затем для нее исследовать типы решения.

**Случай 1** ( $k > 0, c \geq 0$ ). Задача (2.1) имеет решение  $y = g(x, k, c) = c \cdot e^{kx}; k > 0$ .

Проверяем условие (1.3) существования BFS:

$$\begin{aligned} \dot{f}_y &= k > 0; \quad \dot{g}_c = e^{kx} > 0; \quad \dot{g}_k = ce^{kx} > 0 \quad (x > 0); \\ \dot{f}_k &= ce^{kx} > 0 \Rightarrow \dot{g}_k \dot{f}_k > 0. \end{aligned}$$

Таким образом, условия (1.3) выполнены, поэтому  $\hat{y}_H^{BFS}(x)$  существует и для него справедлива нечеткая начальная задача, которая получается при фазификации ( $k \rightarrow k_H, c \rightarrow c_H, y \rightarrow y_H$ ) из (2.1):

$$\begin{cases} \dot{y}_H(x) = k_H y_H(x); \\ y_H(x=0) = c_H. \end{cases} \quad (2.2)$$

Пусть  $k_H, c_H$  являются нечеткими треугольными числами  $k_H = (k_1|k_2|k_3), k_1 > 0; c_H = (c_1|c_2|c_3), c_1 \geq 0$  (рис. 2.1, а, б) или с использованием обратных отображений в уровневой форме  $k_H = (\underline{k}(r), \bar{k}(r)|r \in [0, 1])$ ;  $c_H = (\underline{c}(r), \bar{c}(r)|r \in [0, 1])$ , тогда BFS задачи (2.2) будет равно

$$\begin{aligned} \hat{y}_H^{BFS}(x) &= (\min_r \underline{y}(r), \max_r \bar{y}(r)|r \in [0, 1]) = \\ &= (\underline{c}(r)e^{k(r),x}, \bar{c}(r)e^{\bar{k}(r),x}|r \in [0, 1])). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Нетрудно показать, что  $\hat{y}_H^{BFS}(x)$  по (2.3) является решением (1.2). Из (1.3) следует, что:

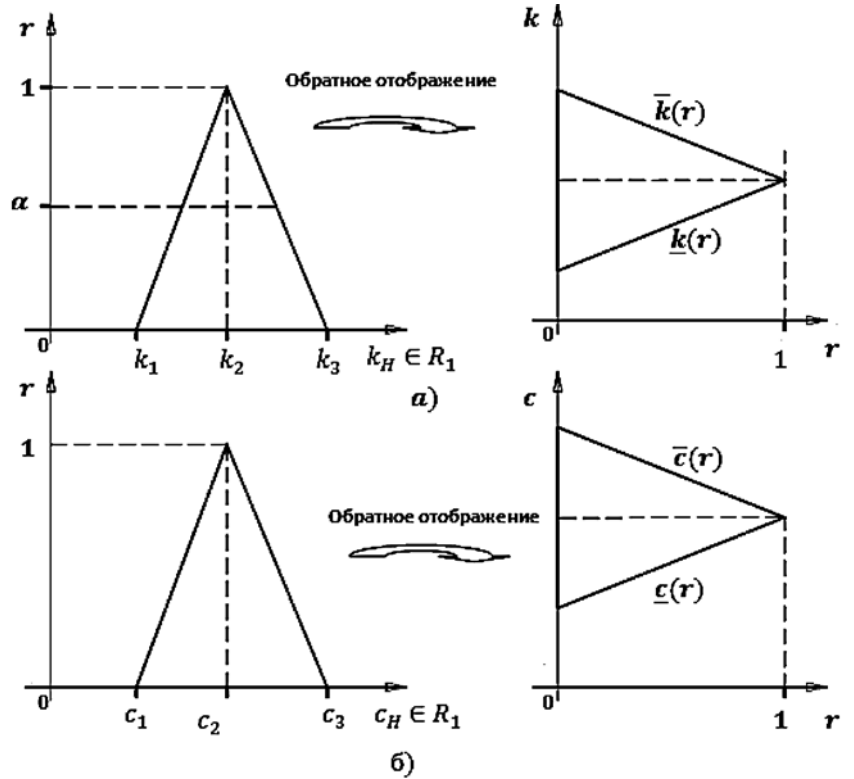


Рис. 2.1. Функции принадлежности нечетких треугольных чисел  $k_H = (k_1|k_2|k_3)$  – (а) и  $c_H = (c_1|c_2|c_3)$  – (б)

$$\hat{y}_H^{BFS}(x, r=0) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty; \quad \hat{y}_H^{BFS}(x, r=1) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty;$$

$\underline{y}(x, r=1) - \bar{y}(x, r=1) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty$ , поэтому  $\text{supp} \hat{y}_H^{BFS}(x)$  в асимптотике становится значительных размеров.

**Случай 2** ( $k < 0, c \geq 0$ ). Имеем:  $k_H = (k_1|k_2|k_3), k_1 < 0; c_H = (c_1|c_2|c_3), c_1 \geq 0$ , тогда, как и ранее (случай 1), получим  $y = ce^{kx}, k < 0$ .

Условие (1.3) существования BFS не выполняется, так как  $\dot{f}_y = k < 0$ , поэтому оно для (2.2) не существует. В этих условиях ищем SS для (2.2). Так как  $k < 0$ , то согласно свойствам арифметических операций в банаховом пространстве  $X$  нечетких переменных для  $x_{iH} \in X$  имеем (см. п. 2.3, Часть I):

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

Это означает, что для нахождения SS имеем

$$\begin{aligned} &\begin{cases} \dot{y}_H(x) = k_H y_H(x) \\ y_H(x=0) = c_H \end{cases} \xleftrightarrow{k_H < 0} \\ &\xleftrightarrow{k_H < 0} \begin{cases} \dot{y}(x, r) = \underline{k}\bar{y}(x, r), \underline{y}(x=0, r) = \underline{c}(r) \\ \dot{\bar{y}}(x, r) = \bar{k}\underline{y}(x, r), \bar{y}(x=0, r) = \bar{c}(r) \end{cases} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} \dot{Y}(x, r) = A Y(x, r) \\ Y(x=0, r) = c(r) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $Y(x, r) = (\bar{y}(x, r), \underline{y}(x, r))^T$ ;  $c(r) = (\underline{c}(r), \bar{c}(r))^T$ ,  
 $A = \begin{pmatrix} 0 & \underline{k}(r) \\ \bar{k}(r) & 0 \end{pmatrix}$ .

Решаем матричное дифференциальное уравнение (2.4) стандартным способом. Из характеристического уравнения  $\det(A - \lambda I) = 0$  имеем:

$$\det \begin{pmatrix} -\lambda & \underline{k}(r) \\ \bar{k}(r) & -\lambda \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow \lambda^2 - \underline{k}(r)\bar{k}(r) = 0 \Rightarrow \lambda_1 =$$

$$= \underbrace{[\underline{k}(r)\bar{k}(r)]^{1/2}}_{\lambda}; \lambda_2 = -\lambda.$$

Корни  $\lambda_1, \lambda_2$  характеристического уравнения действительные и различные, поэтому общее решение для (2.4) равно:

$$\underline{y}(x, r) = a_{11}e^{\lambda x} + a_{12}e^{-\lambda x}, \underline{y}(x=0, r) = \underline{c}(r);$$

$$\bar{y}(x, r) = a_{21}e^{\lambda x} + a_{22}e^{-\lambda x}, \bar{y}(x=0, r) = \bar{c}(r).$$

Всего имеем четыре неизвестных и два начальных условия  $\underline{c}(r), \bar{c}(r)$ , поэтому необходимо найти соотношения между  $a_{ij}$ . Для этого  $\underline{y}(\cdot), \bar{y}(\cdot)$  подставляем, например, в первое уравнение системы (2.4):

$$\frac{a_{11}\lambda e^{\lambda x} + a_{12}(-\lambda)e^{-\lambda x}}{\dot{\underline{y}}(\cdot)} = \frac{k(a_{21}e^{\lambda x} + a_{22}e^{-\lambda x})}{\dot{\bar{y}}(\cdot)},$$

откуда, приравнявая коэффициенты при  $e^{\lambda x}$  и  $e^{-\lambda x}$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}\lambda &= \underline{k}a_{21}; \\ -a_{12}\lambda &= \underline{k}a_{22}; \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \left. \begin{aligned} a_{11} &= (\underline{k}\lambda^{-1})a_{21}; \\ -a_{12} &= -(\underline{k}\lambda^{-1})a_{22}. \end{aligned} \right\}$$

Для нахождения  $a_{ij}$  имеем систему:

$$\left. \begin{aligned} \underline{y}(x=0, r) &= a_{11}e^{\lambda 0} + a_{12}e^{-\lambda 0} = \underline{c}(r) \\ \bar{y}(x=0, r) &= a_{21}e^{\lambda 0} + a_{22}e^{-\lambda 0} = \bar{c}(r) \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= (\underline{k}\lambda^{-1})a_{21}, a_{12} = -(\underline{k}\lambda^{-1})a_{22} \\ a_{11}^*(r) &= 0,5[\underline{c}(r) + \lambda\bar{c}(r)]; \\ a_{12}^*(r) &= 0,5[\underline{c}(r) - \lambda\bar{c}(r)]; \\ \Rightarrow a_{21}^*(r) &= 0,5\underline{c}(r)/(\lambda + \bar{c}(r)); \\ a_{22}^*(r) &= \frac{0,5\underline{c}(r)}{(\lambda - \bar{c}(r))}; \lambda = [\underline{k}(r)\bar{k}(r)]^{1/2}. \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, нечеткое  $SS$  для (2.4) будет равно:

$$\hat{y}_H^{SS} = (a_{11}^*(r)e^{\lambda x} + a_{12}^*(r)e^{-\lambda x}, a_{21}^*(r)e^{\lambda x} +$$

$$+ a_{22}^*(r)e^{-\lambda x})|_{r \in [0, 1]},$$

где  $a_{ij}^*(r), \lambda$  были определены ранее.

**Пример 2.** Имеем четкую начальную задачу:

$$\begin{cases} \dot{y}(x) = f(x, y, k) = y + kx, x > 0; \\ y(x=0) = c; k, c = \text{const.} \end{cases} \quad (2.5)$$

Необходимо сформулировать нечеткую начальную задачу и затем для нее определить тип решения.

Пусть первоначально  $k > 0, c \geq 0$ , тогда (2.5) при использовании замены  $z = y + kx$  имеет решение:

$$y = g(x, k, c) = (k + c)e^x - k(x + 1). \quad (2.6)$$

Проверяем условия (1.3) существования  $BFS$ -решения:

$$\dot{f}_y = (y + kx)'_y = 1 > 0;$$

$$\dot{g}_c = [(k + c)e^x - k(x + 1)]'_c = e^x > 0;$$

$$\dot{f}_k = (y + kx)'_k = x > 0;$$

$$\dot{g}_k = [(k + c)e^x - k(x + 1)]'_k = e^x - (x + 1)|_{x \approx 0} \approx$$

$$\approx 1 + x + 0,5x^2 - x - 1 = 0,5x^2 > 0;$$

$$\dot{f}_k \dot{g}_k \approx x(0,5x^2) > 0.$$

Таким образом, условия (1.3) выполнены и не зависят от  $k, c$ , поэтому  $SS, BFS$  существуют для  $k < \infty, -\infty < c < \infty$  и  $BFS$  находится из нечеткой начальной задачи, которая следует из (2.5) в результате процедуры fz:

$$\begin{cases} \dot{y}_H(x) = y_H(x) + k_H x; \\ y_H(x=0) = c_H. \end{cases} \quad (2.7)$$

Пусть  $k_H, c_H$  являются нечеткими треугольными числами  $k_H = (k_1|k_2|k_3); c_H = (c_1|c_2|c_3), c_1 \geq 0$  (рис. 2.1, а, б), тогда  $BFS$  для (2.7) равно:  $\hat{y}_H^{BFS}(x) = (\min_r \underline{y}(x, r), \max_r \bar{y}(x, r))|_{r \in [0, 1]}$ .

Находим  $\min_r \underline{y}(x, r), \max_r \bar{y}(x, r)$ . Из (2.2) имеем при  $k = k_H, c = c_H$ :

$$y_H(x) = (k_H + c_H)e^x - k_H(x + 1);$$

$$\min_r y_H(x, r) = [\underline{k}(r) + \underline{c}(r)]e^x - \bar{k}(r)(x + 1);$$

$$\max_r y_H|_{\bar{y}(x)} = [\bar{k}(r) + \bar{c}(r)]e^x - \underline{k}(r)(x + 1).$$

Таким образом,  $BFS$  для (2.3) равно ( $x > 0$ ):

$$\hat{y}_H^{BFS}(x) = ([\underline{k}(r) + \underline{c}(r)]e^x - \bar{k}(r)(x + 1),$$

$$[\bar{k}(r) + \bar{c}(r)]e^x - \underline{k}(r)(x + 1))|_{r \in [0, 1]}. \quad (2.8)$$

Из (2.8) имеем следующую асимптотику:

$$r = 0 \Rightarrow \hat{y}_H^{BFS}(x) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty; r = 1 \Rightarrow \hat{y}_H^{BFS}(x) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty;$$

$$r = 1 \Rightarrow \underline{y}(x, r=1) - \bar{y}(x, r=1) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty,$$

т. е.  $\text{supp} \hat{y}_H^{BFS}(x)$  в асимптотике имеет значительные размеры.

Заметим, что аналогичным способом решается и исследуется дифференциальное уравнение  $\dot{y}(x) = f(k_1x + k_2y)$ , которое может быть сведено к урав-

нению с разделяющимися переменными путем использования замены

$$z = k_1x + k_2y.$$

**2.2. Нечеткие однородные уравнения.** Они могут быть представлены в виде  $\dot{y}(x) = f(yx^{-1})$  или  $M(x, y)dx + N(x, y)dy = 0$ , где  $M(\cdot)$ ,  $N(\cdot)$  — однородные функции одинаковой степени  $n$ , т. е.  $M(ax, ay) \equiv a^n M(x, y)$ ,  $N(ax, ay) \equiv a^n N(x, y)$ . Для решения используется замена  $y = zx$ , после чего получается уравнение с разделяющимися переменными.

**Пример 3.** Имеем четкую начальную задачу:

$$\begin{cases} \dot{y} = f(x, y, k) = k(1 + y \cdot x^{-1}), x > 0, k \neq 1; \\ y(x = t) = c, t > 0, c > 0; k, c = \text{const}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Необходимо сформулировать нечеткую начальную задачу и определить тип решения. Имеем однородное уравнение, сделаем замену переменных  $y = xz$ , тогда решение для (2.9) будет равно:

$$y(x) = g(x, k, c) = c(x \cdot t)^k + kt^{-(k+1)} - k(k-1)^{-1}x. \quad (2.10)$$

Проверяем условия (1.3) существования BFS:

$$\begin{aligned} \dot{f}_y &= \frac{\partial}{\partial y} (k(1 + yx^{-1})) = kx^{-1} \Big|_{\substack{k > 0 \\ x > 0}} > 0; \\ \dot{f}_k &= \frac{\partial}{\partial k} (k(1 + yx^{-1})) = 1 + yx^{-1} \Big|_{\substack{y > 0 \\ x > 0}} > 0; \\ \dot{g}_c &= \frac{\partial}{\partial c} (c(xt)^k + kt^{-(k+1)} - k(k-1)^{-1}x) = \\ &= xt^k \Big|_{\substack{k > 0 \\ x > 0 \\ t > 0}} > 0; \\ \dot{g}_k &= \frac{\partial}{\partial k} (c(xt)^k \pm kt^{-(k+1)} - k(k-1)^{-1}x) = \\ &= c(xt)^k \ln(xt) \Big|_{xt > 1} + (t^{-(k+1)}) + \\ &+ kt^{-(k+1)} \ln t \Big|_{\substack{k > 0 \\ t > 1}} + x(k-1)^{-2} > 0; \\ \dot{f}_k \dot{g}_k &> 0. \end{aligned}$$

Условия (1.3) выполнены, поэтому BFS существует. Таким образом, BFS находится из нечеткой начальной задачи, получаемой из (2.9) после процедуры fz:

$$\begin{cases} y_H = k_H(1 + yx^{-1}); \\ y_H(x = t) = c_H, \end{cases} \quad (2.11)$$

где  $k_H, c_H$  являются нечеткими треугольными числами  $k_H = (k_1|k_2|k_3)$ ;  $c_H = (c_1|c_2|c_3)$ ,  $c_1 \geq 0$  (рис. 2.1, а, б). Тогда BFS для (2.11) получается из (2.10) после вычисления  $\min_r y(r)$ ,  $\max_r \bar{y}(r)$ :

$$\hat{y}_H^{BFS}(x) = (\min_r y(\cdot), \max_r \bar{y}(\cdot) | r \in [0,1]),$$

где

$$\min_r y = \underline{c}(r)(xt)^{\underline{k}(r)} + \underline{k}(r)t^{-\underline{k}(r)+1} - \underline{k}(r)(\underline{k}(r)-1)^{-1}x;$$

$$\max_r \bar{y} = \bar{c}(r)(xt)^{\bar{k}(r)} + \bar{k}(r)t^{-\bar{k}(r)+1} - \bar{k}(r)(\bar{k}(r)-1)^{-1}x.$$

Нетрудно показать, что в асимптотике  $\sup \hat{y}^{BFS}(x)$  имеет значительные размеры. Заметим, что уравнение типа  $\dot{y} = f((a_1x + b_1y + c_1)(ax + by + c)^{-1})$  может быть сведено к однородному путем соответствующего преобразования системы координат  $(x, y)$ .

**2.3. Нечеткие линейные уравнения с постоянными коэффициентами первого порядка.** Эти уравнения имеют вид уравнения линейной зависимости относительно независимой переменной и ее производной. Подобные уравнения, например, возникают в системах автоматической оптимизации (САО) с запоминанием экстремума инерционными объектами с нечеткими динамическими параметрами [8].

**Пример 4. Случай 1** ( $k_1 < 0, k_2 > 0, c \geq 0$ ). Имеем (2.1) в виде

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = f(x, y, k) = -k_1y + k_2; \\ y(x = 0) = c, \end{cases} \quad (2.12)$$

где  $k_1 < 0, k_2 > 0, c \geq 0$  Необходимо сформулировать нечеткую начальную задачу и исследовать типы решений.

**Решение 1.** Исходная четкая начальная задача имеет решение  $y(x) = y_0(x) + y_1(x)$ ,  $y_0(x)$  — решение однородного дифференциального уравнения;  $y_1(x)$  — частное решение для (2.12). Для  $y_0(x)$  имеем цепочку соотношений:

$$\begin{aligned} \dot{y}_x &= -k_1y \Rightarrow \int y^{-1} dy = -k_1 \int dx \Rightarrow \ln y = -k_1x + a, \\ a = \text{const} &\Rightarrow y_0(x) = e^{-k_1x+a}. \end{aligned}$$

Решение  $y_1(x)$  находим по методу неопределенных коэффициентов:

$$\begin{aligned} \dot{y}_x + k_1y &= k_2 \Rightarrow y_1(x) = b_1; b_1 = \text{const} \Rightarrow \\ \Rightarrow (b_1)'_x + k_1b_1 &= k_2 \Rightarrow b_1 = k_2k_1^{-1} \Rightarrow y_1(x) = k_1^{-1}k_2, \end{aligned}$$

$$\text{откуда } y = e^{-k_1x+a} + k_1^{-1}k_2.$$

Из начальных условий получим:

$$y(x = 0) = \frac{e^a}{a'} e^{-k_1 \cdot 0} + k_1^{-1}k_2 = c \Rightarrow a = c - k_2k_1^{-1}.$$

В результате получим решение (2.12) в виде

$$y(x) = g(x, k_1, k_2, c) = (c - k_1^{-1}k_2)e^{-k_1x} + k_1^{-1}k_2.$$

Исследуем типы решений для (2.12). Для того чтобы существовало *BFS*, необходимо выполнение условий (1.3):

$$\dot{f}_y(-k_1 y + k_2) = -k_1 > 0;$$

$$\dot{g}_c [(c - k_1^{-1} k_2) e^{-k_1 x} + k_1^{-1} k_2] = e^{-k_1 x} > 0;$$

$$\dot{g}_{k_1} \Big|_{k_2 > 0} < 0; \dot{f}_{k_1}(-k_1 y + k_2) < 0 \Rightarrow \dot{f}_{k_1} \dot{g}_{k_1} > 0;$$

$$\dot{g}_{k_2} > 0; \dot{f}_{k_2} > 0 \Rightarrow \dot{f}_{k_2} \dot{g}_{k_2} > 0.$$

Таким образом, (1.3) выполнено, поэтому *BFS* для (2.12) существует, и для него справедлива нечеткая начальная задача ( $k_1 \rightarrow k_{1H}, k_2 \rightarrow k_{2H}, c \rightarrow c_H, y \rightarrow y_H$ ):

$$\frac{dy}{dx} = -k_{1H} y_H + k_{2H}; y(x=0) = c_H. \quad (2.13)$$

Пусть  $k_{1H}, k_{2H}, c_H$  являются нечеткими треугольными числами:

$$k_{1H} = (k_{11}|k_{12}|k_{13}), k_{13} > 0, k_{2H} = (k_{21}|k_{22}|k_{23}), k_{21} > 0; \\ c_H = (c_1|c_2|c_3)c_1 > 0,$$

тогда *BFS* равно:

$$\hat{y}_H^{BFS}(x) = (\min_r \underline{y}(x, r), \max_r \bar{y}(x, r) | r \in [0, 1]); \quad (2.14)$$

$$\underline{y}(x, r) = (\underline{k}_2(r) \underline{k}_1^{-1}(r) + \\ + (\underline{c}(r) - \underline{k}_2(r) \underline{k}_1^{-1}(r)) e^{-\underline{k}_1(r)x}; \\ \bar{y}(x, r) = (\bar{k}_2(r) \bar{k}_1^{-1}(r) + \\ + (\bar{c}(r) - \bar{k}_2(r) \bar{k}_1^{-1}(r)) e^{-\bar{k}_1(r)x}.$$

Подстановка  $\hat{y}_H^{BFS}(x)$  в (2.13) обращает его в тождество, поэтому  $\hat{y}_H^{BFS}(x)$  по (2.14) является *BFS* нечеткой начальной задачи (2.13). Из (2.14) имеем следующую асимптотику:

$$(i) \text{ при } r = 0 \Rightarrow \hat{y}_H^{BFS}(x) = \\ = (\underline{y}(x, 0), \bar{y}(x, 0) | r \in [0, 1]) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty;$$

$$(ii) \text{ при } r = 1 \Rightarrow \hat{y}_H^{BFS}(x) = \\ = (\underline{y}(x, 1), \bar{y}(x, 1) | r \in [0, 1]) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty;$$

$$(iii) \text{ при } r = 1 \Rightarrow \underline{y}(x, 1) - \bar{y}(x, 1) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \infty,$$

т. е. в асимптотике  $\supp \hat{y}_H^{BFS}(x)$  имеет значительные размеры.

**Случай 2** ( $k_1 > 0, k_2 > 0, c > 0$ , т. е.  $k_{12} > 0, k_{21} > 0, c_1 > 0$ ). Проверяем выполнение условий (1.3). Имеем  $\dot{f}_y = -k_1 < 0$ , т. е. одно из условий (1.3) не выполняется, поэтому *BFS* для (2.13) не существует. Ищем *SS*. Так как  $k_1 > 0$ , поэтому в правой части

(2.13)  $\dot{f}_y = -k_1 y + k_2 < 0$ . С учетом свойств арифметических операций в банаховом пространстве (умножение на отрицательную константу) уравнение (2.13) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{y}_H(x) = -k_{1H} y_H + k_{2H} \\ y_H(x=0) = c_H \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{cases} \underline{\dot{y}}(x, r) = -\underline{k}_1 \bar{y}(x, r) + \underline{k}_2 r \\ \bar{\dot{y}}(x, r) = -\bar{k}_1 \underline{y}(x, r) + \bar{k}_2 r \\ \underline{y}(x=0) = \underline{c}(r), \bar{y}(x=0) = \bar{c}(r) \end{cases} \Rightarrow \\ \Rightarrow \begin{cases} \dot{Y}(x, r) = AY(x, r) + BK_2(r); \\ Y(x=0, r) = c(r), \end{cases}$$

где  $Y(x, r) = (\bar{y}(x, r), \underline{y}(x, r))^T$ ;  $c(r) = (\underline{c}(r), \bar{c}(r))^T$ ;

$$K_2(r) = (\underline{k}_2(r), \bar{k}_2(r))^T; B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 0 & -\bar{k}_1(r) \\ -\underline{k}_1(r) & 0 \end{pmatrix}.$$

Из решения характеристического уравнения  $\det(A - \omega I) = 0$  имеем:

$$\det \begin{pmatrix} -\omega & -\bar{k}_1(r) \\ -\underline{k}_1(r) & -\omega \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow \omega^2 - \underline{k}_1(r) \bar{k}_1(r) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \omega_1 = [\underline{k}_1(\cdot) \bar{k}_1(\cdot)]^{1/2} = \omega, \\ \omega_2 = [\underline{k}_1(\cdot) k_1(\cdot)]^{1/2} = -\omega.$$

Общее решение  $\hat{y}_H^S(x) = (\underline{y}(x, r), \bar{y}(x, r) | r \in [0, 1])$  для каждой из компонент имеет вид

$$\begin{aligned} \underline{y}(x, r) &= a_{11} e^{\omega x} + a_{12} e^{-\omega x} + \lambda_1; \\ \bar{y}(x, r) &= a_{21} e^{\omega x} + a_{22} e^{-\omega x} + \lambda_2, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где  $a_{ij}$  находятся, как в примере 3.1, случай 2 (Часть I), из соответствующих соотношений, что дает с учетом нечетких начальных условий:

$$\omega_1 = [\underline{k}_1(r) \bar{k}_1(r)]^{1/2};$$

$$\lambda_1 = \underline{k}_1^{-1}(r) \bar{k}_2(r);$$

$$\lambda_2 = \underline{k}_2(r) \bar{k}_1^{-1}(r);$$

$$a_{11} = [(\underline{c}(r) - \lambda_1)\mu - (\bar{c}(r) - \lambda_2)](2\mu)^{-1};$$

$$a_{12} = [(\bar{c}(r) - \lambda_2) + \mu - (\underline{c}(r) - \lambda_1)](2\mu)^{-1};$$

$$a_{21} = -\mu a_{11};$$

$$a_{22} = -\mu a_{12};$$

$$\mu = [\underline{k}_2(r) \bar{k}_1(r)]^{1/2}.$$

Из (2.15) имеем следующую асимптотику. Пусть  $\underline{c}(r) = \bar{c}(r) = c$ ;  $\underline{k}_1(r) = \bar{k}_1(r) = k_1$ ;  $\underline{k}_2(r) = \bar{k}_2(r) = k_2$ . При  $r = 1$  имеем  $\lambda_1 = \lambda_2 = k_2 k_1^{-1} = \lambda$ ,  $\mu = 1$ ,  $\mu = k$ ,



тогда из (2.15) получаем  $\underline{y}(x, r = 1) = \bar{y}(x, r = 1) = \lambda + (c - \lambda)e^{-k_1 x} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \lambda$ . Затем очевидно, что при  $\forall r \in [0, 1]$  имеем  $a_{11} < 0$ ,  $a_{21} > 0$ , поэтому  $\underline{y}(x, r) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} -\infty$ ;  $\bar{y}(x, r) \xrightarrow{x \rightarrow \infty} +\infty$ .

Асимптотика показывает, что с увеличением  $x$  нечеткость в  $\hat{y}_H^S(x)$  возрастает до тех пор, пока она не станет полностью нечеткой.

**Вывод.** Приведенный пример 4 показывает, что при  $k_1 < 0$  имеет место  $BFS \hat{y}_H^{BFS}(x)$  (случай 1), а при  $k_1 > 0$ , соответственно,  $SS \hat{y}_H^{SS}(x)$  (случай 2).

Однако можно показать, что тип нечеткого решения чувствителен к изменениям  $k_1$  или, в терминах системы автоматической оптимизации, имеется значительная инерционность у объекта управления.

**Пример 5.** Пусть (2.12) имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} + k_1 y = 3k_2^*; \\ y(x=0) = c; \end{cases} \quad (2.16)$$

$$k_1 = 10^{-2}; k_2^* > 0, c \geq 0,$$

т. е.  $k_1$  является достаточно малой величиной, поэтому можно положить  $k_1 \approx 0$ . Решение (2.16) получается из решения (2.12), если в нем положить  $k_1 = 10^{-2}$ ;  $k_2 = 3k_2^*$ .

$$\begin{aligned} y(x) &= g(x, k_1, k_2, c) = \\ &= k_2 k_1^{-1} + (c - k_1 k_2^{-1}) e^{-k_1 x} \Big|_{\substack{k_1 = 10^{-2} \\ k_2 = 3k_2^*}} = \\ &= 300k_2^* + (c - 300k_2^*) e^{-0,01x}. \end{aligned}$$

Первоначально ищем  $BFS$ , для этого проверяем условия (1.3). При  $k_1 \approx 0$  для (2.16)  $\dot{f}_y$  отсутствует, поэтому проверяем другие условия:  $\dot{g}_{k_2} = (300 - 300e^{-0,01x}) > 0$ ;  $\dot{g}_c = 0 + e^{-0,01x} \cdot 1 > 0$ . Это означает, что  $BFS$  существует даже при  $k_1 > 0$ . После преобразований будем полагать  $k_{2H} = (k_{21}|k_{22}|k_{23})$ ,  $k_{21} > 0$ ;  $c_H = (c_1|c_2|c_3)$ ,  $c_1 > 0$ , тогда  $BFS$  будет равно:

$$\begin{aligned} \hat{y}_H^{BFS}(x) &= (\underline{y}(x, r), \bar{y}(x, r) | r \in [0, 1]); \\ \underline{y}(x, r) &= (300\underline{k}_2(r) + [\underline{c}(r) - 300\underline{k}_2(r)])e^{-0,01x}; \\ \bar{y}(x, r) &= (300\bar{k}_2(r) + [\bar{c}(r) - 300\bar{k}_2(r)])e^{-0,01x}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Заметим, что если (2.16) не записывается в форме  $\dot{y}_x = f(x, y, k_2)$ , то в этом случае  $BFS$  также существует, т. е. тип решения зависит от форм представления (2.16).

При определенных условиях  $\dot{y}_H^S(x)$  существует, т. е. она имеет функцию принадлежности  $r(\dot{y})$ . Действительно, из (2.15) имеем:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{y}}_x &= [\underline{c}(r) - 300\underline{k}_2(r)](-0,01)e^{-0,01x}; \\ \dot{\bar{y}}_x &= [\bar{c}(r) - 300\bar{k}_2(r)](-0,01)e^{-0,01x} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \dot{\underline{y}}_x = [3\underline{k}_2(r) - 0,01\underline{c}(r)]e^{-0,01x}; \\ &\dot{\bar{y}}_x = [3\bar{k}_2(r) - 0,01\bar{c}(r)]e^{-0,01x}, \end{aligned}$$

откуда  $r(\dot{y})$  существует, если:

$$\begin{aligned} 3\underline{k}_2(r) - 0,01\underline{c}(r) > 0 &\Leftrightarrow 3(k_{22} - k_{21}) > 0,01(c_2 - c_1); \\ 3\bar{k}_2(r) - 0,01\bar{c}(r) > 0 &\Leftrightarrow 3(k_{23} - k_{22}) > 0,01(c_3 - c_2), \end{aligned}$$

где  $k(\cdot)$ ,  $c(\cdot)$  — элементы треугольного представления соответствующих функций принадлежности  $r(k_2)$  и  $r(c)$ .

Чувствительность нечеткой начальной задачи относительно  $BFS$  и  $SS$ , очевидно, обусловлена особенностями нечеткой арифметики, в которой элемент  $-N_H$  является обратным нечетким числом для  $N_H$ .

**2.4. Другие типы нечетких уравнений.** Выше были рассмотрены решения некоторых типов нечетких дифференциальных уравнений первого порядка с разделяющимися переменными, однородными и линейными. Для них было показано, что их решения, в отличие от решений для четких уравнений, имеют одновременно один ( $S$ -решение) или два ( $SS$  и  $BFS$ ) типа решений. Их число определяется коэффициентами уравнений. Другие типы нечетких уравнений в большинстве случаев получаются путем элементарных их преобразований и сведения к рассмотренным выше. В схематической форме имеем:

- 1) нечеткое уравнение Бернулли  $\Rightarrow$  замена переменных  $\Rightarrow$  нечеткое линейное уравнение;
- 2) нечеткое уравнение Риккати  $\Rightarrow$  замена переменных с использованием частного решения  $\Rightarrow$  уравнение Бернулли  $\Rightarrow$  нечеткое линейное уравнение;
- 3) нечеткое уравнение в полных дифференциалах  $\Rightarrow$  преобразование к системе уравнений и ее решение методом подстановки  $\Rightarrow$  один из типов уравнения по пп. 2.1—2.3 или п. 2.4 (1—2);
- 4) нечеткое уравнение с интегрирующим множителем  $\Rightarrow$  метод подбора множителя  $\Rightarrow$  нечеткое уравнение по п. 5.4 (3);
- 5) нечеткие уравнения в неявной форме, включая уравнения Лагранжа и Клеро  $\Rightarrow$  разрешение относительно производной (метод 1)  $\Rightarrow$  система уравнений  $\Rightarrow$  нечеткое уравнение по пп. 2.1—2.3 или по п. 2.4 (1—4) или 2.4 (3)  $\Rightarrow$  введение параметра (метод 2)  $\Rightarrow$  нечеткое уравнение по п. 2.4 (3).

### Выводы и перспективы

- Дается постановка нечеткой начальной задачи и различные типы ее решения в зависимости от способа задания нечеткой производной. Выде-

ляются два основных типа решений: *SS* (Seikkala solution) и *BFS* (Buckley-Feuring solution), для которых имеет место следующая взаимосвязь. При  $\exists BFS \Rightarrow \exists SS$ , однако  $\exists SS \not\Rightarrow \exists BFS$ .

- Результаты изложенной теории по решению нечеткой начальной задачи используются для ее решения для основных типов нечетких дифференциальных уравнений первого порядка.
- Перспективными исследованиями в дальнейших работах является решение проблемы начальной задачи для нелинейных нечетких дифференциальных уравнений. Для этого целесообразно рассмотреть различные приближенные методы, когда соответствующие нечеткие переменные аппроксимируются нечетким степенным множителем [6], нечеткой нейронной сетью [7], а для идентификации неизвестных параметров использовать нелинейный нечеткий метод наименьших квадратов.

Целесообразно также модифицировать известные стандартные методы Эйлера и Рунге—Кутты для решения нелинейных нечетких дифференциальных уравнений.

Известно, что четкие уравнения в частных производных разных порядков, как правило, решаются

различными методами, которые преобразуют исходную задачу к четким обыкновенным дифференциальным уравнениям. В нечеткой модификации эти методы приводят к различным типам нечетких обыкновенных дифференциальных уравнений, которые рассмотрены в настоящей статье. Поэтому перспективным направлением дальнейших исследований является расширение изложенной методики для решения нечетких уравнений в частных производных.

#### Список литературы

1. **Friedman M., Ming M., Kandel A.** Fuzzy linear systems// Fuzzy sets and systems, 1998. N. 96. P. 201—209.
2. **Buckley J. J., Feuring J.** Fuzzy differential equations// Fuzzy sets and systems, 2000, N. 110. P. 43—54.
3. **Buckley J. J., Feuring J.** Introduction to fuzzy partial differential equations // Fuzzy sets and systems. 1999. N. 105. P. 241—248.
4. **Асмолова Ю. Е., Мочалов И. А.** Элементы нечеткого вариационного исчисления // Вестник Российского университета дружбы народов. 2010. № 4. P. 37—43.
5. **Колмогоров А. Н., Фомин С. В.** Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1972.
6. **Деменков Н. П., Мочалов И. А.** Нечеткая интерполяция // Наука и образование. № 2. 2012.
7. **Mosleh, Otadi M.** Numerical solution of quadratic Riccati differential equation by neural network // Mathematical Sciences. 2011. V. 5, N. 3. P. 249—257.

**I. A. Mochalov**, Professor, Bauman Moscow State Technical University,

**M. S. Khrisat**, Graduate Student, e-mail: mohd.khrisat@fet.edu.jo, **M. Ya. Shihab Eddin**, Graduate Student, Russian Peoples' Friendship University

## Fuzzy Differential Equations in Control. Part II

*The initial value problem of Formulated fuzzy is obtained from a clear initial problem in which the parameters of the problem and the initial condition rely inaccurately given. This inaccuracy is modelled by fuzzy variables with triangular membership functions. Modelling by fuzzification parameters leads to fuzzy initial value problem. Depending on the type of fuzzy derivatives allocated fuzzy solutions SS (Seikkala-solution), PRS (Puri-Ralescu-solution), KFMS (Kandel-Fridman-Mingsolution) and BFS (Buckley-Feuring-solution). For the existence of BFS formulated appropriate conditions. Without proof a statement. If there SS, there BFS, however, if there BFS, it does not coincide with the SS.*

*An algorithm for solving fuzzy initial value problem is clear in the decision of the initial problem. Then checks the conditions of existence of SS and BFS, if there is a BFS, then by fuzzification parameters clear the initial problem and finding the minimum and maximum solutions generated fuzzy BFS. If the BFS does not exist, then the SS is the solution of the corresponding system of differential equations.*

*The examples of the simplest solutions of fuzzy initial value problems, fuzzier linear problem are solved. She appears in the calculation of fuzzy phase trajectory of a continuous system of automatic optimization remembering extremum property type nonlinearity-linearity.*

*Figures are given representation of fuzzy numbers in the form of triangular membership functions and the equivalent of the inverse mapping. We give a list of references containing 7 items. 4 of them are in English, the other in Russian.*

**Keywords:** fuzzy system, fuzzy ordinary differential equations

#### References

1. **Friedman M., Ming M., Kandel A.** Fuzzy linear systems. Fuzzy sets and systems. 1998. N. 96. P. 201—209.
2. **Buckley J. J., Feuring J.** Fuzzy differential equations. Fuzzy sets and systems. 2000. N. 110. P. 43—54.
3. **Buckley J. J., Feuring J.** Introduction to fuzzy partial differential equations. Fuzzy sets and systems. 1999. N. 105. P. 241—248.
4. **Asmolova Ju. E., Mochalov I. A.** Jelementy nechetkogo variacionnogo ischislenija. Vestnik rossiiskogo universiteta druzhby narodov. 2010. N. 4. P. 37—43.
5. **Kolmogorov A. N., Fomin S. V.** Jelementy teorii funkcij i funkcional'nogo analiza. M.: Nauka, 1972.
6. **Demenev N. P., Mochalov I. A.** Nechetkaja interpoljacija. Nauka i obrazovanie. 2012. N. 2.
7. **Mosleh, Otadi M.** Numerical solution of quadratic Riccati differential equation by neural network. Mathematical Sciences. 2011. V. 5, N. 3. P. 249—257.

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

УДК 004.9

С. В. Белим, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф., e-mail: sbelim@mail.ru,

С. А. Селиверстов, аспирант, e-mail: otrx@mail.ru

Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск

## Использование метода анализа иерархий для выявления импульсного шума в графических объектах

*Предложен алгоритм выявления поврежденных пикселей, возникающих в графических файлах в результате передачи по зашумленному каналу. Выявление поврежденных пикселей осуществляется методом анализа иерархий для принятия решения о его повреждении на основе анализа окружения. Принятие решения осуществляется на основе трех критериев. С помощью компьютерного эксперимента исследована эффективность алгоритма в зависимости от интенсивности шума.*

**Ключевые слова:** метод анализа иерархий, импульсный шум, фильтрация изображений

### Введение

Случайный шум может присутствовать на изображениях вследствие наличия помех в каналах передачи данных либо как проявление внешних воздействий на устройства получения и хранения графических данных. Случайные шумы можно разделить на несколько видов, каждый из которых проявляет себя по-разному. В данной работе мы ограничимся рассмотрением импульсного шума, проявляющегося в виде отдельных испорченных пикселей. Цвет испорченного пикселя может варьироваться в некотором интервале. В качестве частного случая импульсного шума можно рассматривать шум типа "соль и перец", в котором цвет поврежденного пикселя может принимать одно из двух значений — максимальное и минимальное.

Задача выявления импульсного шума на изображениях является одной из составляющих проблемы улучшения изображений. В большинстве решений, используемых к настоящему времени, устранение импульсного шума достигается с помощью сглаживающих фильтров. При этом речь идет не об устранении шума, а о подавлении шума в целях улучшения визуального восприятия изображения. Фильтры, подавляющие шумы, строят на основе дискретного преобразования Фурье [1, 2], вейвлет-преобразования [1, 3—5], нейронных сетей [6] и т. д. Наилучшие показатели демонстрируют нелокальные методы фильтрации [7, 8]. Все эти методы подавляют проявление шума, снижая его интенсивность, но не устраняют его полностью.

Принципиально другой подход состоит в выделении поврежденных пикселей и последующем их заполнении. Оба шага выполняются на основе ана-

лиза окружающих пикселей. Наибольших успехов на сегодняшний день удалось достичь при выявлении шума типа "соль и перец", при котором цвет поврежденного пикселя может принимать одно из двух значений, условно называемых максимальным и минимальным. Наиболее известными решениями для шума "соль и перец" являются фильтры на основе адаптивного медианного фильтра [9], масштабного параметра [10] и приближения локальной непрерывности [11]. Адаптивный медианный фильтр основан на выделении пикселей, имеющих один из цветов, присущих шуму. При использовании масштабного параметра проводится сравнение значения каждого пикселя с цветами окружающих пикселей. Решение о поврежденности принимается при превышении разностью цветов определенного порогового значения. При обнаружении поврежденных пикселей на основе предположения о локальной непрерывности считается, что наибольшая вероятность повреждения у тех пикселей, которые имеют максимальную или минимальную интенсивность.

Поврежденные пиксели, возникающие вследствие импульсного шума, во многих случаях достаточно легко различимы "на глаз". Более того, именно улучшение визуального восприятия изображения лежит в основе фильтров, подавляющих импульсные шумы. Человеческий мозг выделяет поврежденные пиксели, анализируя цвета его соседей. Следовательно, для решения задачи идентификации поврежденных пикселей могут оказаться эффективными методы Data Mining и теории принятия решений. Для применения интеллектуальных методов обработки данных необходимо формализовать

критерии, по которым человеческий глаз выделяет поврежденные пиксели.

Цель данной статьи — разработка алгоритма идентификации поврежденных пикселей, возникающих вследствие импульсного шума, с помощью метода анализа иерархий, развитого в теории принятия решений.

### Постановка задачи

Пусть исходное изображение  $A$  задано в виде матрицы цветов  $A_{ij}$ . В случае цветного изображения необходимо рассматривать три матрицы согласно модели RGB. Будем считать, что диапазон значений элементов матрицы имеет вид  $[0, m]$ . Пусть поврежденное изображение задается матрицей цветов  $B_{ij}$ . Будем считать, что импульсный шум задан матрицей  $R$ . Каждый элемент матрицы повреждений  $R_{ij}$  с вероятностью  $p$  отличен от нуля и с вероятностью  $1 - p$  — нулевой. Значение ненулевых элементов матрицы повреждений также задается случайным образом в интервале  $[0, m]$ . Значение матрицы поврежденного изображения задается соотношением следующим образом:

$$B_{ij} = \begin{cases} R_{ij}, & R_{ij} > 0; \\ A_{ij}, & R_{ij} = 0. \end{cases}$$

Задачей ставится определение матрицы  $R_{ij}$  по известной матрице  $B_{ij}$ .

### Применение метода анализа иерархий для выявления поврежденных пикселей

Для использования метода анализа иерархий [12] необходимо четко сформулировать альтернативные решения, из которых необходимо осуществить выбор, а также критерии для анализа альтернатив. Как уже было сказано в постановке задачи, необходимо выявить пиксели, появившиеся на изображении в результате импульсного шума. Поэтому возможно только одно из двух решений, обозначаемых в дальнейшем либо  $Y$ , если данный пиксель является поврежденным, либо  $N$ , если пиксель является частью изображения. Как уже говорилось ранее, будем строить систему принятия решения на основе анализа ближайших соседей. Выделим три критерия.

$K_1$  — соседние по сторонам пиксели имеют тот же цвет, что и анализируемый или отличный от него. В реальной ситуации при большом многообразии цветов на данный критерий могут оказывать влияние оттенки цвета. Чтобы избежать такой ситуации, будем при анализе разбивать весь спектр цветов на  $m$  интервалов и считать, что два цвета совпадают, если они попадают в один интервал.

$K_2$  — соседние по углам пиксели имеют тот же цвет, что и анализируемый, или отличный от него. Как и для соседей, по сторонам будем проводить разбиение спектра на  $m$  интервалов.

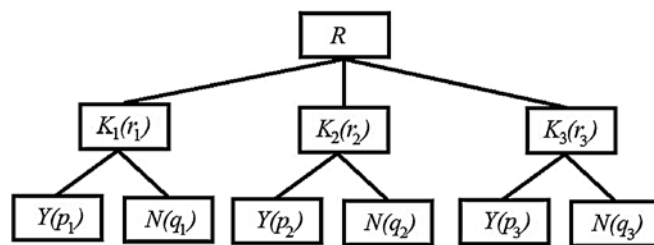


Рис. 1. Иерархия критериев для определения поврежденности пикселя

$K_3$  — отклонение цвета пикселя от среднего значения окружающих восьми пикселей.

Первые два критерия позволяют выявлять протяженные области изображения с равномерной заливкой. Третий критерий необходим для выявления областей с градиентной заливкой. Таким образом, получаем двухуровневое иерархическое дерево альтернатив, изображенное на рис. 1. Окончательное решение обозначено через  $R$ .

Для применения схемы анализа иерархий необходимо определить относительные веса критериев  $r_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), а также веса решений в рамках одного критерия  $p_i$  и  $q_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Будем считать, что критерий  $K_1$  важнее критерия  $K_2$  в  $n$  раз, а критерий  $K_2$  важнее критерия  $K_3$  в  $k$  раз. Также будем предполагать наличие транзитивности, т. е. критерий  $K_1$  важнее критерия  $K_3$  в  $nk$  раз. Тогда согласованная матрица парных сравнений будет иметь следующий вид:

	$K_1$	$K_2$	$K_3$
$K_1$	1	$n$	$kn$
$K_2$	$1/n$	1	$k$
$K_3$	$1/(kn)$	$1/k$	1

Из данной матрицы стандартными способами [14] могут быть получены весовые коэффициенты:

$$r_1 = \frac{nk}{nk + k + 1}; r_2 = \frac{k}{nk + k + 1}; r_3 = \frac{1}{nk + k + 1}.$$

При классическом использовании метода анализа иерархий парные сравнения проводят на основе экспертных оценок. В нашем подходе вместо экспертных оценок будем использовать некоторые объективные показатели, определяемые численно. В частности, ограничения на значения  $n$  и  $k$  мы в дальнейшем определим из рассмотрения тривиальных примеров. Наиболее подходящие значения этих параметров, как и  $l$ , будут найдены из компьютерного эксперимента.

Перейдем к определению весовых коэффициентов в рамках каждого из критериев. Начнем рассмотрение с  $K_1$ . Пусть из четырех пикселей, соприкасающихся с исследуемым,  $x$  имеют тот же цвет, тогда решение  $N$  более весомо по сравнению с  $Y$  (то есть исследуемый пиксель не испорчен) в  $x/(4 - x)$  раз. Записывая матрицу парных сравнений и проводя не-

необходимые преобразования, получаем значения коэффициентов  $p_1 = (4 - x)/4$ ,  $q_1 = x/4$ . Аналогично определяем коэффициенты для критерия  $K_2$ . Пусть из четырех пикселей, соприкасающихся с данным только по вершинам,  $y$  имеют тот же цвет. Тогда весовые коэффициенты примут значения  $p_2 = (4 - y)/4$ ,  $q_2 = y/4$ .

Для вычисления весовых коэффициентов по критерию  $K_3$  предположим, что полная палитра имеет  $m + 1$  цвет, т. е. максимальное значение цвета равно  $m$ . Пусть цвет исследуемого пикселя  $c$ , а среднее значение окружающих его пикселей  $c_0$ . Для нахождения весовых коэффициентов применим следующие рассуждения. Пусть решение  $N$  более весомо, чем  $Y$ , в  $a$  раз, где значение  $a$  зависит от абсолютного значения отклонения цвета пикселя  $c$  от среднего значения окружающих пикселей  $c_0$  ( $dc = |c - c_0|$ ). Тогда весовые коэффициенты будут иметь следующий вид:

$$p_3 = \frac{1}{a + 1}; q_3 = \frac{a}{a + 1}.$$

Рассмотрим предельные случаи. В случае равенства цвета исследуемого пикселя среднему значению цветов окружающих пикселей ( $dc = 0$ ) будем считать, что он не испорчен шумом, коэффициенты при этом будут иметь значение  $p_3 = 0$ ,  $q_3 = 1$ . Если пиксель максимально отличается от окружающих ( $dc = m$ ), то будем считать его однозначно испорченным, т. е.  $p_3 = 1$ ,  $q_3 = 0$ . Следовательно, при  $dc = 0$  должно быть  $a \rightarrow \infty$ . При значении  $dc = m$  должно выполняться условие  $a = 0$ . Этим условиям удовлетворяет выражение

$$a = \frac{m}{dc} - 1.$$

Откуда следуют значения для весовых коэффициентов:

$$p_3 = \frac{dc}{m}, q_3 = 1 - \frac{dc}{m}.$$

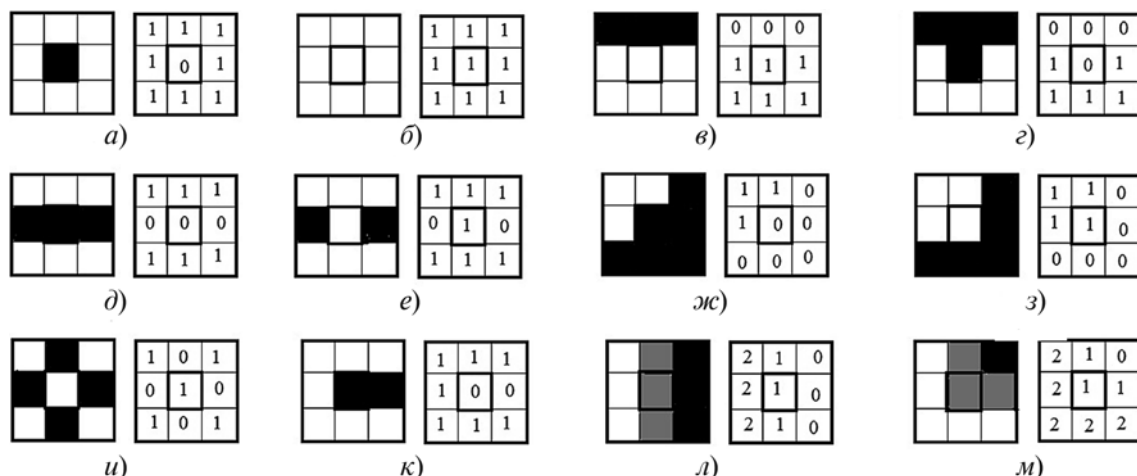


Рис. 2. Примеры расположения пикселей

Для окончательного принятия решения необходимо вычислить величины

$$P(Y) = r_1 p_1 + r_2 p_2 + r_3 p_3, P(N) = r_1 q_1 + r_2 q_2 + r_3 q_3.$$

В случае если  $P(Y) > P(N)$ , то принимается решение  $Y$ , т. е. пиксель является поврежденным, в противном случае, если  $P(Y) \leq P(N)$ , принимается решение  $N$ , т. е. пиксель является неповрежденным.

Для проверки работоспособности метода и выявления возможных ограничений на значения  $n$  и  $k$  рассмотрим несколько простейших случаев, представленных на рис. 2. Во всех случаях, представленных на этом рисунке, кроме (л) и (м), предполагается двухцветная палитра ( $m = 1$ ). Черный цвет кодируется нулевым значением, а белый цвет — единичным. В двух последних примерах палитра трехцветная ( $m = 2$ ) и введен промежуточный серый цвет. Во всех примерах исследуется пиксель, находящийся посередине, и принимается решение, является ли он поврежденным или нет.

Наиболее простым является пример (а), в этом случае  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $dc = 1$ , соответственно,  $p_1 = 1$ ,  $q_1 = 0$ ,  $p_2 = 1$ ,  $q_2 = 0$ ,  $p_3 = 1$ ,  $q_3 = 0$ , откуда  $P(Y) = 1$ ,  $P(N) = 0$ , т. е. система однозначно принимает решение о поврежденности пикселя независимо от значения параметров  $n$  и  $k$ . Аналогичная ситуация наблюдается в примере (б):  $x = 4$ ,  $y = 4$ ,  $dc = 0$ ,  $p_1 = 0$ ,  $q_1 = 1$ ,  $p_2 = 0$ ,  $q_2 = 1$ ,  $p_3 = 0$ ,  $q_3 = 1$ ,  $P(Y) = 0$ ,  $P(N) = 1$ , т. е. при любых значениях  $n$  и  $k$  система принимает решение о неповрежденности пикселя. Из первых двух примеров можно сделать вывод, что предложенный метод однозначно находит единичный поврежденный пиксель, окруженный одноцветной заливкой.

В случае (в):  $x = 3$ ,  $y = 2$ ,  $dc = 3/8$ ,  $p_1 = 1/4$ ,  $q_1 = 3/4$ ,  $p_2 = 1/2$ ,  $q_2 = 1/2$ ,  $p_3 = 3/8$ ,  $q_3 = 5/8$ ,

$$P(Y) = \frac{1}{4}r_1 + \frac{1}{2}r_2 + \frac{3}{8}r_3 = \frac{2nk + 4k + 3}{8(nk + k + 1)}, P(N) = \frac{3}{4}r_1 + \frac{1}{2}r_2 + \frac{5}{8}r_3 = \frac{6nk + 4k + 5}{8(nk + k + 1)}.$$

При любых положительных  $n$  и  $k$  будет выполняться неравенство  $P(Y) < P(N)$ , т. е. пиксель будет определен как неповрежденный. В случае (з):  $x = 1, y = 2, dc = 5/8, p_1 = 3/4, q_1 = 1/4, p_2 = 1/2, q_2 = 1/2,$

$$p_3 = 5/8, q_3 = 3/8, P(N) = \frac{1}{4}r_1 + \frac{1}{2}r_2 + \frac{3}{8}r_3 = \frac{2nk + 4k + 3}{8(nk + k + 1)}, P(Y) = \frac{3}{4}r_1 + \frac{1}{2}r_2 + \frac{5}{8}r_3 = \frac{6nk + 4k + 5}{8(nk + k + 1)}.$$

Следовательно,  $P(Y) > P(N)$  и пиксель будет распознан как поврежденный. Из двух последних примеров видно, что предложенный метод позволяет выявлять поврежденные пиксели, расположенные вблизи горизонтальной границы. В силу симметричности предложенных критериев данный вывод останется верным и для вертикальной границы, а также при инвертировании цветов.

В случае (д):  $x = 2, y = 0, dc = 3/4, p_1 = 1/2, q_1 = 1/2, p_2 = 1, q_2 = 0, p_3 = 3/4, q_3 = 1/4, P(Y) = 0,5r_1 + r_2 + 0,75r_3, P(N) = 0,5r_1 + 0,25r_3.$  Так как все весовые коэффициенты положительные, то  $P(Y) > P(N)$ , следовательно, линии толщиной в один пиксель будут восприниматься как испорченные. Этот же вывод подтверждается рассмотрением примера (е), для которого  $P(Y) < P(N)$ .

Для случая (ж):  $x = 2, y = 3, dc = 3/8, p_1 = 1/2, q_1 = 1/2, p_2 = 1/4, q_2 = 3/4, p_3 = 3/8, q_3 = 5/4, P(Y) = 0,5r_1 + 0,25r_2 + 0,125r_3, P(N) = 0,5r_1 + 0,75r_2 + 0,625r_3.$  Очевидно, выполняется неравенство  $P(Y) < P(N)$ , т. е. метод позволяет правильно обрабатывать границы, расположенные под углом. В близком к нему случае (з) будет выполняться неравенство  $P(Y) > P(N)$ , значит, пиксели, расположенные в углах, будут восприниматься как поврежденные.

Интерес представляет случай (и). Если положим, что  $n > 1$ , т. е. горизонтальные структуры важнее диагональных, тогда  $P(Y) > P(N)$  и диагностируется поврежденность пикселя. В обратном случае  $n < 1$  будет выполняться неравенство  $P(Y) < P(N)$  и пиксель будет считаться неповрежденным. В случае (к), как и следовало ожидать, пиксель будет определяться как поврежденный при любых значениях  $n$  и  $k$ .

Рассмотрим случаи присутствия градиента цвета. В случае (л) пиксель будет считаться неиспорченным при условии  $k < 1$ . Рассмотрение случая (м) и требование определения пикселя как неиспорченного приводит к более сильному условию  $k < 1/2$ .

Таким образом, из рассмотренных примеров следует, что для правильной обработки основных структур на изображении необходимо выполнение условий  $n > 1$  и  $k < 1/2$ .

## Алгоритм выявления поврежденных пикселей

Запишем формально алгоритм, реализующий предложенный метод. Осуществляем последовательный проход по всем пикселям изображения. Для каждого пикселя выполняем последовательность шагов.

*Шаг 1.* Определяем цвета ближайших соседей.

*Шаг 2.* Вычисляем сравнительные характеристики  $x, y, dc$  и на их основе весовые коэффициенты  $p_i, q_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

*Шаг 3.* Вычисляем значения вероятностей  $P(Y)$  и  $P(N)$ .

*Шаг 4.* Если  $P(Y) > P(N)$ , то заносим координаты пикселя в карту поврежденных пикселей.

*Шаг 5.* Переходим к следующему пикселю.

На выходе алгоритма будет получен список поврежденных пикселей. Так как в алгоритме осуществляется один проход по всем пикселям и для каждого пикселя выполняется фиксированное число шагов, то трудоемкость алгоритма будет линейной. Также следует отметить локализацию данных, необходимых для принятия решения, в малой области вокруг исследуемого пикселя, что позволяет легко выполнять распараллеливание алгоритма простым разбиением изображения на области.

## Компьютерный эксперимент и результаты

Для исследования эффективности предложенного метода был проведен компьютерный эксперимент по выявлению поврежденных пикселей. Исследования проводили на трех типах изображений: однородной заливке, искусственном изображении геометрических фигур и широко используемом изображении "Lena". Все изображения имели размер  $256 \times 256$  пикселей, глубина цвета составляла 256 цветов. С помощью генератора псевдослучайных последовательностей с равномерным распределением выбирали координаты поврежденного пикселя и его новый цвет.

Исследования проводили при различных значениях относительного числа поврежденных пикселей  $p$  от 10 до 70 %. Разбиение спектра цветов на интервалы задавалось числом интервалов  $m$ . В нашем компьютерном эксперименте  $m$  варьировалось от 1 до 128. Работа алгоритма оценивалась по двум параметрам: *eff* — эффективность, т. е. число правильно найденных поврежденных пикселей к общему числу сгенерированных поврежденных пикселей; *err* — процент ложных срабатываний как отношение ошибочно определенных пикселей к общему числу пикселей, найденных алгоритмом.

На рис. 3 (см. четвертую сторону обложки) представлен равномерно закрасненный фон с импульсным шумом интенсивности 10 %, а также карта поврежденных пикселей для  $m = 8$  и  $m = 24$ . Как показали численные оценки, в первом случае было обнаружено 85 % поврежденных пикселей, а во вто-

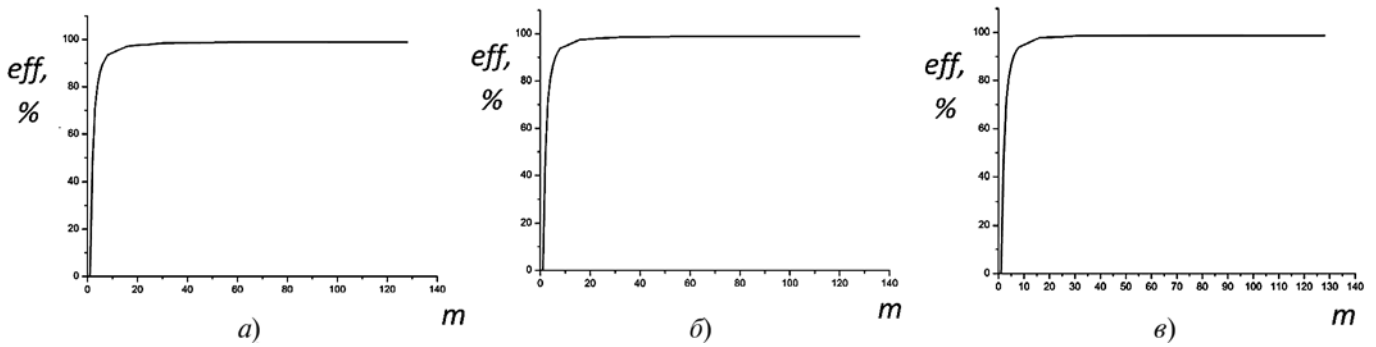


Рис. 6. Зависимость процента верно обнаруженных пикселей от глубины палитры  $m$ :  
 $a - p = 10$ ;  $b - p = 20$ ;  $v - p = 30$

ром случае 94 % поврежденных пикселей. Ложные срабатывания составляли в среднем 0,2 % в обоих случаях. Были обнаружены не все поврежденные пиксели в связи с тем, что цвет их задавался случайно и некоторые из них попали в тот же цветовой интервал, что и основной фон. Наличие ложных срабатываний обусловлено попаданием поврежденных пикселей в соседние точки изображения.

Более интересные результаты были получены для искусственного изображения геометрических фигур с четкими границами. Результаты представлены на рис. 4 (см. четвертую сторону обложки) для случая  $p = 10$  %. Как видим, при  $m = 8$  достаточно хорошо определяются одиночные поврежденные пиксели. Численная оценка показывает, что верно определены 87 % пикселей, но при этом ложные срабатывания составляют 9 %. При  $m = 24$  верно определяются 93 % пикселей, ложные срабатывания составляют также 9 %. Большой процент ложных срабатываний связан с тем, что алгоритм, кроме поврежденных пикселей, также находит резкие границы на изображении (рис. 4,  $a, b$ , см. четвертую сторону обложки).

Результаты работы на реальном изображении "Lena" представлены на рис. 5 (см. четвертую сторону обложки). При  $m = 8$  верно определено 85 % поврежденных пикселей, ложные срабатывания 55 %. При  $m = 24$  верно определено 94 % поврежденных пикселей, ложные срабатывания 77 %. Как видим

на реальном изображении процент ложных срабатываний достаточно высок. Это связано с тем, что в выбранном изображении "Lena" много мелких деталей, которые воспринимаются алгоритмом как поврежденные пиксели. В частности, при увеличении числа интервалов деления спектра цветов в качестве испорченных алгоритм воспринимает все резкие границы, что хорошо видно на рис. 5,  $v$ .

Далее эксперименты проводили на основе изображения "Lena" как широко известного и обладающего всеми характерными свойствами реальных графических объектов. Как было видно из рис. 5, при увеличении числа цветов в палитре изменяется как эффективность обнаружения поврежденных пикселей, так и процент ложных срабатываний. На рис. 6 представлены зависимости процента верно опознанных поврежденных пикселей от числа цветов в палитре  $m$  при различных уровнях загрязнения  $p$ . Как видно из этого рисунка, во всех случаях наблюдается схожая картина быстрого роста эффективности обнаружения при  $m < 20$  с дальнейшим переходом к очень медленному росту. Насыщения в явном виде не наступает. Кривая медленно приближается к значению 100 %.

На рис. 7 представлены зависимости процента ложных срабатываний от числа цветов в палитре  $m$  при различных уровнях загрязнения  $p$ . Как видно из рисунка, во всех случаях присутствует явный минимум около значения  $m = 5$ , дальнейшее увели-

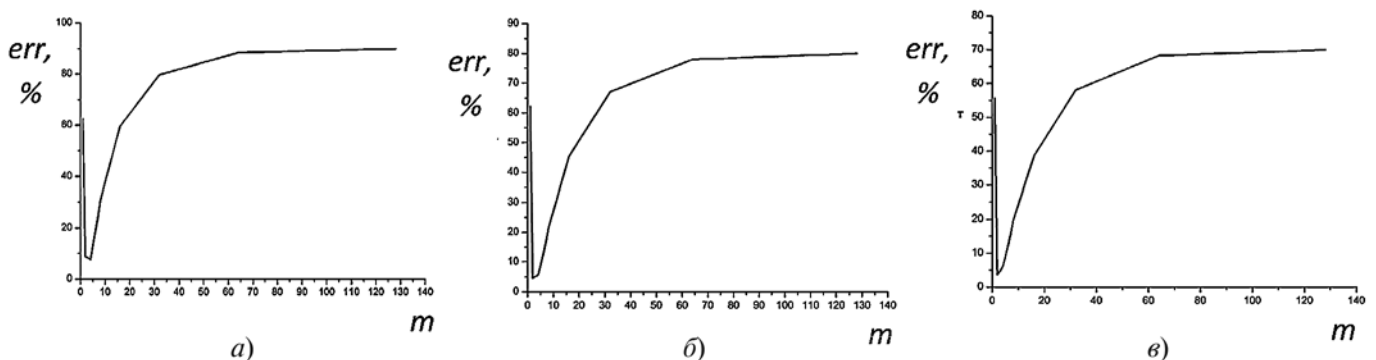


Рис. 7. Зависимость процента ложных срабатываний от глубины палитры  $m$ :  
 $a - p = 10$ ;  $b - p = 20$ ;  $v - p = 30$

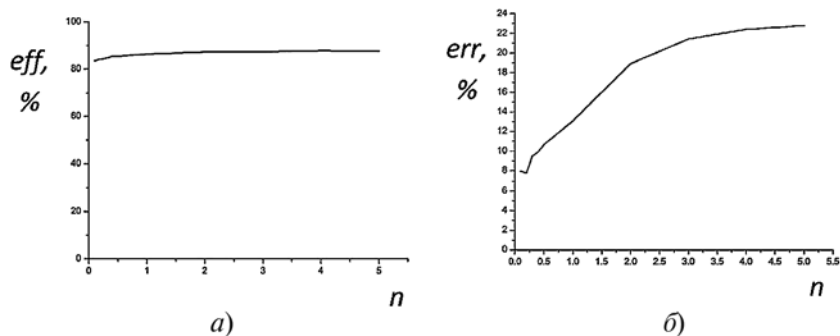


Рис. 8. Зависимость эффективности обнаружения  $eff$  (а) и процента ложных срабатываний  $err$  (б) от весового коэффициента  $n$  при  $m = 5$  и  $k = 1$

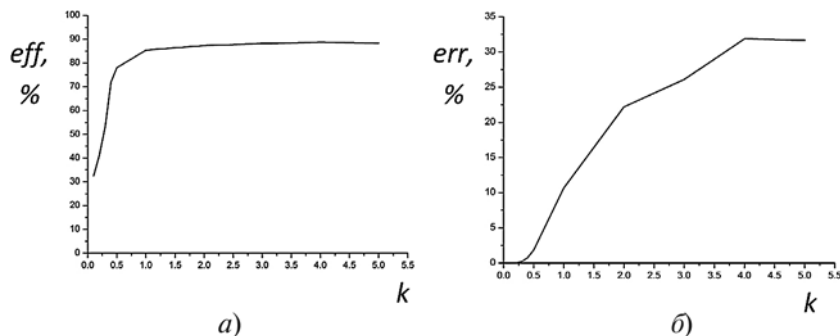


Рис. 9. Зависимость эффективности обнаружения  $eff$  (а) и процента ложных срабатываний  $err$  (б) от весового коэффициента  $k$  при  $m = 5$  и  $n = 0,5$

чение числа цветов  $m$  ведет к росту процента ложных срабатываний. Данное поведение графика легко объяснимо. Если используется разбиение на малое число интервалов, то предложенный метод не очень чувствителен к разнице цветов, вследствие чего обнаруживается мало пикселей как верных, так и неверных. При этом метод ошибочно находит все резкие границы. С ростом  $m$  уменьшается размер цветовых интервалов, что позволяет более точно определять поврежденные пиксели, реагируя при этом ошибочно только на резкие границы. Если же интервалы цветов сделать еще меньше, то верных поврежденных пикселей будет обнаруживаться незначительно больше, тогда как алгоритм будет ошибочно срабатывать на все более гладких границах областей изображения.

Ранее во всех случаях мы считали, что весовые коэффициенты  $n$  и  $k$ , определяющие относительную важность различных критериев, равны единице. Это приближение было выбрано, основываясь на простых случаях, рассмотренных в предыдущем разделе. Тем не менее этот вопрос требует дополнительного изучения на реальных изображениях. Был проведен компьютерный эксперимент при  $m = 5$  для различных значений  $n$  и  $k$ . На рис. 8 представлена зависимость эффективности восстановления от параметра  $n$  при  $k = 1$ . Как хорошо видно из рисунка, эффективность восстановления практически не зависит от весового коэффициента  $n$ , тогда как процент ложных срабатываний монотонно возрастает.

Далее был проведен эксперимент по исследованию зависимости эффективности восстановления и процента ложных срабатываний от весового коэффициента  $k$  при  $m = 5$  и  $n = 0,5$  (рис. 9). Как видно из графиков, эффективность определения поврежденных пикселей растет на интервале от 0 до 1, а далее остается практически неизменной. Для процента ложных срабатываний наблюдается монотонный рост на всем исследованном интервале.

При реализации прикладной системы идентификации поврежденных пикселей необходимо выбирать оптимальные параметры системы  $m$ ,  $n$  и  $k$ . Однако в данном случае мы имеем дело с задачей многофакторной оптимизации. Необходимо, чтобы одновременно была наибольшая эффективность определения поврежденных пикселей и минимальный процент ложных срабатываний. Для решения этой задачи может быть использован метод взвешенной суммы [13] при построении целевой функции:

$$F(m, n, k) = a_1 eff(m, n, k) + \frac{a_2}{err(m, n, k)} \rightarrow \min.$$

Положительные коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  выбираются из соображений значимости того или иного критерия и удовлетворяют условию  $a_1 + a_2 = 1$ .

### Обсуждение результатов и выводы

Предложенный в данной статье алгоритм выявления импульсного шума на изображениях достаточно эффективен как на искусственных, так и на естественных изображениях. Также следует отметить предложенное нами нетрадиционное использование метода анализа иерархий для принятия решения. В обычном подходе [12] весовые коэффициенты по каждому из критериев определяются на основе экспертных оценок и носят субъективный характер. В предложенном подходе экспертные оценки вычисляются автоматически, исходя из локальных свойств исследуемой части изображения, и носят объективный характер. Повышение эффективности предложенного метода может быть достигнуто путем введения дополнительных критериев, а также с помощью анализа пикселей не только являющихся ближайшими соседями, но и следующих за ними.

Проведем сравнение полученных нами результатов с результатами, полученными в других работах. Следует отметить, что в подавляющем большинстве



работ ставится задача сглаживания импульсного шума для улучшения восприятия изображения, а не явного обнаружения испорченных пикселей. Существующие алгоритмы обнаружения делят на два больших класса: обнаруживающие шум типа "соль и перец" (Salt & Pepper Noise SPN) и обнаруживающие импульсный шум случайного значения (Random-Value Impulse Noise — RVIN). Алгоритмы для обнаружения SPN имеют высокую эффективность в силу того, что заранее известны цвета поврежденных пикселей. Однако и эти алгоритмы характеризуются наличием необнаруженных пикселей. Так, например, в работе [14] проведено тестирование четырех различных алгоритмов обнаружения импульсного шума типа "соль и перец", для которых эффективность обнаружения поврежденных пикселей составляет от 71 до 96 % поврежденных пикселей при импульсном шуме с плотностью  $p = 30$  %. Задача выявления импульсного шума случайного значения является значительно более трудной по сравнению с выявлением SPN, однако наш алгоритм показывает сопоставимые по эффективности результаты. Методы выявления поврежденных пикселей для импульсного шума случайного значения в большинстве случаев строят на основе алгоритма SD-ROM [15—18]. Данный алгоритм был предложен в работе [15] и основан на анализе пикселей, попадающих в скользящее окно размером  $3 \times 3$ , содержащее в центре исследуемый пиксель. Решение о поврежденности пикселя принимается на основе пороговой схемы. Причем значения четырех параметров, играющих роль пороговых значений, выбирает пользователь произвольно из некоторого интервала, и они зависят от самого изображения. При правильном выборе параметров алгоритм способен давать результаты, сопоставимые с алгоритмами для шума типа "соль и перец". При ошибочном выборе параметров эффективность резко падает. Предложенный алгоритм дает стабильные значения эффективности поиска поврежденных пикселей для различных изображений, не уступает аналогичным разработкам и не требует ручной подгонки параметров.

Следует отметить, что предлагаемый подход является только первым этапом при восстановлении изображений, поврежденных импульсным шумом. Поэтому его результаты надо воспринимать как предобработку графических данных. Как хорошо известно, повреждения изображений импульсным шумом не являются критическими вплоть до значения  $p$ , равного около 75 % [19]. Предложенный алгоритм при таком уровне шума в качестве поврежденных пикселей начинает определять также и границы областей. Однако определяемые границы имеют толщину в один пиксель и при дальнейшем восстановлении слабо сказываются на общем виде восстановленного изображения. Данные погрешности алгоритма могут приводить к небольшому размытию границ, что является характерной осо-

бенностью всех фильтров, устраняющих импульсный шум.

*Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания вузам в части проведения научно-исследовательских работ на 2014—2016 гг., проект № 2314.*

#### Список литературы

1. Astola J., Kuosmanen P. Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997.
2. Kijewski M., Judy P. The noise power spectrum of ct images // Phys. Med. Biol. 1987. V. 32 (5). P. 565—575.
3. Peng-Lang Sui. Image Denoising A lgorithm via Doubly Local Wiener Filtering With Directional Windows in Wavelet Domain // IEEE Transactions on Signal Processing Let ters. October 2005. V. 12, N. 12. P. 681—684.
4. Petrović N., Crnojević V. Impulse Noise Detection Based on Robust Statistics and Genetic Programming // Lecture Notes in Computer Science. 2005. V. 3708. P. 643—649.
5. Miller M., Kingsbury N. Image Denoising Using Derotated Complex Wavelet Coefficients // IEEE Transactions on Image Processing. September 2008. V. 17, N. 9. P. 1500—1511.
6. Kong H., Guan L. Detection and removal of impulse noise by a neural network guided adaptive median filter // Neural Networks. Proceedings. IEEE International Conference on 1995. V. 2. P. 845—849.
7. Buades A., Morel J. A non-local algorithm for image denoising // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2 2005. P. 60—65.
8. Dabov K., Foi A., Katkovnik V., Egiazarian K. Image denoising by sparse 3d transform-domain collaborative filtering // IEEE Trans. Image Process. 2007. V. 16, N. 8. P. 2080—2095.
9. Chan R., Ho C., Nikolova M. Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization // IEEE Trans. Image Process. 2005. V. 14, N. 10. P. 1479—1485.
10. Kam H. S., Tan W. H. Noise detection fuzzy (NDF) filter for removing salt and pepper noise // Lecture Notes Comput. Sci. 2009. V. 5857. P. 479—486. (Intern. visual informatics conf. 2009 (IVIC'09)).
11. Najeer A. J., Rajamahi V. Design of hybrid filter for denoising images using fuzzy network and edge detecting // Amer. J. Sci. Res. 2009. Iss. 3. P. 5—14.
12. Saaty T. L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors — The Analytic Hierarchy / Network Process. // Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics. 2008. V. 102 (2). P. 251—318.
13. Jong-Hyun Ryu, Sujin Kim, Hong Wan. Pareto front approximation with adaptive sum method in multiobjective simulation optimization // Proc. of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC). Austin. 2009. P. 623—633.
14. Нрок Хоанг Фан, Спицын В. Г. Анализ алгоритмов обнаружения импульсного шума на цифровых изображениях // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 5. С. 70—73.
15. Abreu E., Lightstone M., Mitra S. K., Arakawa S. K. A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images. // IEEE Transactions on Image Processing, IEEE Transactions on. 1996. V. 5. P. 1012—1025.
16. Garnett R., Huegerich T., Chui C., He W. A Universal Noise Removal Algorithm with an Impulse Detector // IEEE Trans Image Process. 2005. N. 14 (11). P. 1747—54.
17. Красовский Г. Я., Усс М. Л. Фильтрация изображений, искаженных импульсными помехами точечного и строчного типа, на основе систем итерированных функций // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. 2003. В. 2. С. 47—55.
18. Сорокин С. В., Щербаков М. А. Реализация SD-ROM фильтра на основе концепции нечеткой логики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2007. № 3. С. 56—65.
19. Hutchinson J. Culture, Communication, and an Information age Madonna // IEEE Professional Communication Society Newsletter. May/June 2001. V. 45, N. 3. P. 1, 5.

## Hierarchy Analysis Method as a Way to Detect Impulse Noise on Images

*This article presents an algorithm for identifying broken pixels, that can appear in graphic files consequently to their transfer through noisy channel. The detection of broken pixels is carried through the sequential check of image file. The method of hierarchical analysis is used for each pixel in order to arrive at a decision about its impairment through the analysis of its environment. The decision is based on 3 kinds of criteria. A case of impulse noise — randomly situated pixels of different colors, is analyzed. The algorithm efficiency depending on the noise intensity is also investigated through a computed experiment. In the present article it is proved that with the help of parameter design the efficiency of detecting broken pixels can reach 96 %. The computer experiment helped to reveal the dependence of the proposed method efficiency against various parameters. The article also presents the investigation of false response percentage depending on selected parameters. It is shown that the efficiency can amount up to 90 % whilst the 8 % of positive response.*

**Keywords:** hierarchy analysis method, impulse noise, image filtering

### References

1. Astola J., Kuosmanen P. *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997.
2. Kijewski M., Judy P. The noise power spectrum of ct images. *Phys. Med. Biol.* 1987. V. 32 (5). P. 565—575.
3. Peng-Lang Sui. Image Denoising Algorithm via Doubly Local Wiener Filtering With Directional Windows in Wavelet Domain. *IEEE Transactions on Signal Processing Letters*. October 2005. V. 12, N. 12. P. 681—684.
4. Petrović N., Crnojević V. Impulse Noise Detection Based on Robust Statistics and Genetic Programming. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005. V. 3708. P. 643—649.
5. Miller M., Kingsbury N. Image Denoising Using Derotated Complex Wavelet Coefficients. *IEEE Transactions on Image Processing*. September 2008. V. 17, N. 9. P. 1500—1511.
6. Kong H., Guan L. Detection and removal of impulse noise by a neural network guided adaptive median filter. *Neural Networks. Proceedings. IEEE International Conference on*. 1995. V. 2. P. 845—849.
7. Buades A., Morel J. A non-local algorithm for image denoising. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2. 2005. C. 60—65.
8. Dabov K., Foi A., Katkovnik V., Egiazarian K. Image denoising by sparse 3d transform-domain collaborative filtering. *IEEE Trans. Image Process.* 2007. V. 16 (8). P. 2080—2095.
9. Chan R., Ho C., Nikolova M. Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization. *IEEE Trans. Image Proc.* 2005. V. 14, N. 10. P. 1479—1485.
10. Kam H. S., Tan W. H. Noise detection fuzzy (NDF) filter for removing salt and pepper noise. *Lecture Notes Comput. Sci.* 2009. V. 5857. P. 479—486. (*Intern. visual informatics conf. 2009 (IVIC'09)*).
11. Najeer A. J., Rajamani V. Design of hybrid filter for denoising images using fuzzy network and edge detecting. *Amer. J. Sci. Res.* Iss. 3. 2009. P. 5—14.
12. Saaty T. L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors — The Analytic Hierarchy / Network Process. *Review of the Royal Spanish Academy of Sciences. Series A, Mathematics*. 2008. V. 102 (2). P. 251—318.
13. Jong-hyun Ryu, Sujin Kim, Hong Wan. Pareto front approximation with adaptive sum method in multiobjective simulation optimization. *Proc. of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)*. Austin. 2009. P. 623—633.
14. Ngok Hoang Fan, Spitsyn V. G. Analiz algoritmov obnaruzheniya impulsnogo shuma na tsifrovyyh izobrazheniyah. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. 2011, V. 318, N. 5. P. 70—73.
15. Abreu E., Lightstone M., Mitra S. K., Arakawa S. K. A new efficient approach for the removal of impulse noise from highly corrupted images. *IEEE Transactions on Image Processing, IEEE Transactions on*. 1996, V. 5. P. 1012—1025.
16. Garnett R., Huegerich T., Chui C., He W. A Universal Noise Removal Algorithm with an Impulse Detector. *IEEE Trans Image Process.* 2005. N. 14 (11). P. 747—54.
17. Krasovskiy G. Ya., Uss M. L. Filtratsiya izobrazheniy, iskazhennykh impulsnyimi pomehami tochechnogo i strochnogo tipa, na osnove sistem iterirovannykh funktsiy. *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi*. 2003. N. 2. P. 47—55.
18. Sorokin S. V., Scherbakov M. A. Realizatsiya SD-ROM filtra na osnove kontseptsii nechetkoy logiki. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region*. 2007. N. 3. P. 56—65.
19. Hutchinson J. Culture, Communication, and an Information age Madonna. *IEEE Professional Communication Society Newsletter*. May/June 2001. V. 45, N. 3. P. 1, 5.

**С. В. Дворников**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры,  
**С. С. Манаенко**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. препод., **С. С. Дворников**<sup>2</sup>, бакалавр, студент магистратуры,  
<sup>1</sup> Военная академия связи  
<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
 e-mail: practicdsv@yandex.ru

## Параметрическая мимикрия сигналов, модулированных колебаниями и сформированных в различных функциональных базисах

*Представляются материалы исследования явления параметрической скрытности радиосигналов с позиций определения параметров, существенных для их последующей обработки. Рассматривается параметрическая скрытность сигналов, модулированных синфазными фрагментами гармоник и вейвлета Гаусса первого порядка равной длительности. Анализируются результаты компьютерного моделирования.*

**Ключевые слова:** параметрическая скрытность, вейвлет Гаусса первого порядка, демодуляция сигналов, фазовая манипуляция

### Введение

Обеспечение информационной безопасности является ключевым моментом при разработке информационных радиотехнических систем (ИРТС). Как правило, решение данного вопроса связывают с применением систем криптографической защиты, обеспечивающих гарантируемую конфиденциальность доступа к передаваемой информации. Однако такой подход наделяет ИРТС специфическим набором признаков, раскрывающих факт использования указанных мер защиты. В результате в ходе информационного противостояния для противостоящей системы открывается возможность первоочередного выявления ИРТС, защищенных криптосистемами, и при необходимости применения деструктивных методов воздействия.

Таким образом, поиск путей обеспечения информационной безопасности остается актуальной и значимой задачей при проектировании и эксплуатации ИРТС.

Именно поэтому в настоящей статье рассматриваются подходы к решению данных вопросов с позиций обеспечения структурной скрытности сигналов, используемых для передачи информации в ИРТС.

### Физическая сущность структурной скрытности

Под понятием скрытности сигналов понимают свойства, затрудняющие эффективную реализацию процедур обнаружения сигналов и измерения их параметров в целях последующего извлечения вложенной информации.

Следовательно, скрытность сигнала во многом определяет и скрытность ИРТС как таковой. Вместе с тем, согласно [1], скрытность сигналов подразделяют на энергетическую, структурную и информационную (в ряде случаев оперируют понятием времен-

ной скрытности). Рассмотрим кратко подходы к их реализации в ИРТС.

*Энергетическая скрытность* предполагает создание условий, при которых реализация процедур обнаружения самого факта работы ИРТС будет связана с определенными трудностями.

*Информационная скрытность* базируется на специфических методах кодирования сообщений как на битовом уровне, так и на уровне семантики.

*Структурная скрытность* в общем случае характеризует способность ИРТС противостоять мерам, направленным на выявление параметров сигнала, существенных для его последующей обработки. Другими словами, структурная скрытность предполагает, что обнаруженный сигнал будет в полной мере отождествлен с одним из множества априорно известных сигналов (эталонов).

*Временная скрытность* представляет совокупность мер, обеспечивающих несоответствие интервала функционирования ИРТС и времени, в пределах которого осуществляется применение процедур несанкционированного доступа к информации, передаваемой в ней.

Следует отметить, что преодоление одной из видов скрытностей еще не гарантирует доступ к информации, содержащейся в сигнале.

В последнее время особое внимание уделяется вопросам обеспечения структурной скрытности. Прежде всего это связано с тем, что технологии реализации временной и энергетической скрытностей приводят к ухудшению электромагнитной доступности корреспондентов ИРТС, а признаки информационной скрытности провоцируют к применению средств деструктивного воздействия, что в целом является нежелательным моментом.

Именно поэтому методология обеспечения структурной скрытности сигналов видится предпочтительной.

В общем случае структурная скрытность зависит от способа синтеза конкретного вида сигнала. В частности, в работе [2] предлагается структуру сигнала видоизменять посредством наложения псевдослучайных последовательностей (ПСП) на каждый информационный бит. Однако такой подход не решает проблемы доступа к информации как таковой. Ограниченность длительности ПСП, накладываемой на бит, приводит к тому, что путем простого перебора возможно определить порядок следования в ней нулей и единиц. В работе [3] рассматривается другой подход к обеспечению структурной скрытности сигналов, а именно — их синтез в базисах, отличных от используемых в системах анализа, осуществляющих несанкционированный доступ.

В частности, авторами предлагается формировать сигналы в базисах функций сплайн-Вилленкина — Крестенсона, которые являются обобщающими по отношению к гармоническим функциям базиса Фурье. Но главное достоинство этих функций в том, что сформированный на их основе сигнал имеет все внешние признаки модулированного колебания, синтезированного в гармоническом базисе. Однако последующий анализ такого сигнала методами, ба-

зирующимися на реализацию процедур преобразования Фурье, не позволит получить значение его истинных параметров и как результат — правильно его демодулировать (извлечь вложенную в него информацию).

Рассмотренный подход к обеспечению структурной скрытности аналогичен явлению мимикрии в живой природе, поэтому скрытность, которая проявляется в результате неправильного выбора базиса анализа, определим как *параметрическую мимикрию*.

### Результаты эксперимента по анализу сигналов, модулированных фрагментами колебаний, синтезированных в различных базисах

Был проведен эксперимент в предположении того, что близость структур колебаний, сформированных в различных базисах, определяет уровень параметрической мимикрии сигнала, представляющего их симбиоз, при его анализе только в одном из базисов.

В ходе эксперимента, основываясь на данном предположении, в качестве колебаний с близкой временной структурой были определены фрагменты синусоиды  $s(t)$  (рис. 1, *a*) и так называемого вейвлета Гаусса  $\psi(t)$  первого порядка, представляющего первую производную от функции Гаусса (далее по тексту вейвлет) (рис. 2, *a*) [4].

Однако несмотря на кажущуюся близость  $s(t)$  и  $\psi(t)$  во временной области, спектры указанных фрагментов принципиально различны. Так, на рис. 1, *b* показан спектр синусоиды  $S(f)$ , а на рис. 2, *b* — спектр вейвлета  $\Psi(f)$  при условии равной длительности их фрагментов во временной области.

Следовательно, для отдельных фрагментов параметрическая мимикрия в спектральной области не наблюдается.

Затем, в соответствии с замыслом эксперимента, произвольным образом была выбрана последовательность 1011010110110101 и на ее основе синтезировался сигнал  $z(t)$  (рис. 3), в котором значения единицы кодировались фрагментами функцией  $\psi(t)$ , а нуля —  $s(t)$ .

Анализ полученных результатов показал, что сигнал  $z(t)$  не только во временной области похож на гармонику (один период на длительности информационной посылки), но и в частотном пространстве его спектр  $Z(f)$  (рис. 4, *a*) напоминает спектр

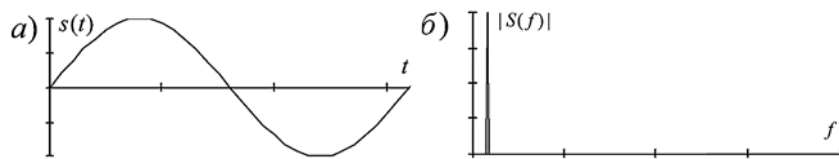


Рис. 1. Представление отрезка синусоиды: *a* — во временной области; *b* — в частотной

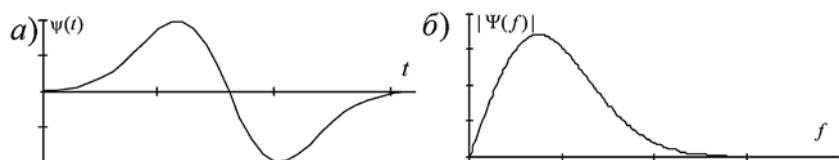


Рис. 2. Представление вейвлета: *a* — во временной области; *b* — в частотной

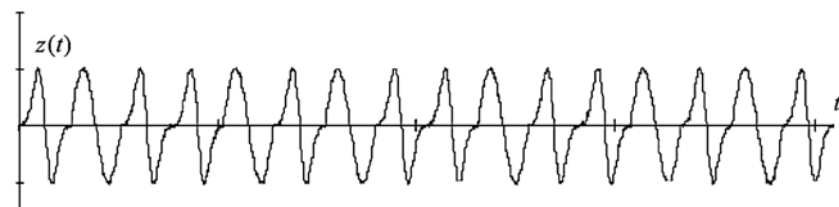


Рис. 3. Сигнал, модулированный фрагментами синусоиды и вейвлета

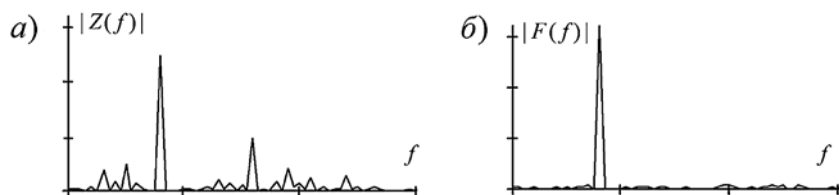


Рис. 4. Спектр: *a* — модулированного сигнала  $z(t)$ ; *b* — гармоники

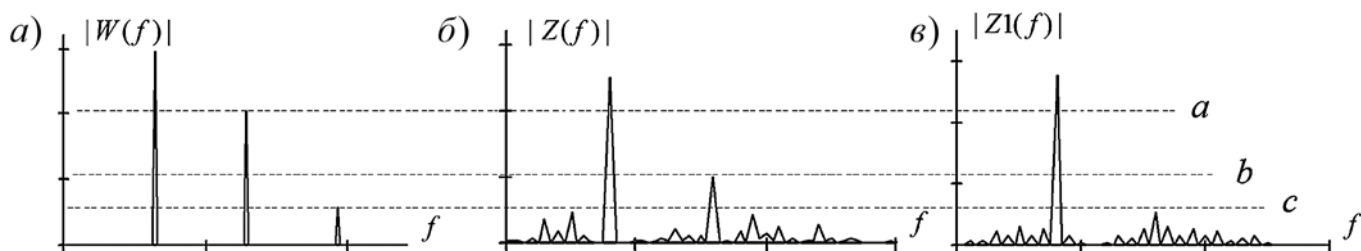


Рис. 5. Спектр сигнала:

$a$  — состоящего только из фрагментов вейвлетов;  $b$  — сигнала  $z(t)$ ;  $c$  — сигнала  $z1(t)$ , в котором фрагментов вейвлетов в 2 раза меньше, чем в сигнале  $z(t)$

гармонического колебания (рис. 4, б). Указанный эффект проявляется при условии анализа в базисе функций Фурье (на рис. 4 оси координат представлены в относительных единицах, позволяющих оценить соотношения амплитудных значений спектральных составляющих между собой).

Очевидно, что не только визуальный, но и слуховой анализ не позволит однозначно идентифицировать сигнал  $z(t)$ , поскольку по своей структуре он похож на зашумленную гармонику.

Чтобы понять природу параметрической мимикрии, проанализируем свойства сигнала  $w(t)$ , содержащего только фрагменты вейвлетов той же длительности, что и  $z(t)$ . Спектр  $W(f)$  сигнала  $w(t)$  представлен на рис. 5, а.

Визуальный анализ  $W(f)$  показывает, что он по своей структуре соответствует спектру периодической импульсной последовательности. Указанный эффект обусловлен тем, что по своей конструкции вейвлет фактически представляет локализованный во времени импульс. Поэтому в базисе экспоненциальных функций спектр  $w(t)$  будет соответствовать спектру последовательности импульсов, что и подтверждается результатом на рис. 5, а.

С других позиций синтез сигнала  $z(t)$  можно интерпретировать как замену в гармоническом колебании отдельных фрагментов синусоиды на вейвлеты. А учитывая случайный характер следования информационных битов, у результирующего сигнала  $z(t)$  наблюдается ослабление свойств периодичности по отношению к сигналу  $w(t)$ , состоящему только из "импульсных" фрагментов вейвлетов. В результате и в спектре сигнала  $z(t)$  наблюдается ослабление частотных составляющих, соответствующих периодичности (на рис. 5, б спектр соответствует спектру, показанному на рис. 4, а, и размещен в целях демонстрации различия уровней спектральных составляющих).

В подтверждение данного предположения на рис. 5, в показан спектр сигнала  $z1(t)$ , в котором фрагментов, содержащих вейвлеты, в 2 раза меньше, чем в  $z(t)$  при сохранении общего числа информационных битов (1001010100010100). Анализ его спектра  $Z1(f)$  показывает, что уровень соответствующих частотных составляющих (отвечающих за периодичность) при этом еще больше уменьшился.

На рис. 5 показаны линии  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , соответствующие уровню второй гармоники спектров сигналов  $w(t)$ ,  $z(t)$ ,  $z1(t)$ .

Таким образом, можно сделать заключение, что параметрическая мимикрия усиливается с увеличением соотношения числа фрагментов  $s(t)$  к  $\psi(t)$ , входящих в состав  $z(t)$ .

Свойства параметрической мимикрии особенно ярко проявляются в условиях применения методов селективной фильтрации со стороны системы анализа. Действительно, учитывая визуальную похожесть спектра сигнала  $z(t)$  со спектром зашумленной гармоники, невольно напрашивается применение согласованной фильтрации, которая в итоге полностью выхолостит сигнал до уровня синусоидального колебания. В результате этого произойдет усиление эффекта первичного заблуждения относительно предположения о структуре обрабатываемого излучения.

Следует отметить, что анализ сигнала  $z(t)$  в базисе вейвлетов также не позволит однозначно определить его структуру. В этом случае основная локализация плотности энергии будет наблюдаться в доменах (фрагмент пространства, ограниченный значениями определенного временного сдвига и заданного масштаба частоты [4]), структурно соответствующих фрагментам  $\psi(t)$ , что способствует ошибочному отнесению  $z(t)$  к сигналу, состоящему только из фрагментов вейвлетов.

### Предложения по демодуляции сигналов, синтезированных из фрагментов колебаний различных базисов

Рассматриваемые сигналы, модулированные колебаниями, синтезированными в различных функциональных базисах, способны переносить информацию, причем информационное содержание отражает структурное различие фрагментов  $s(t)$  и  $\psi(t)$ .

Очевидно, что практический интерес указанные сигналы будут представлять только в том случае, если разработанные для них способы демодуляции обеспечат достоверное извлечение информации при отношении сигнал/шум (ОСШ) в канале порядка 12 дБ.

Согласно [5] основной задачей процедур демодуляции является создание условий, при которых обеспечивается контрастное разделение энергии сигнала в соответствии с его информационным наполнением.

В связи с этим предлагается следующий подход к реализации процедур демодуляции (рис. 6).

Предложенный подход исходит из условия того, что при тактовой синхронизации разностный сигнал

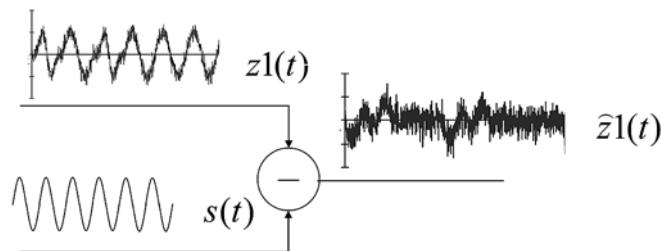


Рис. 6. Принцип демодуляции сигналов, сформированных на основе фрагментов, синтезированных в разных функциональных базисах

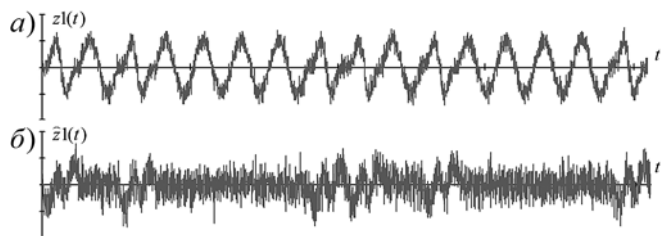


Рис. 7. Представление: а — зашумленного сигнала  $z_1(t)$ ; б — разностного сигнала  $\hat{z}_1(t)$

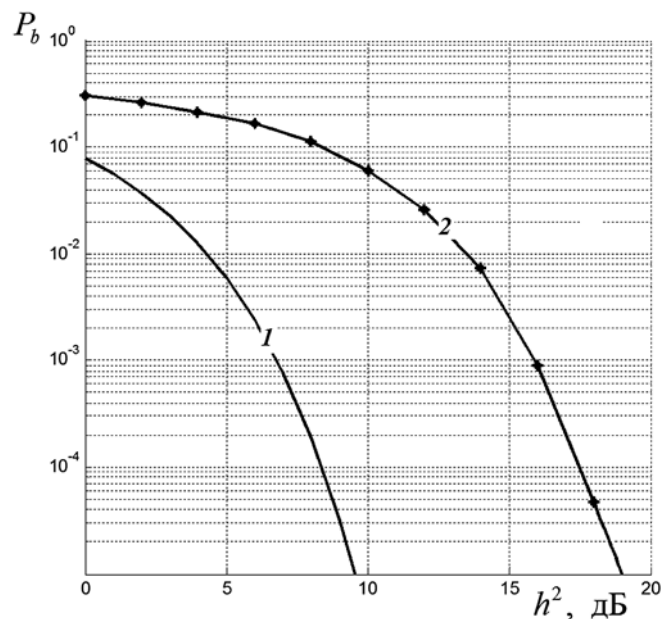


Рис. 8. Зависимость вероятности битовой ошибки  $P_b$  от значения ОСШ  $h^2$ : 1 — для сигнала двухпозиционной фазовой манипуляции; 2 — для сигнала с параметрической скрытностью

$\hat{z}_1(t) = z_1(t) - s(t)$  обращается в нуль на длительностях фрагментов, модулированных синусоидами. В подтверждение данного заключения на рис. 7 показаны фрагменты сигналов в шумах (ОСШ порядка 15 дБ), где на рис. 7, а — зашумленный сигнал  $z_1(t)$ , а на рис. 7, б — сигнал разности  $\hat{z}_1(t)$  зашумленного сигнала  $z_1(t)$  и эталонного колебания  $s(t)$  той же длительности.

Анализ результатов, представленных на рис. 7, б показал, что структурные особенности сигнала  $\hat{z}_1(t)$ , существенные для принятия решения при демодуляции, проявляются в позициях, соответствующих логическим единицам, т. е. модулированным фрагментами вейвлетов  $w(t)$ . В частности, в качестве порога целесообразно определить средний уровень энергии на длительности логического элемента. На рис. 8 показаны графики, характеризующие помехоустойчивость сигналов, обладающих параметрической скрытностью.

На рис. 8 кривая 1 — это зависимость вероятности битовой ошибки  $P_b$  от значения ОСШ  $h^2$  для сигнала двухпозиционной фазовой манипуляции (ФМ-2), а кривая 2 — для сигнала с параметрической скрытностью.

Анализ результатов (моделирование проводилось в среде MATLAB) показывает, что сигналы с параметрической скрытностью уступают сигналам ФМ-2 на 8...9 дБ. Однако на уровне 16 дБ уже обеспечивается приемлемое качество приема сигналов с параметрической скрытностью, что говорит о возможности их практического применения.

Следует отметить, что если при вычислении  $\hat{z}_1(t)$  в качестве разностного использовать сигнал  $w(t)$ , то аналогичные структурные различия (см. рис. 7) будут проявляться в позициях, соответствующих логическому нулю.

Таким образом, обработку сигналов с параметрической скрытностью можно проводить как в базисах гармонических функций, так и в базисах вейвлетов.

## Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующее заключение. Наряду с традиционными подходами повышение структурной скрытности возможно за счет использования эффекта параметрической скрытности, который возникает при анализе сигналов, сформированных из колебаний различных функциональных базисов, только в одном из базисов.

Авторы предполагают, что указанный эффект может усилиться с увеличением числа используемых базисов.

Сложность обработки таких сигналов обуславливается отсутствием априорной информации.

Дальнейшие исследования видятся в разработке эффективных методов демодуляции рассматриваемых сигналов.

Авторы выражают благодарность действительно члену академии МААНО профессору Чернолесу Владимиру Петровичу за мотивацию и поддержку проводимых исследований.

#### Список литературы

1. Каневский З. М., Литвиненко В. П. Теория скрытности. Воронеж: ВГУ, 1991. 144 с.

2. Корчинский В. В. Метод повышения структурной скрытности передачи информации в системе связи многопользовательского доступа // Технологический аудит и резервы производства. 2013. № 3/1 (11). С. 20–23.

3. Агиевич С. Н., Дворников С. В., Гусельников А. С. и др. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Вилленкина — Крестенсона // Контроль—Диагностика. 2009. № 3. С. 52–57.

4. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с.

5. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь. 2000. 800 с.

S. V. Dvornikov<sup>1</sup>, Professor, S. S. Manaenko<sup>1</sup>, Associate Professor,  
S. S. Dvornikov<sup>2</sup>, Student, e-mail: practicsdv@yandex.ru,  
<sup>1</sup> Military Communications Academy, St. Petersburg  
<sup>2</sup> St. Petersburg State Polytechnical University

## Parametric Mimicry Signals Modulated Oscillations Formed in Various Functional Basis

*Information security issues associated with the use of cryptographic systems of protection. However, this approach gives information systems specific set of features that reveal the fact that the use of these measures. Therefore, finding ways to ensure information security remains an urgent and important task in the design and operation of data transmission systems.*

*Under the concept of stealth signals understand the properties that impede the effective implementation of the procedures for their detection and measurement in order to retrieve the embedded information.*

*Stealth signals are divided into energy, and structural information. Energy secrecy involves the creation of conditions under which the implementation of procedures for detecting the very fact of communication tools. Concealment information encoding methods based on messages as at the bit level and at the level semantics. Structural secrecy characterizes the ability of signals to resist measures aimed at identifying their parameters.*

*In the recent attention paid to ensuring the structural stealth. This is due to the fact that the technology implementation time and energy electromagnetic stealth impair the availability of correspondents, and informational signs stealth provoke the use of means jamming.*

*An approach to providing structural stealth signals by their synthesis in bases other than those used in systems analysis, offering unauthorized access. The advantage of these features is that formed on the basis of the signal is all external signs of the modulated oscillation synthesized harmonic basis.*

*Such an approach to structural stealth similar phenomenon of mimicry in nature, so stealth, which manifests itself in the wrong choice of the basis of analysis, defined as parametric mimicry. As oscillations with close temporal structure of the proposed fragments sinusoid and Gaussian wavelet of the first order, which represents the first derivative of the Gaussian function.*

*The signals thus generated in the time and frequency domains resemble harmonics. Visual and auditory analysis does not identify the signal as it is similar to the noisy harmonic signal.*

*Parametric mimicry increases with increasing ratio of the number of fragments to fragments harmonic wavelets. Practical interest such signals will be represented only if they developed to provide reliable demodulation techniques to extract information for the signal/noise ratio of the order of 15 dB.*

*Along with the traditional approaches, increasing structural stealth possible through the use of parametric stealth effect, which occurs when analyzing the signals generated from the vibrations of different functional bases, only one of the bases.*

*The authors suggest that this effect may be enhanced with the increase in the number of bases used.*

**Keywords:** parametric stealth, Gauss wavelet first order, demodulation, phase shift keying

#### References

1. Kanevskij Z. M., Litvinenko V. P. *Teorija skrytnosti*. Voronezh.: VGU, 1991. 144 p.

2. Korchinskij V. V. Metod povyshenija strukturnoj skrytnosti peredachi informacii v sisteme svjazi mnogoporzovatel'skogo dostupa. *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*. 2013. N. 3/1 (11). P. 20–23.

3. Agievich S. N., Dvornikov S. V., Gusel'nikov A. S. i dr. Opisanie signalov v bazisah funkcij splajn-Vilenkina — Krestenсона. *Kontrol'—Diagnostika*. 2009. N. 3. P. 52–57.

4. Jakovlev A. N. *Vvedenie v veyvlet-preobrazovanija: ucheb. posobie*. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2003. 104 p.

5. Prokis D. *Cifrovaja svjaz*. Per. s angl. Pod red. D. D. Klovskogo. M.: Radio i svjaz'.

# БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ CRYPTOSAFETY INFORMATION

УДК 004.05; 004.3

**А. В. Барabanов**, канд. техн. наук, нач. отдела, e-mail: mail@cnpro.ru,  
**А. С. Марков**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., генеральный директор, e-mail: am@cnpro.ru,  
**В. Л. Цирлов**, канд. техн. наук, исполнительный директор, e-mail: mail@cnpro.ru  
ЗАО "НПО "Эшелон", г. Москва

## Оценка соответствия средств защиты информации "Общим критериям"

*Статья посвящена анализу системы сертификации средств защиты информации в соответствии с методологией "Общих критериев" и ISO 15408. Проведен анализ статистики в области отечественной и международной сертификации средств защиты информации по требованиям безопасности информации. Дан краткий обзор новых пакетов нормативных методических документов ФСТЭК России. Показаны проблемные вопросы сертификации по линии "Общих критериев", касающиеся разработчиков изделий, а также испытательных лабораторий. Предложены пути преодоления трудностей, связанных с внедрением методологии "Общих критериев". Рассмотрены перспективы внедрения методологии "Общих критериев" в нашей стране и за рубежом.*

**Ключевые слова:** безопасность информации, сертификация, средство защиты информации, общие критерии, методология общих критериев, критерии оценки безопасности информационных технологий, оценка соответствия

### Введение

Последние два года ознаменовались выходом новых пакетов нормативных документов ФСТЭК России, касающихся оценки соответствия средств защиты информации (СЗИ) требованиям метастандарта ГОСТ ИСО/МЭК 15408, релевантного международной методологии "Общих критериев" (ОК). Указанные документы конкретизировали классический подход использования ОК для оценки соответствия ряда СЗИ в нашей стране. Ожидается постепенный переход от традиционных руководящих документов ФСТЭК России к новым документам для широкого класса современных и перспективных СЗИ.

Несмотря на накопленный опыт использования методологии ОК по линии ФСТЭК России в смежных российских системах сертификации СЗИ, указанный подход не получил пока глубокой проработки. Анализу потенциала развития подхода по линии ОК посвящена данная статья.

### Историческая ретроспектива

В нашей стране система сертификации СЗИ по требованиям безопасности информации берет начало с 1995 г.<sup>1</sup> В основу организации сертификационных и аттестационных испытаний были положены нор-

мативные документы директивного плана, касающиеся детерминированных требований к функциям безопасности, в частности, автоматизированных систем, комплексных СЗИ от несанкционированного доступа (НСД) и, чуть позже, межсетевых экранов (МЭ). С развитием информационных технологий и новых классов угроз информационной безопасности (ИБ) остро встал вопрос создания универсальной, гибкой и адаптивной системы нормативных документов, учитывающей типы СЗИ, среды функционирования и уровни защиты информации, но обеспечивающей повторяемость результатов испытаний [1–3]. С этой целью Технический комитет ТК-362 обеспечил перевод соответствующих между-

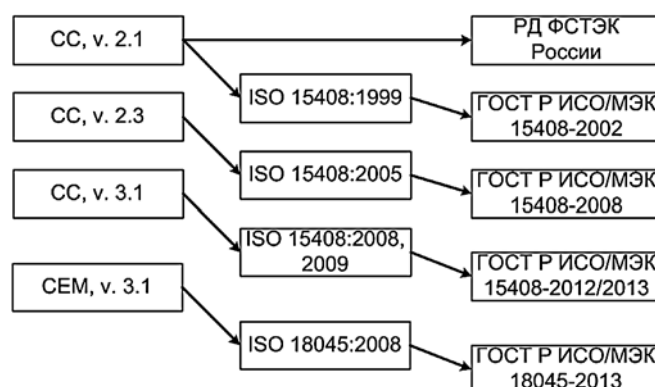


Рис. 1. Соответствие международных и национальных стандартов

<sup>1</sup> См. Постановление Правительства РФ № 608, 1995 г.



## Задачи исследования

В основу проведенного анализа положены данные, представленные на сайте ФСТЭК России<sup>2</sup>, портале международной системы сертификации Common Criteria<sup>3</sup>, а также полученные в ходе авторских испытаний СЗИ и экспертизы материалов испытаний по линии ОК.

С точки зрения целей анализа важно было оценить:

- объемы и рост работ по оценке соответствия СЗИ;
- классы актуальных и перспективных СЗИ;
- долю импортной продукции в России;
- перспективы серийного производства в России;
- лидирующие компании в области создания СЗИ;
- открытие исходного кода и предоставление среды компоновки;
- оценочные уровни доверия, достижимые при сертификации на практике;
- распределение затрат испытательной лаборатории.



Рис. 2. Новый порядок задания требований по безопасности информации

народных стандартов (рис. 1), а в рамках системы ФСТЭК России была инициирована апробация методологии ОК [4—7].

Принципиально новым этапом внедрения методологии ОК в нашей стране стало утверждение пакетов требований для отдельных типов СЗИ начиная с 2012 г. [8]. Согласно новому подходу для каждого типа СЗИ принимается нормативный правовой акт, содержащий требования по защите информации и устанавливающий классы защиты, содержащие минимальный набор требований. Для каждого типа СЗИ утверждаются профили защиты, которые являются основой для создания задания по безопасности, на соответствие которому и проводится сертификация конкретного изделия (рис. 2).

В период 2012—2013 гг. были утверждены требования к системам обнаружения вторжений (СОВ) [9], средствам антивирусной защиты (САВЗ) [10] и средствам доверенной загрузки, а в ближайшее время ожидается принятие документов по DLP-системам [11], средствам защиты среды виртуализации, средствам ограничения программной среды, средствам управления доступом, средствам управления потоками информации, средствам защиты каналов передачи информации, средствам контроля удаления информации, средствам идентификации и аутентификации, МЭ, средствам анализа защищенности (САЗ) и др.

В соответствии с этим перед испытательными лабораториями и разработчиками СЗИ возникла задача апробации новых документов, меняющих сложившиеся методики работ, а следовательно, и трудозатраты [5]. Рассмотрим общие тенденции внедрения методологии ОК в нашей стране в сравнении с международной системой Common Criteria.

## Общие тенденции оценки соответствия по линии "Общих критериев"

Проведенный анализ показал, что сертификация по линии ОК имеет устойчивый рост в мире и постепенно набирает оборот в нашей стране.

Первое, что бросается в глаза, — это то, что объемы сертификации в России не уступают международным. Это объясняется государственной важностью результатов оценки соответствия СЗИ требованиям по безопасности информации, видимо, по причине зависимости от технологий иностранных производителей (рис. 3). В то же время число сертификаций в России в соответствии с международной методологией ОК невелико (рис. 4).

На рис. 5 представлено распределение числа сертификаций типов СЗИ в России (за период 2011—2013 гг.), а именно: МЭ, СЗИ от НСД, программного обеспечения (ПО) со встроенными СЗИ, ПО общего назначения (ОН), которое не содержит встроенных функций по защите информации, ПО,

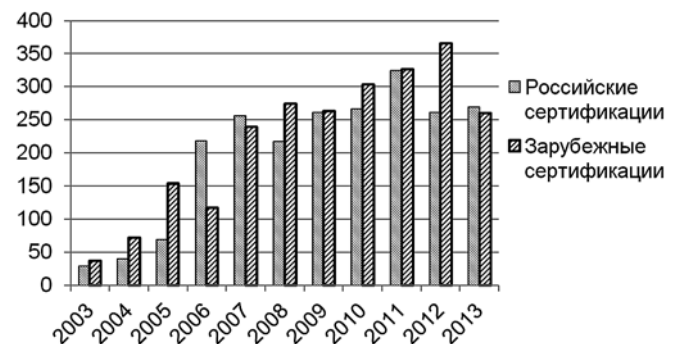


Рис. 3. Число сертификаций по линии ФСТЭК России

<sup>2</sup> www.fstec.ru

<sup>3</sup> www.commoncriteriaportal.org

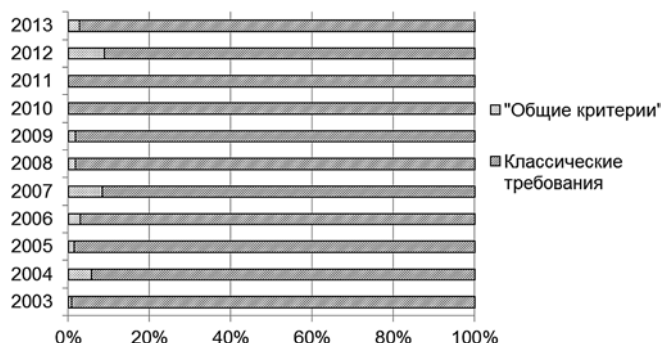


Рис. 4. Распределение числа сертификаций по традиционным документам и методологии "Общих критериев" в России

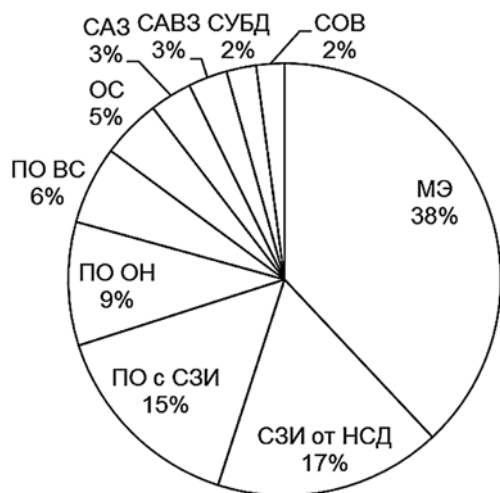


Рис. 5. Распределение по типам средств защиты информации в России



Рис. 6. Распределение по типам средств защиты информации в системе Common Criteria

используемого в вычислительных сетях (ВС), кроме МЭ, операционных систем (ОС), САЗ, САВЗ, систем управления базами данных (СУБД) и СОВ. Очевидно, развитие защищенных сетевых технологий обусловило лидерство сертификации МЭ.

Аналогичный анализ, выполненный в отношении международной системы сертификации Common Criteria, позволил выявить актуальные зарубежные ИТ-решения в защищенном исполнении, а именно (рис. 6):

- ПО, используемое в смарт-картах;
- многофункциональные устройства (например, принтеры);
- сетевое ПО (маршрутизаторы, коммутаторы).

Распределение числа испытаний СЗИ по схемам сертификации "серия" ("типового образца") и "партия" (включая единичные устройства) по линии ФСТЭК России представлено на рис. 7.

Распределение числа сертификаций СЗИ российского и импортного производства в системе ФСТЭК России за период 2011—2013 гг. представлено на рис. 8.

После вступления в силу нормативных правовых актов, задающих требования безопасности информации в нотации ОК, отечественные и зарубежные

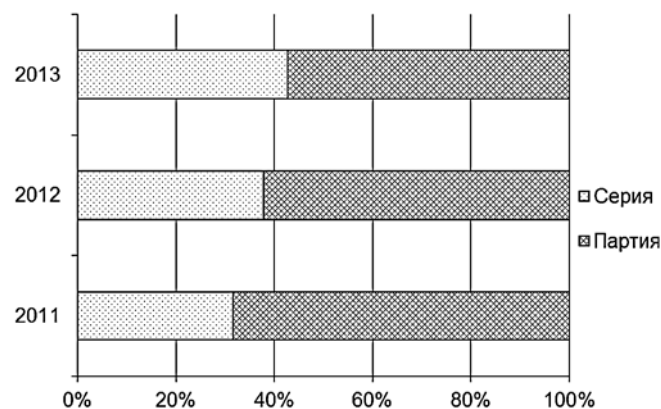


Рис. 7. Распределение числа испытаний СЗИ по схемам сертификации в России

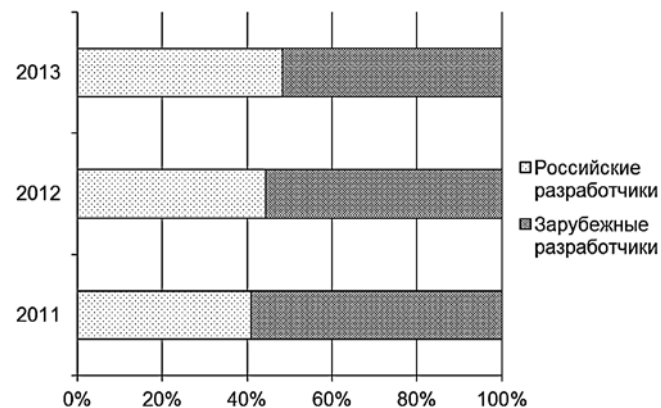


Рис. 8. Сертификации продукции российского и зарубежного производства в России

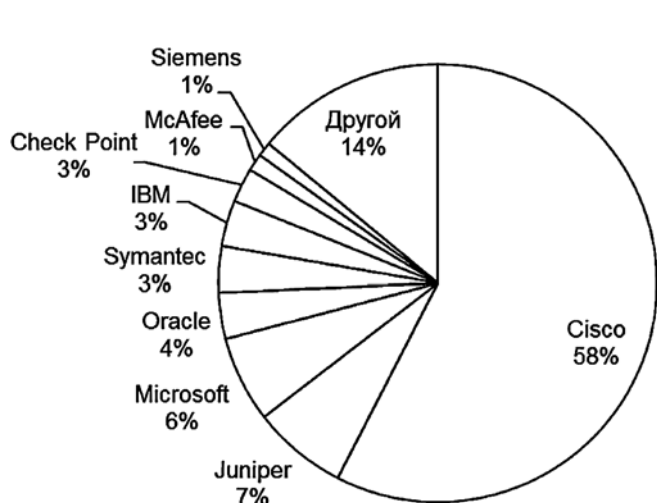


Рис. 9. Иностранные разработчики, продукция которых сертифицируется ФСТЭК России

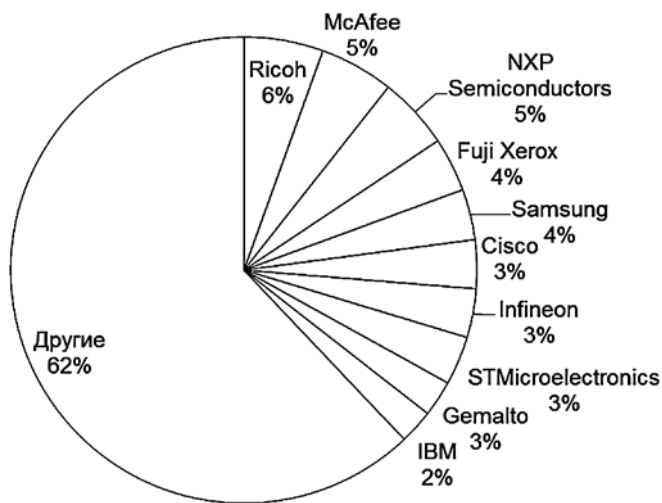


Рис. 11. Разработчики, продукция которых сертифицируется в системе Common Criteria

разработчики стали проводить сертификации в России по новым требованиям. Первые сертификации по новым требованиям были проведены зарубежными компаниями McAfee и TrendMicro. Среди отечественных разработчиков, получивших сертификаты соответствия ФСТЭК России, — "Код безопасности" и "Лаборатория Касперского".

На рис. 9 и 10 представлены иностранные и российские организации-разработчики СЗИ, наиболее часто сертифицируемые в системе сертификации ФСТЭК России за период 2011—2013 гг. Например, рис. 9 косвенно демонстрирует значимую роль продукции американской компании CISCO в создании информационной инфраструктуры нашей страны.

Соответствующая статистика по разработчикам СЗИ, прошедших сертификацию в международной системе Common Criteria, представлена на рис. 11.

Соотношение числа сертификаций СЗИ, проводимых с предоставлением исходных программных кодов за период 2011—2013 гг., представлено на рис. 12. Как известно, гарантированные оценки

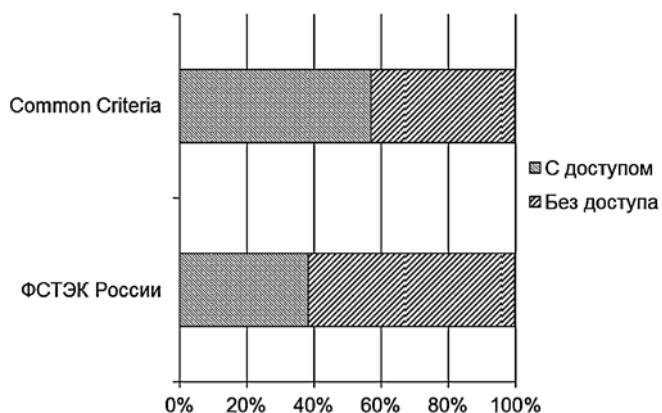


Рис. 12. Соотношение сертификаций в зависимости от доступа к исходным текстам программ



Рис. 10. Российские разработчики, продукция которых сертифицируется ФСТЭК России

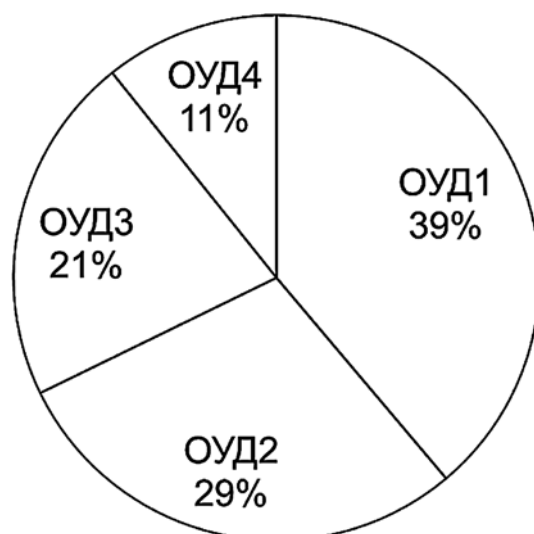


Рис. 13. Соотношение числа сертификаций в зависимости от ОУД во ФСТЭК России

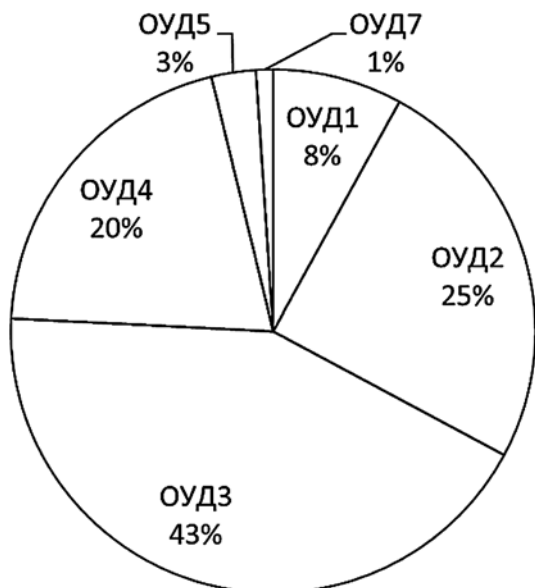


Рис. 14. Соотношение числа сертификаций в зависимости от ОУД в системе Common Criteria

уровня безопасности программных систем можно получить только при доступе к исходному коду [9]. Поэтому отставания нашей страны в этом плане должно настораживать.

Распределение числа отечественных и международных сертификаций в зависимости от оценочного уровня доверия (ОУД), подтверждение которому проверялось в ходе испытаний, представлено на рис. 13 и 14. Как известно, уровню защиты информации, составляющей государственную тайну, соответствует ОУД4+ (усиленный) [9].

### Опыт работы испытательной лаборатории

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос оценки трудоемкости независимого тестирования при проведении сертификационных испытаний по новым требованиям. Анализ, проведенный авторами исходя из опыта испытательной лаборатории,

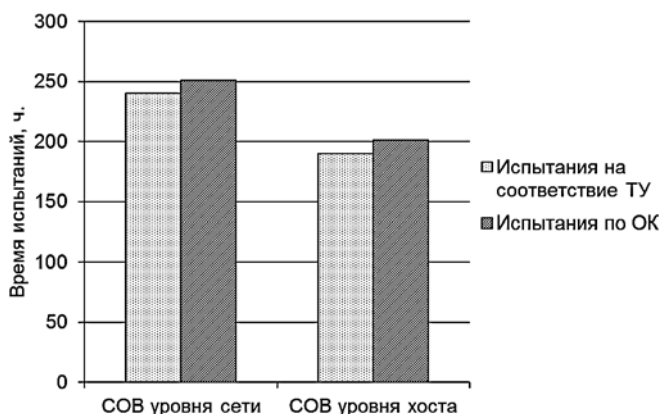


Рис. 15. Сравнительный анализ временных затрат при проведении независимого тестирования систем обнаружения вторжений

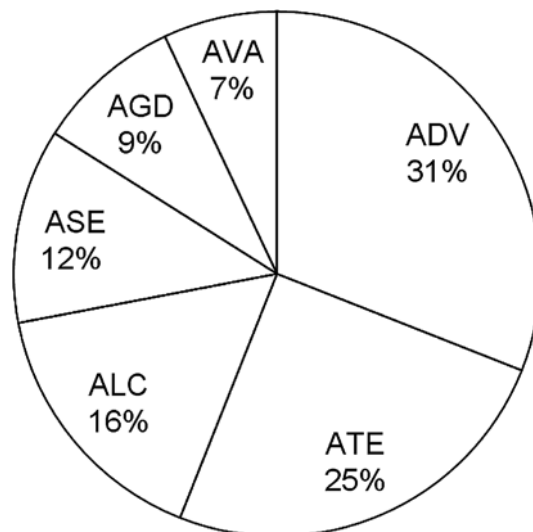


Рис. 16. Распределение затрат испытательной лаборатории при сертификации по требованиям новой нормативной базы

позволил сделать вывод о том, что плановая трудоемкость самих проводимых тестов принципиально не изменилась по сравнению с традиционным подходом. На рис. 15 представлен сравнительный анализ затрат на испытания систем обнаружения вторжений (СОВ) на соответствие техническим условиям (ТУ) и нормативным документам (НД).

Анализ затрат на проверки СЗИ по методологии ОК показал следующее распределение трудоемкости работ (по убыванию) по требованиям новой нормативной базы (рис. 16):

- анализ проектной документации на объект сертификации (ADV<sup>4</sup>);
- проведение независимого тестирования (ATE);
- анализ жизненного цикла объекта сертификации (ALC);
- анализ задания по безопасности (ASE);
- анализ эксплуатационной документации (AGD);
- проведение независимого тестирования на проникновение (AVA).

### Зарубежные тенденции развития международной базы

Представленный в работе анализ был бы не полным, если не отметить альтернативное направление развития международной системы сертификации по Common Criteria. Например, с 2012 г. National Information Assurance Partnership (NIAP) — организация, регулирующая сертификацию СЗИ в США, инициировала коренную реформу системы сертификации по схеме ОК. Основные преобразования следующие.

<sup>4</sup> Нотации указаны в соответствии с ISO 15408-3: 2009.

1. Отказ от понятия "оценочный уровень доверия". Опыт проведения сертификации по классическим ОК показал, что во многих случаях невозможно обеспечить повторяемость и воспроизводимость сертификационных испытаний (даже при сертификации на ОУД3 или ОУД4). Предлагаемые новые профили защиты содержат упрощенные требования доверия, сформулированные на основе "классического" ОУД2. Такая тенденция была авторами предсказана девять лет назад [1].

2. Для обеспечения повторяемости результатов профили защиты дополняются типовыми методиками испытаний, причем как для требований доверия, так и для функциональных требований безопасности.

3. Справочная информация (например, обоснования требований или целей безопасности) вынесена в приложение к профилям защиты.

4. Профили защиты разрабатываются техническими комитетами, в которые, как правило, входят представители разработчиков.

5. Создаются базовые профили защиты и пакеты расширений базового профиля защиты (Extended Package). Например, базовый профиль защиты на сетевое устройство задает функции безопасности, характерные для всех сетевых устройств (идентификация и аутентификация администратора, регистрация событий и т. д.), а пакет расширения базового профиля защиты содержит требования, характерные для конкретного типа СЗИ на базе сетевых устройств (например, МЭ или СОВ).

К реформе присоединились "коронованные территории": Великобритания, Австралия, Канада.

### Заключение

Проведенный анализ статистики в области "Общих критериев" позволил отметить ряд положительных моментов в сфере разработки и оценки соответствия СЗИ в нашей стране, а именно:

- стимулирование серийного производства продукции, выражающегося в постепенном уходе от сертификации по схеме "партия" к схеме "серия" ввиду того, что новые нормативные правовые акты ФСТЭК России требуют от заявителей поддержки сертифицированного ПО СЗИ на всех стадиях жизненного цикла;
- повышение реальной безопасности программных систем, так как утверждение новых нормативных правовых актов вводит обязательность выполнения процедуры "оценки уязвимостей" по всем классам защиты. Напомним, что при сертификации по традиционным руководящим документам поиск уязвимостей не являлся обязательной процедурой и выполнялся только энтузиастами в области сертификации СЗИ. Например, авторами были выявлены уязвимости в 50 % зарубежных и отечественных СЗИ;

- повышение доверия к программной продукции, в первую очередь, иностранного производства, что связано с постепенным открытием испытательным лабораториям доступа к исходным текстам со стороны крупных мировых разработчиков ПО;
- возможность для разработчиков модифицировать и обновлять свои продукты между сертификациями, представляя необходимые свидетельства об отсутствии влияния обновлений на сертифицированные функции безопасности. Это связано с тем, что впервые в российских нормативных документах формализовано понятие "инспекционный контроль" с использованием требований класса АМА "Поддержка доверия", т. е. новые профили защиты (утверждаемые ФСТЭК России) содержат требования доверия к безопасности, касающиеся возможной модификации программной продукции;
- концептуальная возможность интеграции и внедрения передовых иностранных ИТ-решений, которые прошли сертификацию по Common Criteria, т. е. когда иностранные разработчики уже разработали подобные рабочие документы и понимают процесс сертификации по новым требованиям ФСТЭК России.

В то же время надо отметить, что новые нормативные документы ФСТЭК России ввиду новизны потребуют доработки организационной и методической базы лабораторий и разработчиков, например:

- первые сертификации по линии ОК показали начальное увеличение интеллектуальных затрат у разработчиков отечественной продукции. Это связано с тем, что даже при сертификации на наиболее привлекательный 4-й класс защиты (не связанный с защитой государственной тайны) требуется достичь ОУД3, а требуемые свидетельства разработчика являются относительно новыми: корреляции с национальными стандартами практически нет, нет и методических документов-регуляторов для разработчиков СЗИ;
- недостаток реального опыта и методической информации приведет к неспособности всех без исключения аккредитованных лабораторий проводить испытания продукции по новым требованиям в самом ближайшем времени. Как вариант возможно введение практики аккредитации испытательных лабораторий по наивысшему классу защиты (ОУД), по которому лаборатория может проводить испытания.

В заключение можно сделать вывод, что сертификация СЗИ по линии "Общих критериев" имеет устойчивые перспективы в нашей стране: внедрение методологических и концептуальных основ — неизбежный процесс, как минимум, в ближайшей перспективе.

## Список литературы

1. Марков А. С., Леденко С. А., Чекалев И. А. Статистика внедрения "Общих критериев" в зарубежных странах // *Information security*. 2006. № 1/2. С. 12—15.
2. Barabanov A. V., Markov A. S., Tsirlov V. L. Russian IT Security Certification Scheme: Steps Toward Common Criteria Approach // 15th International Common Criteria Conference ICC3-2014 (9—11 September, 2014, New Delhi, India). 2014. P. 1—11.
3. Merkow M. S., Breithaupt J. *Computer Security Assurance Using the Common Criteria*. Thomson Delmar Learning, 2005. 278 p.
4. Higaki W. H. *Successful Common Criteria Evaluations: A Practical Guide for Vendors*. CreateSpace. 2010. 282 p.
5. Багаев Д. А. Требования к информационной безопасности автоматизированных систем на основе применения общих критериев // *Вопросы защиты информации*. 2009. № 2. С. 6—8.
6. Барabanov А. В., Марков А. С., Рауткин Ю. В. Оценка соответствия средств защиты информации требованиям высших оценочных уровней доверия // *Тр. Научно-исследовательского института радио*. 2012. № 3. С. 67—73.
7. Дровникова И. Г., Никитин А. А. Требования к безопасности информационных технологий автоматизированных систем на основе применения общих критериев // *Технологии техноферной безопасности*. 2013. № 3 (49). С. 24.
8. Сидак А. А. Композиционный подход к формированию требований к изделиям, реализующим функции безопасности в информационных системах. Семейства профилей защиты // *Стратегическая стабильность*. 2013. № 3 (64). С. 40—42.
9. Марков А. С., Цирлов В. Л., Барabanov А. В. Методы оценки несоответствия средств защиты информации / Под ред. А. С. Маркова. М.: Радио и связь, 2012. 192 с.
10. Барabanov А. В., Марков А. С., Цирлов В. Л. Сертификация систем обнаружения вторжений // *Открытые системы. СУБД*. 2012. № 3. С. 31—33.
11. Барabanov А. В., Марков А. С., Цирлов В. Л. Сертификация средств антивирусной защиты по новым требованиям безопасности информации // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение"*. 2012. Спецвыпуск № 5 "Информатика и системы управления". С. 272—278.
12. Барabanov А. В., Гришин М. И., Марков А. С., Цирлов В. Л. Формирование требований по безопасности информации к DLP-системам // *Вопросы радиоэлектроники*. 2013. № 2. С. 67—76.

A. V. Barabanov, Head of Department, e-mail: mail@inpo.ru,

A. S. Markov, Associate Professor, e-mail: mail@cnpo.ru, V. L. Tsirlov, Executive Director,  
NPO Echelon, Moscow

## The Conformity Assessment of Information Security Solutions According to the Common Criteria

*The information security certification in accordance with the Common Evaluation Methodology and ISO 15408 is analyzed. The analysis of statistics in the field of domestic and international certification of information security solutions are done. The overview of the new package of regulatory guidance documents FSTEC Russia is done. The certification issues through the Common Criteria for developments and testing laboratories is shown. The ways to overcome the difficulties associated with the implementation of Common Criteria are suggested. The prospects for implementation of the Common Criteria in Russian and in the world are marked.*

**Keywords:** information security, certification, information security tool, common criteria, common evaluation methodology, criteria for information technology security evaluation, ISO 15408, ISO 18045, conformity assessment

### Reference

1. Markov A. S., Ledenko S. A., Chekalev I. A. Statistika vnedreniya "Obshchikh kriteriyev" v zarubezhnykh stranakh. *Information Security*. 2006. N. 1/2. P. 12—15.
2. Barabanov A. V., Markov A. S., Tsirlov V. L. Russian IT Security Certification Scheme: Steps Toward Common Criteria Approach. *15th International Common Criteria Conference (ICC3—2014), New Delhi, India*. 2014. P. 1—11.
3. Breithaupt J., Merkow M. S. *Computer Security Assurance Using the Common Criteria*. Thomson Delmar bearing, 2005. 278 p.
4. Higaki W. H. *Successful Common Criteria Evaluations: A Practical Guide for Vendors*. CreateSpace, 2010. 282 p.
5. Bagayev D. A. Trebovaniya k informatsionnoy bezopasnosti avtomatizirovannykh sistem na osnove primeneniya obshchikh kriteriyev. *Voprrosy zashchity informatsii*. 2009. N. 2. P. 6—8.
6. Barabanov A. V., Markov A. S., Rautkin Yu. V. Otsenka sootvetstviya sredstv zashchity informatsii trebovaniyam vysshikh otsechnykh urovney doveriya. *Tr. Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*. 2012. N. 3. P. 67—73.
7. Drovnikova I. G., Nikitin A. A. Trebovaniya k bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy avtomatizirovannykh sistem na osnove primeneniya obshchikh kriteriyev. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*. 2013. N. 3 (49). P. 24.
8. Sidak A. A. Kompozitsionnyy podkhod k formirovaniyu trebovaniy k izdeliyam, realizuyushchim funktsii bezopasnosti v informatsionnykh sistemakh. semeystva profiley zashchity. *Strategicheskaya stabilnost*. 2013. N. 3 (64). P. 40—42.
9. Markov A. S., Tsirlov V. L., Barabanov A. V. *Metody otsenki nesootvetstviya sredstv zashchity informatsii*. By ed. A. S. Markov. M.: Radio i svyaz, 2012. 192 p.
10. Barabanov A. V., Markov A. S., Tsirlov V. L. Sertifikatsiya sistem obnaruzheniya vtorzheniy. *Otkrytyye sistemy. SUBD (Open Systems Journal)*. 2012. N. 3. P. 31—33.
11. Barabanov A. V., Markov A. S., Tsirlov V. L. Sertifikatsiya sredstv antivirusnoy zashchity po novym trebovaniyam bezopasnosti informatsii. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. "Priborostroyeniye"*. 2012. Spetsvyypusk N. 5 "Informatika i sistemy upravleniya". P. 272—278.
12. Barabanov A. V., Grishin M. I., Markov A. S., Tsirlov V. L. Formirovaniye trebovaniy po bezopasnosti informatsii k DLP-sistemam. *Voprrosy radioelektroniki*. 2013. N. 2. P. 67—76.

УДК 519.857

**В. И. Струченков**, д-р техн. наук, проф., e-mail: str1942@mail.ru,  
Московский государственный технический университет радиотехники,  
электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА)

## Новый алгоритм поэлементного расчета трасс в САПР линейных сооружений

*Рассматривается задача вычисления декартовых координат точек трасс линейных сооружений. Предлагается алгоритм последовательного поэлементного расчета вместо традиционного использования вершин углов поворота трассы. Для клотоид, сопрягающих две круговые кривые близких радиусов, даются новые расчетные формулы на основе разложения в степенной ряд Маклорена в текущей системе координат.*

**Ключевые слова:** трасса, план, продольный профиль, клотоида, ряд Маклорена, оценка точности

### Введение

Традиционно трехмерная кривая — трасса линейного сооружения, к числу которых относятся железные и автомобильные дороги, трубопроводы различного назначения, каналы и др., представляется в виде двух плоских кривых: план и продольный профиль. План трассы — это ее проекция на горизонтальную плоскость  $XOY$ , а продольный профиль — зависимость  $Z(s)$ , где  $Z$  — аппликата, а  $s$  — длина кривой в плане начиная от заданной точки. Другими словами, продольный профиль — это кривая, получаемая при развертке на плоскость вертикальной поверхности, у которой направляющая — это план трассы, а образующая параллельна оси  $Z$ .

И план, и продольный профиль трассы состоят из элементов, в качестве которых в зависимости от вида сооружения используются отрезки прямых и дуги окружностей при возможном сопряжении дуг окружностей с прямыми и между собой кривыми переходной кривизны. Возможно также использование и других элементов, в частности парабол. На дорогах переходные кривые устраиваются для обеспечения безопасности и плавности движения посредством соблюдения непрерывности не только касательной (первой производной), но кривизны проектируемой трассы в плане. В качестве переходных кривых наиболее часто используются клотоиды. При проектировании автомобильных дорог клотоиды могут использоваться как отдельные элементы. В пределах клотоиды кривизна изменяется линейно с изменением длины.

При проектировании железных дорог в пределах круговых кривых рассчитывается возвышение  $h$  наружного рельса, которое прямо пропорционально квадрату расчетной скорости движения и обратно пропорционально радиусу кривой. В пределах пере-

ходной кривой возвышение наружного рельса меняется линейно от  $h$  до нуля. Уклон отвода возвышения наружного рельса, т. е. скорость его изменения, ограничен заданными пределами. Поэтому ограничена скорость изменения кривизны в пределах клотоиды, т. е. параметр линейной зависимости кривизны клотоиды от длины.

Аналогичная ситуация имеет место при проектировании автодорог при устройстве виража в пределах круговых кривых и при его отгоне в пределах переходных кривых.

Вычисление координат любой точки на таких элементах, как отрезки прямых, окружностей, парабол и клотоид, сопрягающих прямые и окружности, никаких трудностей не вызывает. В частности, при сопряжении прямых и окружностей используются зависимости  $x(l)$ ,  $y(l)$  декартовых координат точек клотоиды от ее длины начиная от точки с нулевой кривизной (точка  $O$  на рис. 1).

При малых значениях  $l$ , когда  $l \approx x$ , клотоида может быть заменена кубической параболой. В других случаях зависимости  $x(l)$  и  $y(l)$  представляются степенными рядами Маклорена в точке с нулевой кривизной [1].

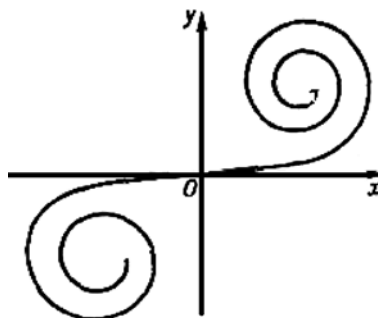


Рис. 1. Клотоида (спираль Корню)

Если клотоида используется для сопряжения двух окружностей, то координаты ее точек по-прежнему могут вычисляться на основе того же разложения в степенной ряд в точке с нулевой кривизной, которая в этом случае находится за пределами отрезка клотоиды, сопрягающего две окружности.

Характерно, что при проектировании вручную, а также при интерактивном проектировании, когда проектное решение тем или иным способом задает проектант, некоторые формально допустимые варианты сопряжения элементов отбраковываются. Однако при разработке проектирующих алгоритмов и программ возникают ситуации, в которых традиционные методы расчета оказываются непригодными [2].

Целью настоящей статьи является исследование подобных ситуаций и разработка нового универсального расчетного алгоритма.

### Традиционный расчет элементов дорожных трасс

Традиционно расчет сопряжений основывается на использовании углов поворота трассы (рис. 2). Исходными данными для расчета являются: угол поворота и декартовы координаты его вершины, радиус круговой кривой  $R$  и длины клотоид  $L_1$  и  $L_2$ . Расчет начинается с определения расстояния  $T$  от точки начала клотоиды (точка  $A$  на рис. 2) до вершины угла. Затем используется местная система координат с центром в точке  $A$ , ось  $X$  которой направлена по стороне угла к вершине.

С использованием разложения в ряд для текущего значения длины клотоиды можно вычислить координаты  $X$  и  $Y$  в местной системе координат. Затем аналогично можно рассчитать координаты точек для правой клотоиды относительно другой стороны угла.

Натуральное уравнение клотоиды записывается в виде  $\sigma = kL$ , где  $\sigma$  — текущая кривизна, а  $L$  — длина клотоиды от точки с нулевой кривизной до текущей точки. Параметр  $k$  определяет скорость изменения кривизны.

Для расчета используются ряды

$$\begin{aligned} X &= L \left( 1 - \frac{L^4 k^2}{40} + \frac{L^8 k^4}{3456} - \dots \right); \\ Y &= \frac{L^3 k}{6} \left( 1 - \frac{L^4 k^2}{56} + \frac{L^8 k^4}{7040} - \dots \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $R$  — радиус круговой кривой,  $k = 1/(L_1 R)$  при расчете клотоиды слева и  $k = 1/(L_2 R)$  при расчете клотоиды справа.

Ряды (1) сходятся быстро, и обычно трех и даже двух членов ряда достаточно для вычисления координат с требуемой на практике точностью.

При сопряжении клотоидой двух окружностей с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  соответственно в начальной точке  $A$  и конечной точке  $B$  (рис. 3) координаты промежуточных точек клотоиды можно вычислить с использованием тех же рядов (1).

Для этого нужно выполнить следующие действия.

1. Вычислить параметр клотоиды

$$k = (1/R_2 - 1/R_1)/L_c, \quad (2)$$

где  $L_c$  — длина отрезка сопрягающей клотоиды.

2. Вычислить  $L_0 = 1/R_1/k$  — длину клотоиды от точки с нулевой кривизной до начала сопрягающей клотоиды (точка  $A$  на рис. 3).

3. Вместо текущей длины  $L$  в ряды для  $X$  и  $Y$  надо подставить  $L_0$  и вычислить декартовы координаты  $x_0, y_0$  точки  $A$  в системе, начало которой находится в точке нулевой кривизны, а ось  $X$  направлена по касательной к клотоиде в этой начальной точке (система  $XOY$  на рис. 3).

4. С использованием тех же рядов, подставляя в них  $L_0 + L$ , вычислить координаты  $x_1, y_1$  текущей точки сопрягающей клотоиды в этой же системе. В частности, для точки  $B$  нужно подставлять  $L_0 + L_c$ .

5. Вычислить угол  $\varphi = kL_0^2/2$ . Это угол между касательной к клотоиде в точке  $A$  и осью  $X$  системы, в которой вычислены координаты точек (система  $XOY$ ).

6. Зная угол  $\psi$  касательной к клотоиде в точке  $A$  с осью  $X$  той системы, в которой мы хотим знать координаты промежуточных точек (система  $X_1 O_1 Y_1$  на рис. 3), нужно осуществить пересчет координат. При этом угол поворота одной системы относительно другой равен  $\beta = \psi - \varphi$ . На рис. 3  $\varphi < 0$ , а  $\psi > 0$ . Если обозначить  $\xi, \eta$  координаты начала

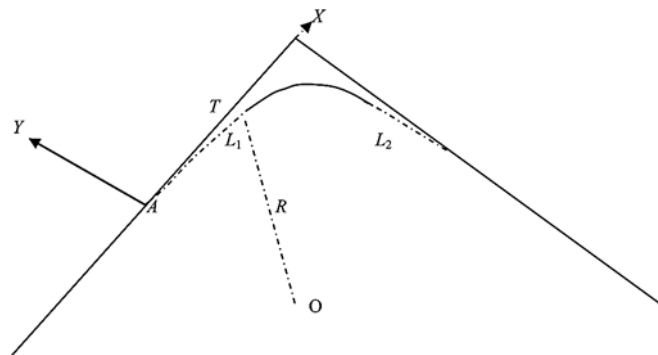


Рис. 2. К расчету сторон угла поворота

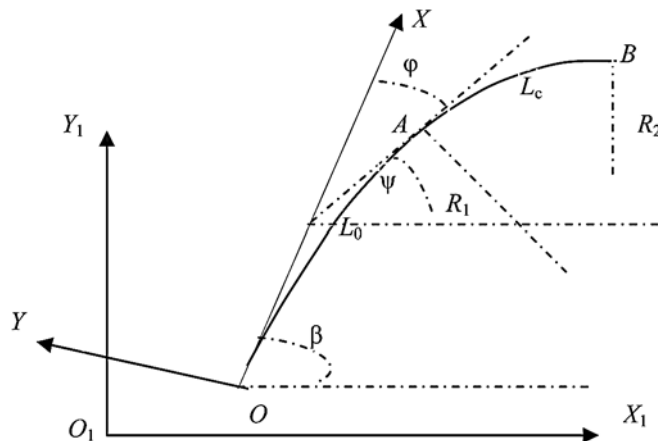


Рис. 3. К расчету сопряжения двух окружностей клотоидой



отрезка сопрягающей клотоиды (точка  $A$  на рис. 3) в "рабочей" системе  $X_1 O_1 Y_1$ , то координаты  $\xi_1, \eta_1$  точки сопрягающей клотоиды при длине  $L$  вместо  $x_1, y_1$  в этой системе будут равны

$$\xi_1 = \xi + (x_1 - x_0)\cos\beta - (y_1 - y_0)\sin\beta;$$

$$\eta_1 = \eta + (x_1 - x_0)\sin\beta - (y_1 - y_0)\cos\beta.$$

Если две сопрягаемые окружности имеют близкие значения радиусов и расстояние между их центрами значительно, то длина дуги  $L_0$  от начала клотоиды (т. е. от точки с нулевой кривизной) до точки на окружности (точка  $A$  на рис. 3) может во много раз превосходить длину отрезка клотоиды, сопрягающего окружности, а угол поворота может превышать 30 рад, т. е. число витков клотоиды может быть 5 и более, и реальная ситуация будет отличная от рис. 3. В таких случаях возникает вопрос о целесообразности использования изложенного способа вычислений и вообще о возможности обеспечения требуемой точности расчета координат, например до 0,01 м. Дело в том, что, несмотря на то что теоретически ряды (1) для расчета координат сходятся при любых значениях длины клотоиды и угла поворота, практически при большом числе членов ряда проблематично обеспечить требуемую точность вычислений из-за ошибок, обусловленных тем, что разрядная сетка компьютера конечна и увеличение числа вычисляемых членов ряда может и не дать увеличения точности расчета.

В таблице для различных значений радиусов  $R_1$  и  $R_2$ , длины сопрягающей их клотоиды  $L_c$  приведены значения  $L_0$  и угла  $\varphi$ . Линейные величины представлены в метрах, а угол — округленно в радианах. Кроме того, в этой таблице представлены ошибки  $\Delta x$  и  $\Delta y$  вычисления координат точек клотоиды при заданных координатах ее начала (точка  $A$  на рис. 3).

Способ вычисления этих ошибок станет ясен из дальнейшего изложения. Расчеты прекращались, когда очередной член ряда становился меньше  $10^{-6}$ . Уменьшение этой константы, как и увеличение ее до  $10^{-5}$ , практически не меняло результат.

Наибольшее влияние на точность вычисления координат оказывает разность радиусов сопрягаемых кривых.

Расчет параметров сопряжения кривых близких радиусов

$R_1$	$R_2$	$L_c$	$L_0$	$\varphi$	$\Delta x$	$\Delta y$
200	201	50	10 050	25	0,0002	0,0004
200	201	60	12 060	30	0,04	0,05
200	201	70	14 070	35	6,12	2,50
400	401	60	24 060	30	0,07	0,08
400	401	70	28 070	35	15,45	12,69
800	801	60	48 060	30	0,13	0,12
800	801,4	80	45 794	29	0,042	0,036
800	801,5	80	42 746	26	0,004	0,006
2000	2001,2	70	116 736	29	0,20	0,23
2000	2001,2	80	133 414	33	13,43	12,07
2000	2001,4	80	114 365	28	0,083	0,077

При проектировании вручную, а также при использовании различного рода алгоритмов интерактивного проектирования в САПР такие ситуации круговых кривых близких радиусов с переходными кривыми, как правило, не рассматриваются. Две окружности близких радиусов заменяются одной окружностью или сопрягаются встык с общей касательной. Наличие двух кривых близких радиусов с существенным расстоянием между их центрами и возможность их сопряжения клотоидой при этом просто игнорируются. При проектировании железных дорог в рассматриваемой ситуации упоминавшееся выше ограничение на параметр клотоиды не действует, так как возвышение наружного рельса проектируется в расчете на меньший из сопрягаемых радиусов и остается постоянным в пределах всей кривой, включая клотоиду. Отвод возвышения наружного рельса осуществляется на конечных клотоидах, т. е. при переходе на прямые.

При использовании итерационных алгоритмов оптимизации приходится считаться с тем, что в итерационном процессе изменяющиеся радиусы двух смежных окружностей, сопрягаемых клотоидой, принимают близкие значения, а расстояние между их центрами не позволяет заменить их одной окружностью или сопрягать встык, как это рекомендуется в случае, если разность кривизны окружностей меньше заданной. В связи с этим был разработан новый алгоритм расчета координат при сопряжении клотоидой двух окружностей, обеспечивающий требуемую точность вычислений при близких значениях радиусов сопрягаемых круговых кривых.

### Новый алгоритм расчета координат точек сопрягающей клотоиды

Обозначим декартовы координаты начальной точки  $A$  клотоиды, сопрягающей круговые кривые радиусов  $R_1$  и  $R_2$ , в некоторой системе координат через  $x_0, y_0$ , угол касательной в этой точке с осью  $X$  через  $\varphi_0$  и кривизну через  $\sigma_0 = 1/R_1$ . Если  $L$  — текущая длина клотоиды начиная от точки  $A$ , в которой  $L = 0$ , и до текущей точки  $C$ , координаты которой мы будем вычислять, то в соответствии с определением клотоиды кривизна в точке  $C$

$$\sigma(L) = \sigma_0 + kL.$$

Здесь  $k$  — параметр клотоиды, вычисляемый по формуле (2). Поскольку  $d\varphi(L) = \sigma(L)dL$ , то

$$\varphi(L) = \varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2.$$

Далее,  $dx(L) = \cos\varphi(L)dL$  и  $dy(L) = \sin\varphi(L)dL$ . В итоге получаем

$$x = x_0 + \int_0^L \cos(\varphi_0 + \sigma_0 t + \kappa t^2/2) dt;$$

$$y = y_0 + \int_0^L \sin(\varphi_0 + \sigma_0 t + \kappa t^2/2) dt.$$

Эти интегралы отличаются наличием  $\varphi_0$  и  $\sigma_0$  от используемых в оптике известных интегралов Френеля [3, 4], на основе которых и были получены упомянутые выше разложения в ряды декартовых координат точек клотоиды. Если  $\sigma_0 = 0$ , то наличие  $\varphi_0$  несущественно, так как можно вычислить координаты по известным разложениям в ряды, полагая  $\varphi_0 = 0$ , а затем пересчитать их с учетом поворота на  $\varphi_0$ . Наличие  $\sigma_0$  в подынтегральных функциях существенно для дальнейшего.

Обозначим эти интегралы через  $I_x(L)$  и  $I_y(L)$  соответственно. Они не выражаются через элементарные функции, поэтому заменим их разложением в степенные ряды Маклорена в точке  $L = 0$ :

$$I_x(L) = I_x(0) + \sum_{i=1}^{\infty} I_x^{(i)}(0) \frac{L^i}{i!};$$

$$I_y(L) = I_y(0) + \sum_{i=1}^{\infty} I_y^{(i)}(0) \frac{L^i}{i!}.$$

Рассмотрим разложение в ряд  $I_x(L)$ :

$$I_x(0) = 0;$$

$$I_x^{(1)}(L) = \frac{dI_x}{dL} = \cos(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2);$$

$$I_x^{(2)}(L) = \frac{d^2 I_x}{dL^2} = -(\sigma_0 + kL) \sin(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2);$$

$$I_x^{(3)}(L) = \frac{d^3 I_x}{dL^3} = -k \sin(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2) - \quad (3)$$

$$- (\sigma_0 + kL)^2 \cos(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2);$$

$$I_x^{(4)}(L) = (-2(\sigma_0 + kL) - k(\sigma_0 + kL)) \cos(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2) + (\sigma_0 + kL)^3 \sin(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2).$$

Отметим следующие закономерности в вычислении производных, рассматривая каждую из них как многочлен по  $\sigma_0 + kL$ .

1. Производные нечетных порядков содержат слагаемые только с четными степенями  $\sigma_0 + kL$  начиная с нулевой и кончая  $n - 1$ , где  $n$  — порядок производной, а производные четных порядков (начиная со второй) содержат слагаемые только с нечетными степенями  $\sigma_0 + kL$ , начиная с первой и кончая  $n - 1$ .

2. В каждом слагаемом, кроме степени  $\sigma_0 + kL$ , содержится в множителе  $\sin(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$  или  $\cos(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$ . Поэтому общий вид слагаемого можно представить в виде  $A(k) (\sigma_0 + kL)^p \times \sin(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$  или  $B(k) (\sigma_0 + kL)^p \cos(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$ , причем при переходе к очередному ненулевому слагаемому многочлена происходит замена:  $\sin$  на  $\cos$  или  $\cos$  на  $\sin$ . Множители  $A(k)$  и  $B(k)$  в каждом слагаемом и в каждой производной различны.

В справедливости наличия отмеченной структуры формул для вычисления производных легко убе-

диться с помощью математической индукции, так как при дифференцировании очередной производной, имеющей такую структуру, и рассматривая последовательно, как вычисляются слагаемые нового многочлена из слагаемых имеющегося, замечаем следующее:

- при  $p > 0$ , дифференцируя  $(\sigma_0 + kL)^p$ , получаем те же множители, но вместо  $(\sigma_0 + kL)^p$  имеем  $pk(\sigma_0 + kL)^{p-1}$ . Это соответствует шагу влево по слагаемым многочлена. Дифференцируя  $\sin(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$ , получаем  $A(k)(\sigma_0 + kL)^{p+1} \times \cos(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$ , а дифференцируя  $\cos(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$ , получаем  $-B(k)(\sigma_0 + kL)^{p+1} \times \sin(\varphi_0 + \sigma_0 L + kL^2/2)$ . Это соответствует шагу вправо по строке слагаемых многочлена;
- при  $p = 0$  возможен только шаг вправо с тем же результатом.

При подстановке  $L = 0$  в многочлен для производной вместо соответствующего слагаемого получаем  $A(k)\sigma_0^p \sin \varphi_0$  или  $B(k)\sigma_0^p \cos \varphi_0$ .

Таким образом, каждое слагаемое нового многочлена  $(\sigma_0 + kL)^r$  (кроме первого при  $r = 0$  и последнего) получается из двух слагаемых имеющегося многочлена соответственно со степенями  $r - 1$  (при шаге вправо) и  $r + 1$  (при шаге влево). При  $r = 0$  имеем результат только шага влево. А последний член получается только при шаге вправо. Это наглядно показано при записи формулы (3) для  $I_x^{(4)}(L)$ , в которой  $-k(\sigma_0 + kL)$  получено при шаге вправо, а  $-2(\sigma_0 + kL)$  получено при шаге влево.

Рассмотренные особенности формирования слагаемых очередной производной позволили создать алгоритм вычисления  $I_x^{(p+1)}(0)$  путем преобразования слагаемых  $I_x^{(p)}(0)$ :

$$I_x^{(1)}(0) = \cos \varphi_0.$$

Введем следующие обозначения:

$i$  — номер последней вычисленной производной. Будем вычислять очередную производную и соответствующий член ряда для  $I_x(L)$ , преобразуя слагаемые последней из вычисленных производных во внешнем цикле от  $i = 1$  до большого числа, например до 100, прерывая цикл при получении очередного члена ряда, не равного нулю и меньшего заданного числа  $\varepsilon$ , например  $\varepsilon = 10^{-6}$ .

Будем запоминать в массиве *prev* слагаемые в многочлене для очередной производной до их умножения на синус или косинус. Нумерация элементов массива начинается с 1. До начала внешнего цикла все элементы массива *prev* равны нулю, кроме *prev*(1) = 1.

Производную в нуле обозначаем через  $s$ , а соответствующую степень  $L$ , деленную на нужный факториал, через  $st$ . Соответственно, очередной член ряда равен  $s \cdot st$ .

До начала внешнего цикла  $s = \cos\varphi_0$ ;  $st = L$ ,  $x = x_0 + L\cos\varphi_0$ .

Введем два признака наличия синуса или косинуса при вычислении очередного слагаемого производной:  $prn$  — в начале преобразуемой строки и  $prt$  — для текущего слагаемого. Каждый признак равен 1, если есть множитель синус, и минус 1, если есть множитель косинус. До входа во внешний цикл  $prn = -1$ , так как преобразуемая строка  $\cos\varphi_0$ .

Во внешнем цикле выполняем следующие действия:

$prt$  приравниваем к  $prn$ ; обнуляем  $s$ ;  $st$  умножаем на  $L/(i+1)$  — это заготовка для умножения на вычисляемую во внутреннем цикле производную.

Далее,  $j$  — показатель степени  $\sigma_0 + kL$  в первом слагаемом вычисляемой строки. Фактически  $j = 1$  при четном  $i$  и  $j = 0$  при нечетном  $i$ . На первом шаге  $j = 0$ .

Внутренний цикл выполняем с шагом 2 от  $j$  до  $i-1$ . Параметр цикла обозначим через  $j1$  — это показатель степени  $\sigma_0$  в очередном слагаемом вычисляемой производной. Если  $j1 > 0$ , выполняем шаг влево, т. е. добавляем к текущему значению  $prev(j1)$  произведение  $s1 = prev(j1+1) \cdot j1 \cdot k/\sigma_0$ . Вычисляем  $sc = \sin\varphi_0$  при  $prt = 1$  или  $sc = \cos\varphi_0$  в противном случае. Текущее значение производной  $s$  увеличиваем на  $s1 \cdot sc$ .

Далее делаем шаг вправо, что всегда возможно. Он соответствует дифференцированию синуса или косинуса, поэтому  $sc = \cos\varphi_0$  при  $prt = 1$  или  $sc = \sin\varphi_0$  в противном случае. Значение  $prev(j1+2)$  получаем из  $prev(j1+1)$ . Для этого увеличиваем  $prev(j1+2)$  на  $prev(j1+1) \cdot prt \cdot \sigma_0$ . Умножением на  $prt$  учитывается изменение знака при дифференцировании косинуса, а умножением на  $\sigma_0$  учитывается увеличение показателя степени  $\sigma_0 + kL$  при шаге вправо. Текущее значение производной  $s$  увеличивается на  $prev(j1+1) \cdot prt \cdot \sigma_0 \cdot sc$ . Меняем знак  $prt$  при переходе к следующему слагаемому. На этом шаг вправо закончен.

Обнуляем  $prev(j1+1)$  и повторяем внутренний цикл.

После исчерпания внутреннего цикла вычислены значение  $s$  очередной производной и все коэффициенты при синусах и косинусах в ее слагаемых, которые хранятся в массиве  $prev$  и будут использоваться для вычисления следующей производной.

Новый член ряда равен  $s \cdot st$ , значение  $x$  увеличиваем на  $s \cdot st$ , и при  $|s \cdot st| < \varepsilon$  расчет закончен, если при этом вычислено более двух производных. Иначе при  $\varphi_0 = 0$  вторая производная равна нулю и счет заканчивается с неверным результатом.

Если счет продолжается, то при  $j = 0$  меняем знак  $prn$  и переходим к повторению внешнего цикла. Если число его повторений, т. е. порядок вычисленной производной, превышает заданное число (например, 100), то это свидетельствует об ошибке и счет целесообразно прекратить.

Алгоритм для разложения в ряд  $I_y(L)$  аналогичен изложенному. Первая производная в нуле равна  $\sin\varphi_0$ , соответственно,  $prn = 1$  и первый член ряда равен  $L \sin\varphi_0$ . Других изменений нет.

Некоторые усовершенствования достигаются при переходе к системе координат, в которой ось  $OX$  направлена по касательной к клотоиду в начальной точке  $A(x_0, y_0)$ . В этой системе  $\varphi_0 = 0$ ,  $\sin\varphi_0 = 0$  и  $\cos\varphi_0 = 1$ . Поэтому нет необходимости вычислять  $sc$ , а при вычислении  $s$  нужно добавлять только множители при  $\cos\varphi_0$ , т. е. при  $prt = -1$ . Однако множители при  $\sin\varphi_0$  все равно придется вычислять и хранить для вычисления следующей производной. По завершении вычисления координат необходимо пересчитать их в исходную систему.

С помощью изложенного алгоритма были вычислены координаты точек клотоид, сопрягающих две окружности близких радиусов, и вычислена ошибка в координатах при их расчете от точки с нулевой кривизной.

Для этого вычислялся параметр  $k$  клотоиды по формуле (2), длина  $L_0 = 1/R_1/k$  от точки с нулевой кривизной до начала сопрягающей клотоиды, длина которой  $L_c$ . Для длин, кратных 20 м, с использованием рядов (1) вычислялись и запоминались координаты соответствующих точек, вплоть до длины  $L_0 + L_c$ . Новый алгоритм применялся для последовательного пересчета координат.

1. Вычислялись координаты, угол касательной с осью  $X$  и кривизна при длине клотоиды 20 м начиная от точки с нулевой кривизной. Эти данные использовались как начальные для вычисления координат, угла и кривизны при  $L = 20$  м. И так в цикле с пересчетом начальных данных до исчерпания длины  $L_0 + L_c$ . Получался новый массив координат.

2. Соответствующие координаты из двух массивов сравнивались и вычислялась максимальная по абсолютной величине ошибка по  $x$  и по  $y$ . Именно эти величины занесены в таблицу.

Во избежание накопления ошибок при последовательном пересчете расчеты по новому алгоритму выполнялись с  $\varepsilon = 10^{-6}$ . Малые значения длин  $L = 20$  м при втором расчете позволяют получать результат с высокой точностью.

## Последовательный поэлементный расчет координат

Если заданы начальная точка, начальное направление (угол  $\varphi_0$  с осью  $X$ ), последовательность элементов и их длины, а также радиусы круговых кривых, то алгоритм расчета следующий.

1. Для прямой на расстоянии  $s$  от начальной точки прямой с координатами  $x_0, y_0$  справедливо  $x(s) = x_0 + s\cos\varphi_0$ ;  $y(s) = y_0 + s\sin\varphi_0$ .

При  $s = L$ , где  $L$  — длина прямой, получаем координаты ее конечной точки.

2. Для окружности при повороте против часовой стрелки радиус считаем положительным, а при повороте по часовой стрелке — отрицательным.

Вычисляем угол поворота  $\Delta\varphi = s/R$ . В системе координат с осью  $X$ , направленной по касательной к окружности в начальной точке, и с центром в начальной точке

$$x' = R\sin\Delta\varphi \text{ и } y' = R(1 - \cos\Delta\varphi).$$

В исходной системе координат

$$x(s) = x_0 + x'\cos\varphi_0 - y'\sin\varphi_0$$

$$\text{и } y(s) = y_0 + y'\cos\varphi_0 + x'\sin\varphi_0; \varphi(s) = \varphi_0 + \Delta\varphi.$$

При  $s = L$ , где  $L$  — длина окружности, получаем данные для расчета следующего элемента, т. е. новые  $x_0$ ,  $y_0$  и  $\varphi_0$ .

При расчете клотоиды, сопрягающей прямую и окружность или окружность и прямую или две окружности, сначала вычисляем параметр клотоиды. Этот параметр может быть и отрицательным, что не мешает использовать изложенный универсальный алгоритм расчета. При нулевой кривизне в начальной точке можно использовать ряды (1), но для сопряжения двух окружностей целесообразно использовать новый алгоритм, изложенный выше.

Последовательно вычисляя координаты промежуточных и конечных точек очередного элемента и углы касательной с осью  $X$  в исходной системе координат, мы получим полный расчет кривой.

Если требуются углы поворота и координаты их вершин, то они могут быть вычислены через координаты начальной точки клотоиды при сходе с прямой и конечной точки клотоиды при выходе на прямую и соответствующие углы этих прямых с осью  $X$ . Если внутри такого угла поворота содержатся несколько круговых кривых, сопрягаемых клотоидами или встык, то в средней точке очередной клотоиды или в точке сопряжения окружностей можно вычислить угол касательной с осью  $X$  и использовать эту касательную как одну из сторон угла поворота и т. д.

## Заключение

В итоге выполненной работы можно констатировать следующее.

При расчете сопряжений клотоидой прямой и круговой кривой никаких проблем с точностью вычисления координат точек клотоиды не возникает даже при угле поворота клотоиды  $2\pi$  и длине клотоиды до 1000 м. Однако при сопряжении двух круговых кривых близких радиусов при длине отрезка сопрягающей клотоиды в несколько десятков метров и радиусах кривых от 200 до 4000 м возможны существенные ошибки, если использовать классические ряды для координат точек клотоиды. В этих случаях целесообразно использовать изложенный новый алгоритм разложения координат в степенные ряды.

При компьютерном проектировании этот алгоритм обеспечивает необходимую точность вычислений практически при любых радиусах сопрягаемых круговых кривых и их расположении, что позволяет избежать прерывания итерационного процесса и замены двух окружностей одной или еще каких-либо действий. Этот алгоритм использован при разработке нового алгоритма проектирования трасс реконструируемых железных дорог на основе динамического программирования, который предполагается изложить в отдельной статье.

## Список литературы

1. **Кантор И. И.** Изыскание и проектирование железных дорог. М.: Академкнига, 2003.
2. **Струченков В. И.** О различных подходах к автоматизации проектирования трасс линейных сооружений // Информационные технологии. 2013. № 12.
3. **Oldham K. B., Myland J. C., Spanier J.** An atlas of function. Springer, 2008.
4. **Бейтман Г., Эрдеи А.** Высшие трансцендентные функции. М.: Наука, 1974.

**V. I. Struchenkov**, Professor, e-mail: strl942@mail.ru

Moscow State University of Radio Engineering, Electronics and Automation, Moscow, Russia

## New Algorithm for Perelement Calculation of Line Structures Routes

*Under study is the problem of calculation of the Cartesian coordinates of points of the line structures routes: railways and roads, pipelines, etc. Plan and longitudinal profile of the route can contain straight-line segments, circles, parabolas, and spiral. A consistent per element calculation from a given starting point and the initial direction to the end point is proposed. Found that when calculating the coordinates of clothoid points, connecting two circular curves of nearby radii using the power series expansion at the point with zero curvature it is possible essential errors due to inaccurate representation of numbers in a computer. A new algorithm for the calculation with the power series expansion at the interface point between the circle and the clothoid is proposed. The algorithm provides the required accuracy of calculation when connecting circular curves have nearby radii.*

**Keywords:** route, plan, longitudinal profile, clothoid, connection of circles, power series, calculation errors, Maclaurin

### References

1. **Kantor I. I.** *Izyskanie i proektirovanie zheleznyh dorog.* M.: Akadem-kniga, 2003.
2. **Struchenkov V. I.** O razlichnyh podhodah k avtomatizacii proektirovanija trass linejnyh sooruzhenij. *Informacionnye tehnologii.* 2013. N. 12.

3. **Oldham K. B., Myland J. C., Spairter J.** *An atlas of function.* Springer, 2008.
4. **Bejtmán G., Jerdeji A.** *Vysshie transcendentnye funkicii.* M.: Nauka, 1974.

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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

УДК 519.856

Л. Е. Мистров, д-р техн. наук, проф., e-mail: mistrov\_le@mail.ru,  
Центральный филиал ФГБОУ ВПО "Российская академия правосудия", г. Воронеж

### Метод синтеза стратегий управления конфликтной устойчивостью социально-экономических организаций

*Предлагается метод синтеза стратегий управления социально-экономическими организациями на основе методов индивидуального и группового информационного воздействия для достижения конфликтной устойчивости их функционирования в условиях конкурентного активного и/или информационного противодействия. В основу метода положено использование методов погрупповой оптимизации, последовательного назначения единиц ресурса, ветвей и границ.*

**Ключевые слова:** социально-экономическая организация (система), конкуренция, конфликт, активное и/или информационное воздействие, конфликтная устойчивость, стратегия управления, управляющий, исполнительный и информационно-обеспечивающий элемент, методы и средства индивидуального и группового информационного воздействия

#### 1. Общие положения

Современный этап развития социально-экономических организаций (СЭО) характеризуется расширением общей конъюнктуры рынка товаров/услуг и конъюнктуры входящих в их структуру конкретных видов предпринимательской деятельности. Конъюнктура рынка определяет положение рыночных отношений, сложившихся между его участниками, а конъюнктура конкретных рынков характеризует его состояние, включающее в себя совокупность взаимосвязанных конкурентных условий. В этих условиях предпринимательская деятельность представляет собой многогранную совокупность взаимосвязанных направлений, основным из которых является реализация целевых операций в предметной области СЭО для достижения требуемого результата.

Основу предпринимательской деятельности СЭО составляют анализ информации о конкурентной среде и процесс принятия решения, который зависит от множества влияющих на конечный результат характеристик. К таким характеристикам относятся объемы привлекаемых, выделенных и размещаемых ресурсов, а также продолжительность сроков их использования. Все эти характеристики функционально связаны между собой, "имеют противоположные тенденции изменения, и вариация любого из них приводит к снижению эффективности функционирования СЭО. Ее функционирование, рас-

ширение или сокращение, объем спроса и предложений определяются конъюнктурой, особенностями которой являются непостоянство, изменчивость и частые колебания, обусловленные возникновением и развитием конкуренции, проявляющейся в форме конфликта — "соперничество". Исходя из этого, эффективность принимаемых решений СЭО находится в прямой зависимости от их конфликтного взаимодействия и складывающейся конъюнктуры на рынке товаров/услуг и формируемых на этой основе направлений использования различного назначения ресурсов.

В общем случае СЭО предназначена для выполнения с заданной эффективностью некоторой совокупности целевых задач, связанных, например, с выпуском и реализацией произведенной продукции, поиском рынков ее сбыта, с проведением различного рода целевых операции и т. п., независимо от условий конфликта. Наличие конкурентной среды обусловило дополнение целевой функции СЭО оборонительной и наступательной функциями для нивелирования наступательных действий конкурирующей стороны в целях обеспечения ее конфликтной устойчивости развития. Реализация оборонительной функции достигается защитой элементов СЭО, а реализация наступательной функции — нарушением до требуемого уровня функционирования элементов конкурирующих СЭО.

Все условия предпринимательской деятельности СЭО по степени влияния на эффективность их функционирования условно делятся на три группы.

*1-я группа.* Наиболее простыми являются детерминированные процессы, не связанные с какими-либо случайностями, когда выбор некоторого закона управления функционированием СЭО определяет ход и результаты ее применения.

*2-я группа.* Более сложными процессами функционирования СЭО являются стохастические процессы, протекающие в условиях воздействия случайных факторов, законы распределения которых известны. В этом случае использование определенного закона управления применением СЭО однозначно определяет распределение вероятностей ее состояний как объекта управления. Основой разрешения такого рода процессов является использование методов теории принятия статистически ненадежных решений в условиях неопределенности [1] и теории статистических игр [2] ("игры с природой") на основе анализа априорной статистической информации о возможных типовых условиях управления применением СЭО.

*3-я группа.* Наиболее сложным процессом функционирования СЭО является выполнение ею задач в условиях организованного стохастического активного и/или информационного конкурентного воздействия, законы распределения которого неизвестны, но могут быть определены исходя из принципа максимума [3], обеспечивающего поиск оптимального управления применением СЭО среди множества возможных способов противодействия (поиска "огibaющей" по стратегиям поведения) конкурирующей стороны. Так как вероятностные законы распределения данных факторов неизвестны, то процессы управления применением СЭО являются уникальными, дискретными и конечными (заканчивающимися за  $n$ -е число этапов при снижении жизнедеятельности до некоторого минимального уровня) с последствием, а поэтому неизвестны. В таких условиях возникает задача обеспечения конфликтной устойчивости применения СЭО на основе применения различных методов и средств обеспечения безопасности ее элементов и их целевых действий, направленных на нейтрализацию действий конкурирующих СЭО при реализации наступательной и оборонительной функций.

Основой принятия решений о методах и средствах обеспечения конфликтной устойчивости функционирования СЭО является информация, позволяющая для достижения целевого превосходства или, по крайней мере, паритета обосновывать стратегии управления (СУ) организацией в виде некоторого плана действий по использованию имеющегося ресурса сил и средств. Их реализация в соответствии с системным подходом предполагает любую СЭО рассматривать в виде многоуровневой иерархической системы с характерными связями по управ-

лению (подчиненности), информационному обеспечению, взаимодействию и исполнению, отражающей финансовое, экономическое, техническое и организационное единство множества ее элементов. Перед всеми элементами ставятся специфические задачи, и все они опосредованно работают на интегральные показатели эффективности применения СЭО. Исходя из этого, СЭО по системоопределяющим признакам (элементы работают по своим частным показателям, но их деятельность агрегируется в интегральные показатели эффективности организации) представляет организационную и/или организационно-техническую социально-экономическую систему (СЭС) в виде объединенной единством цели и процессов ее достижения совокупности элементов управления (ЭУ), информационного обеспечения (сбора, обобщения и анализа — ИОЭ) и исполнения (производства и реализации продукции, административно-хозяйственной деятельности и т. п. — ИЭ), пространственно-временное взаимодействие которых обеспечивает реализацию ее целевого предназначения.

В СЭС основным управляющим/исполнительным элементом является человек, который, несмотря на наличие различного рода инструкций и рекомендаций по выполнению конкретных действий в условиях активного/или информационного воздействия, обуславливает ее функционирование в режимах, далеких от оптимальных. Это связано с тем, что применение СЭС представляет сложное взаимодействие множества сотрудников, каждый из которых может не только работать по заранее определенным алгоритмам, но и формировать свои соответствующие правила (закономерности) функционирования исходя из значений характеристик внешних возмущений и внутрисистемных изменений на основе выбора адекватных реакций, маневра стратегиями поведения, ресурсами и технологиями. В этих условиях за счет синтеза СУ можно достичь эффективного функционирования СЭС, ее адекватной приспособленности к динамически изменяющимся условиям внешней среды и оптимизации функций управления по уровням ответственности. Недостаточная разработанность методов синтеза СУ для обеспечения конфликтной устойчивости применения СЭО в условиях рыночной экономики, наличие нерешенных и дискуссионных вопросов в данной области предопределили цель и содержание предлагаемой работы, направленной на разработку такого метода в условиях стохастического и конечного воздействия внешних факторов конкурентной среды.

## **2. Основы метода синтеза СУ конфликтной устойчивостью СЭО**

В обобщенном виде СУ как концепции управления СЭС представляют план действия ее сотрудников по оптимизации использования различного

типа ресурсов элементов (подсистем, комплексов и средств), объединенных единым пониманием проблемы и/или единством стереотипов поведения. Они фактически отражают цели и задачи функционирования СЭС для всех ее элементов, ориентируя на стратегии выживания в конкурентной среде и соответствующее им поведение. Исходную базу СУ составляет финансово-экономическое состояние СЭС, позволяющее осуществить мониторинг рынка товаров/услуг, выявить и принять решение о степени потенциальных угроз конкурентного активного или информационного воздействия, обосновать адекватные угрозам методы и средства противодействия, оптимизировать их состав и структуру, а также оценивать эффективность управления ими с учетом изменения характеристик внутренних и внешних условий.

Стратегии управления любой СЭС можно охарактеризовать как наступательные или оборонительные, обеспечивающие оптимизацию распределения ресурсов противодействия, в первую очередь информационных, для создания и поддержания конкурентного превосходства или, по крайней мере, паритета при выполнении поставленных задач. Наступательные СУ направлены на обеспечение эффективного функционирования СЭС на основе производства новых товаров, выхода на новые рынки сбыта и завоевание конкурентного превосходства. Оборонительные же СУ имеют целью нивелирование активных и/или информационных угроз за счет снижения до некоторого минимального уровня эффективности функционирования элементов конкурирующих СЭС.

Быстрые изменения характеристик внутренних и внешних условий функционирования СЭС обуславливают необходимость разработки/совершенствования математических моделей, методов и научных подходов к синтезу СУ в интересах исследования по интегральным показателям эффективности уровня развития организации и формирования на основе выявленных отклонений от заданного предпочтительного варианта развития. СУ разрабатывают на основе множества неопределенных и вероятностных факторов (потенциальных источников возмущений) применения СЭС. Они обеспечивают поиск эффективных направлений функционирования СЭС, их предварительной оценки и соответствующий выбор в зависимости от различного вида выделенных ресурсов, технологий, информации о конкурирующих организациях и т. д. Оценка степени и характера конкурентного активного и/или информационного воздействия со стороны конкурентной среды с помощью математических моделей (методик) исследования функционирования СЭС позволяет установить уязвимые элементы, оказывающие влияние на эффективность ее применения, и обосновать методы и средства их нивелирования.

В качестве основы СУ в современных условиях является рассмотрение множества различных методов и средств информационного воздействия (ИВ) для реализации конфликтной устойчивости функционирования СЭС, характеризуемой заданной эффективностью выполнения поставленных задач в условиях конкурентного активного и/или информационного воздействия. В обобщенном виде эффект ИВ основывается на обеспечении эффективного применения своей СЭС и дезорганизации управления конкурирующей СЭС на основе разрушения и/или искажения информации в ее иерархических контурах принятия решений, интегрированно проявляющегося в увеличении числа выполненных задач за счет повышения эффективности применения элементов и системы в целом. Исходя из этого, объектами ИВ могут являться:

- различного уровня элементы управления СЭС, включая каналы приема и передачи информации, среду обмена информацией, элементы сбора (добывания), обработки, хранения и доставки информации;
- информация ограниченного доступа (коммерческая и личная тайна), включая ее носители, системы и средства защиты;
- сотрудники организаций как носители ценной коммерческой информации.

Способы применения конкурирующих СЭС определяют также и информационные отношения между ними, содержание которых опосредствовано обуславливает необходимость защиты информации об облике и способах применения своей организации и добывании информации об аналогичных характеристиках конкурирующих СЭС. Эти отношения определяющим образом также влияют на содержание методов синтеза СУ и реализующих их методов и средств ИВ, задачи основных из которых состоят в следующем:

- защита информации в каналах приема и передачи информации на основе семантического преобразования информации (применение спецаппаратуры, кодирование и шифрование);
- организация маскирующего и/или дезинформационного обмена; применение широкополосных сигналов и т. п.;
- защита информации в системах управления на основе радиоэлектронной защиты информации; контроль и управление допуском к средствам, информационным и программно-техническим ресурсам систем;
- контроль потенциальных угроз и каналов утечки информации и т. п.;
- добывание информации на основе анализа и обобщения информации из различных источников, ведения конкурентной разведки и информационного мониторинга об облике и возможных способах применения потенциально-конкурирующих организаций;

- информационное воздействие на основе подавления источников информации;
- применение различных способов дезинформации, включая информацию для психологического воздействия на сотрудников организаций и нарушения информационных процессов функционирования контуров управления конкурирующих организаций.

Обеспечение реализации СУ методами и средствами ИВ, исходя из наличия в составе СЭС организационных, организационно-технических и технических элементов, позволяет по типу информационного воздействия классифицировать эти методы на организационные и технические. Организационные методы ИВ эффективны на всех уровнях элементов СЭС, за исключением уровня комплексов и технических систем, а технические методы ИВ — только до уровня организационно-технических элементов СЭС. При этом особенности организационных методов ИВ состоят в воздействии (информационном, психологическом и т. д.) на сотрудников — основного элемента контуров управления СЭС и одновременной защите информации ограниченного доступа за счет регулирования степени информированности сотрудников о характеристиках и способах применения элементов и организации в целом, а также возможно о результатах принятых ими управляющих решений. Содержание организационных методов ИВ основывается на нейтрализации каналов и источников информации на время активной фазы конфликта путем дезинформации, психологического воздействия, очернения в средствах массовой информации, физической ликвидации, подкупа, запугивания, переориентации и т. п. К техническим методам ИВ относятся различного рода способы и средства дезинформации, активные и пассивные помехи, ложные цели, средства снижения заметности и т. п. Данные методы ИВ применяют избирательно на различных этапах выполнения СЭС поставленной задачи путем "навязывания" конкурирующей СЭС информации, обуславливая выбор ею решений, приводящих к снижению числа задействованных элементов в активном и/или информационном воздействии и их эффективности до некоторого минимального уровня.

Комплексное применение организационных и технических методов ИВ играет определяющую роль в обосновании СУ конкурирующих СЭС с учетом предыстории стратегии их поведения в прошлом, в современных условиях и прогноза поведения в будущем с учетом мотиваций, определяющих цели применения СЭС. Оно приводит к изменению в желаемую сторону исходных данных, используемых конкурирующей СЭС при выборе СУ, их дезинформации, конструированию на основе различных видов информационного воздействия исходной обстановки, представлению ложных направлений изменения информационной обстановки, обеспечению

перехода к менее эффективным методам принятия решения и снижению эффективности функционирования контуров управления элементами и конкурирующей СЭС в целом.

Исходя из возможных способов применения элементов СЭС для обеспечения конфликтных устойчивых их действий могут использоваться методы индивидуального, объектового и общего ИВ, отличающиеся друг от друга характеристиками средств, объектами защиты и способами реализации воздействий, а также способами применения. Определяющей характеристикой методов ИВ являются пространственно-временные размеры защищаемых объектов: для обеспечения действий одиночных элементов используется метод индивидуального ИВ; для групп элементов или объектов — метод объектового ИВ, а для групп объектов — метод общего ИВ с учетом активного и/или информационного противодействия отдельных элементов, групп и группировок элементов конкурирующих СЭС. Это позволяет структуру СУ представить в виде аддитивного множества объединенных единством цели элементов ИВ и способов их применения, обеспечивающих формирование различного типа воздействий в интересах обеспечения эффективной работы отдельных и групп ИЭ/ИОЭ СЭС для определенных условий конкурентной среды. То есть декомпозиция способов применения элементов СЭС обеспечивает адекватное структурирование СУ на совокупность способов управления средствами и способами индивидуального и группового ИВ для обеспечения эффективного функционирования ее отдельных элементов. При этом каждая СУ основывается на анализе и обобщении текущей информации об условиях конкурентной среды, разработке методов оптимизации ограниченного ресурса средств комплексов индивидуального и группового ИВ (КИВ, КГВ) в интересах обеспечения эффективного функционирования отдельных элементов и групп ИЭ/ИОЭ и достижения конфликтной устойчивости применения СЭС в целом.

### **3. Постановка задачи синтеза стратегий управления СЭО**

СЭС относится к классу многофакторных стохастических динамических систем с обратной связью, СУ которой зависят от сложного взаимодействия временных распределений различных событий и наличия множества взаимообусловленных ограничений. В соответствии с теорией исследования операций [4] разработка СУ предполагает наличие:

- системы методик определения их оптимального облика (состава, параметров и способов реализации);
- иерархических математических моделей конфликта двух СЭС, каждая из которых стремится обеспечить себе максимальный выигрыш (путем выбора и реализации оптимальных СУ на основе



распределения своих ресурсов, рассчитывая при этом на результаты действия противоположной стороны) и сводится к последовательному решению группы задач, относящихся к классу задач синтеза и анализа.

Задача синтеза СУ составляет основу разработки облика СЭС и направлена на обоснование организационно-технической концепции ее применения и основных (обликовых) параметров плана действий. Процедура синтеза СУ как решения задачи обоснования конфликтной устойчивости применения СЭС представляет собой многоэтапный итеративный процесс, который выполняется многократно и чередуется с решением задач анализа.

Анализ СУ проводится в интересах исследования параметров полученного (заданного) варианта плана применения СЭС. Процедура анализа включает этапы одновариантного и многовариантного анализа [1]. При одновариантном анализе определяют состав, структуру и отдельные планы применения СЭС для заданных параметров ее элементов (заключение по эффективности). Многовариантный анализ проводят для исследования параметров облика СУ в некоторой области пространства параметров элементов СЭС и способов применения для определенного множества параметров конкурентной среды. Анализ проводят для уяснения цели разработки СУ, он сводится в общем случае к формированию иерархической структуры начиная с уровня средств и заканчивая СЭС в целом.

Разработка математической модели конфликта двух СЭС начинается с формирования ее математического представления в виде конечного набора исследовательских, конструктивных и пространственно-временных параметров и ограничений, составляющих структурно-параметрическую модель иерархической структуры СУ. Неопределенность в знании СУ парируется проведением адаптивной совокупности организационно-технических мероприятий по развитию и совершенствованию своей СЭС в части адаптации элементов (органов) управления, информационных подсистем, комплексов и средств к изменению прогнозируемой обстановки, учитываемых в моделях (методиках) различных уровней иерархии заданием определенных исходных данных и ограничений. При этом конкурирующие системы (для конкретности, СЭС  $\{B\}$ ) в процессе активного и/или информационного воздействия на СЭС, не имея возможности варьировать тактико-техническими характеристиками (ТТХ) элементов в активной фазе конфликта, оптимизируют свои СУ, исходя из располагаемого временного баланса, распределением ограниченного ресурса элементов в интересах снижения возможностей СЭС за счет нивелирования преимуществ от использования ее средств и способов их применения. Цель же СЭС состоит в обеспечении максимальных (заданных)

возможностей по реализации целевого предназначения. Это позволяет в математической модели конфликта СЭС  $\{B\}$ , с одной стороны, и СЭС, с другой стороны, представить конкурирующими системами их цели строго/не строго противоположными, а взаимодействие — конфликтным. Учет этих обстоятельств приводит к необходимости моделирования задачи синтеза СУ в максиминной постановке, обеспечивающей получение гарантированных оценок эффективности применения СЭС при "разумном" управлении СЭС  $\{B\}$  в динамике оборонительных и/или наступательных действий с учетом априорной ее осведомленности о составе, характеристиках, порядке функционирования и возможных способах применения СЭС.

В качестве критерия эффективности СУ, адекватно и полно характеризующего способы взаимодействия конкурирующих СЭС в математической модели конфликта, целесообразным является выбор максиминного значения выполненных СЭС среднего числа задач, где максимум определяется ее структурой (составом, ТТХ и порядком функционирования), а минимум — стратегиями поведения СЭС  $\{B\}$ . Этот критерий для моделирования данной задачи наиболее приемлем, так как он критичен к составу и характеристикам средств ИВ и может служить численной мерой эффективности исследуемого варианта СУ, а также удовлетворительно отражает динамику в модели конфликта "СЭС — СЭС  $\{B\}$ ".

Решение задачи синтеза стратегий управления СЭС осуществляется на основе следующей постановки. Пусть имеются две конкурирующие СЭС, каждая из которых стремится обеспечить свое целевое превосходство за владение находящимися в сфере их интересов ресурсами. Требуется **при заданных:**

- составе, ТТХ, порядке функционирования и способах применения элементов и СЭС в целом;
- пространственно-временных ограничениях на применение СЭС;
- номенклатуре, ТТХ и способах применения средств и комплексов ИВ;
- пространственно-временных ограничениях на применение и массогабаритных ограничениях на размещение средств ИВ на элементах СЭС;
- составе, ТТХ, порядке функционирования и способах применения средств, комплексов и комплексов СЭС  $\{B\}$ ,

**определить** такое множество  $\Omega_A$  вариантов стратегий управления СЭС (состав  $\{\bar{A}_k\}$ , основные ТТХ  $\{\hat{A}_k\}$  и способы реализации  $\{\tilde{A}_k\}$ ) из множества генерируемых вариантов, которое в прогнозируемый период обеспечивает максиминное значение среднего числа выполненных СЭС  $i$ -х,  $i = \overline{1, I}$ , задач в ус-

ловиях конкурентного активного и/или информационного противодействия, т. е.

$$U(A_k, B_k) = \max_{\{A_{ki} \in \Omega_A^k\}} \min_{\{B_{ki} \in \Omega_B^k\}} \sum_{i=1}^I U_{ki}(A_{ki}, B_{ki}) \quad (1)$$

при

$$A_k = \{\bar{A}_k, \hat{A}_k, \tilde{A}_k\}; B_k = \{\bar{B}_k, \hat{B}_k, \tilde{B}_k\}; \quad (2)$$

$$\{\Omega_A^k\} = \{\bar{\Omega}_A^k, \hat{\Omega}_A^k, \tilde{\Omega}_A^k\}; \{\Omega_B^k\} = \{\bar{\Omega}_B^k, \hat{\Omega}_B^k, \tilde{\Omega}_B^k\}; \quad (3)$$

$$\bar{\Omega}_A^k = \left\{ M_{kl}: \sum_{l=1}^{L_k} M_{kl} \cdot g_{kl} \leq Q_k \right\}; \quad (4)$$

$$\hat{\Omega}_A^k \in \Omega_A^{k*}; \tilde{\Omega}_A^k \in \Omega_A^{k*}; \hat{A}_k = \text{const}; \bar{B}_k, \hat{B}_k = \text{const}; \quad (5)$$

$$\bar{A}_k = \|M_{kl}\|, k = \bar{1}, \bar{K}; l = \bar{1}, \bar{L}_k; i = \bar{1}, \bar{I}; \quad (6)$$

$$\tilde{B}_k = \left\{ V_{kir}: \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R v_{kir} \cdot \gamma_{kir} \leq V_{kr} \right\}; \quad (7)$$

$$\gamma_{kir} = \begin{cases} 1 & \text{— при назначении для активного и/или} \\ & \text{информационного воздействия на эле-} \\ & \text{менты СЭС } r\text{-х элементов СЭС } \{B\}; \\ 0 & \text{— в противном случае,} \end{cases} \quad (8)$$

и **выбрать** из этого  $\Omega_A^k$  множества оптимальный вариант стратегии управления СЭС, имеющий минимальную стоимость, в соответствии с выражением

$$k^* = \text{Arg} \min_{\{k \in \Omega_A\}} C(A_k, B_k), \quad (9)$$

где  $\bar{\Omega}_A^k, \hat{\Omega}_A^k, \tilde{\Omega}_A^k$  — множества возможных  $k$ -х вариантов СУ (состав, структура и план реализации) СЭС;

$\bar{\Omega}_B^k, \hat{\Omega}_B^k, \tilde{\Omega}_B^k$  — множества состава, ГТХ и порядка (алгоритмов) функционирования СЭС  $\{B\}$ , обусловленных применением  $k$ -го варианта СУ;

$M_{kl}$  — число  $l$ -го типа элементов СЭС, задействованных для реализации  $k$ -го варианта СУ;

$g_{kl}$  — массогабаритные характеристики  $l$ -го типа элементов СЭС;

$Q_k$  — вектор массогабаритных ограничений на размещение средств и комплексов ИВ на элементах СЭС;

$\Omega_A^{k*}$  — множество реализуемых на прогнозируемый период характеристик  $l$ -го типа элементов, включаемых в состав СЭС;

$\bar{A}_k = \|t_{kl}^*, d_{kl}^*\|$  — вектор параметров, характеризующий временные  $i_{kl}^*$  и пространственные  $d_{kl}^*$  ограничения на применение  $l$ -го типа элементов СЭС при реализации  $k$ -го варианта СУ;

$v_{kir}$  — вектор назначения средств (комплексов) СЭС  $\{B\}$  для снижения эффективности применения соответствующих элементов СЭС при выполнении  $i$ -й задачи применительно к  $k$ -му варианту СУ;

$V_{kr}$  — число возможных средств (комплексов), выделяемых СЭС  $\{B\}$  для активного и/или информационного воздействия на элементы СЭС в условиях применения  $k$ -го варианта СУ;

$U_{ki}(A_{ki}, B_{ki})$  — вероятность выполнения  $k$ -м вариантом стратегии управления СЭС  $i$ -й задачи в условиях применения СЭС  $\{B\}$   $\tilde{B}_{ki}$  способов активного и/или информационного воздействия.

Сформулированная в общем виде задача синтеза СЭС (1)—(9) является многопараметрической оптимизационной задачей с нелинейной целевой функцией, связанными переменными и с взаимозависимыми ограничениями.

#### 4. Метод решения задачи

В соответствии с поставленной задачей синтез СУ направлен на обоснование плана действий СЭС с помощью методов и средств ИВ, основу которых составляет решение двух оптимизационных задач:

- распределение  $\bar{\Omega}_A^k$  состава (ресурса) средств

КГВ для обеспечения  $\tilde{\Omega}_A^k$  способов применения групп ИЭ/ИОЭ и входящих в их состав различных средств группового ИВ (СГВ) по разнотипным элементам подсистем (комплексов) СЭС при ведении ими одиночных или групповых действий (ОД, ГД) в динамике наступательных и/или оборонительных действий в операции;

- оптимальное распределение внутреннего ресурса (мощности, количества СГВ) КГВ применительно к пространственно-временным характеристикам способов применения ИЭ/ИОЭ при условии оптимального использования ресурса средств КИВ для обеспечения эффективных действий одиночных ИЭ/ИОЭ.

При решении данной задачи предполагаются заданными:

- состав ИЭ, ИОЭ и УЭ в структуре СЭС;
- условия проведения ОД и ГД ИЭ/ИОЭ при выполнении задач;
- $\|M_l\|_L, M_l$  — количество типовой номенклатуры  $l$ -го типа,  $l = 1, \dots, L$ , подсистем (комплексов) в структуре СЭС;

$\|N_i^l\|_L, N_i^l$  — число  $i$ -го типа,  $i = 1, \dots, I_p$  элементов в составе  $l$ -го типа подсистемы (комплекса) СЭС;

$\|R_{kl}^l\|_{K/L}$  — число средств в составе  $k$ -го типа КГВ, предназначенных для обеспечения эффективных действий групп ИЭ/ИОЭ  $l$ -го типа подсистемы (комплекса) СЭС,  $k = 1, \dots, K_p, l = 1, \dots, L$ ;

- варианты КИВ  $il$ -х типов элементов подсистем (комплексов) СЭС и соответствующие матрицы значений оценок их эффективности  $\|P_i^{l\text{КИВ}}\|$ , усредненные по условиям применения ИЭ/ИОЭ. Для разработки метода синтеза СУ обозначим

через  $\|r_k^l\|_{KL}$  матрицу назначения количества  $k$ -го типа СГВ, предназначенных для обеспечения эффективного применения  $l$ -го типа (или предназначенных для применения в составе  $l$ -го типа КГВ) групп ИЭ/ИОЭ. В связи с тем, что в составе подсистем (комплексов) СЭС возможно наличие нескольких однотипных групп элементов (равно  $M_l$ ), при распределении ресурса средств  $k$ -го типа КГВ следует рассматривать стратегии их назначения на каждый конкретный  $m$ -й элемент,  $m = 1, \dots, M_b$  т. е.

матрицу  $\|r_{km}^l\|_{M_l}$  с учетом относительной "важности" каждого  $m$ -го элемента  $l$ -го типа подсистемы (комплекса).

Тогда задачу синтеза СУ для обеспечения конфликтной устойчивости функционирования СЭС методами ИВ можно представить задачей определения оптимального плана распределения ресурса средств и способов  $k$ -го типа КГВ ( $\|r_{km}^{*l}\|_{K_l M_l}$ ), обеспечивающего

$$\Omega_A^k \in \operatorname{Argmax}_{r_{km}^l} \min_{\tilde{B}_{ki}} \sum_{m=1}^{M_l} \lambda_m^l \sum_{i=1}^{I_l} \gamma_{km}^l P_{im}^{l\text{КГВ}} (\|r_{km}^l\|), \quad (10)$$

при ограничениях

$$\sum_{m=1}^{M_l} r_{km}^l = R_k^l, \quad k = 1, \dots, K; \quad l = 1, \dots, L; \\ r_{km}^l = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где  $\gamma_{im}^l$  — относительная важность  $i$ -го элемента в составе  $l$ -го типа подсистемы (комплекса) с  $m$ -м порядковым номером,

$$\sum_{m=1}^{M_l} \gamma_{im}^l = 1, \quad i = 1, \dots, I; \quad l = 1, \dots, L;$$

$P_{im}^{l\text{КГВ}}(\dots)$  — средняя вероятность применения  $i$ -го типа ИЭ/ИОЭ, входящих в состав  $l$ -го типа подсистемы (комплекса) СЭС с  $m$ -м порядковым номером, зависящая от СУ и плана распределения ресурса средств  $k$ -го типа КГВ ( $\|r_{km}^l\|$ ) элементов  $l$ -го типа подсистемы (комплекса) с номером  $m = 1, \dots, M_b$ ;  $\lambda_m^l$  — относительная важность  $l$ -го типа подсистемы (комплекса)  $m$ -го порядкового номера в структуре СЭС.

Целесообразно остановиться на некоторых обстоятельствах, связанных с физической интерпретацией задачи (1), (2).

Для физичности представления метода синтеза СУ рассмотрим более простые условия применительно к одной  $l$ -й задаче, связанной с обеспечением эффективного применения элементов СЭС при  $l = 1, M_1 = 3$ . Это позволяет СУ для обеспечения конфликтной устойчивости функционирования СЭС представить в виде

$$\Omega_A^k \in \operatorname{Argmax}_{r_{km}} \min_{\tilde{B}_k} \sum_{m=1}^{M_1} \lambda_m \bar{P}_m^{\text{КГВ}} (\|r_{km}\|) \quad (12)$$

при

$$\sum_{m=1}^{M_1} r_{km} = R_k; \quad k = 1, \dots, K; \quad r_{km} = 0, 1, 2, \dots, \quad (13)$$

где  $\bar{P}_m^{\text{КГВ}} = \sum_{i=1}^{I_m} \gamma_{im} P_{im}^{\text{КГВ}} (\|r_{km}\|)$  — средняя вероятность

применения элементов СЭС с порядковым номером  $m = 1, \dots, M_1$ .

Вероятность эффективного функционирования СЭС в предположении обеспечения каждым  $m$ -м элементом  $X_n^m$  действий методами ИВ в условиях конкурентного активного и/или информационно-воздействия рассчитывается по формуле

$$P_{im}^{\text{КГВ}} (\|r_{km}\|, \|x_{ni}^m\|) = \sum_{n=1}^N \sum_{x_{ni}^m} P_{im} (\|r_{km}\|, x_{ni}^m) V_{im} (x_{ni}^m); \\ i = 1, \dots, I; \quad m = 1, \dots, M_1, \quad (14)$$

где  $P_{im}^{\text{КГВ}} (\|r_{km}\|, \|x_{ni}^m\|)$  — вероятность конкурентного активного и/или информационного противодействия выполнению СЭС  $x_{ni}^m$  задач  $i$ -м типом элементов

$m$ -го номера из  $X_n^m$  числа возможных,  $n = 1, \dots, N$ ;

$V_{im} (x_{ni}^m)$  — средняя эффективность (вероятность) выполнения  $x_{ni}^m$  задач  $n$ -м типом  $i$ -х ИЭ/ИОЭ с номером  $m$  на основе применения средств КИВ;

$\|x_{ni}^m\|$  — вектор распределения числа  $n$ ,  $n = 1, \dots, N$ , задач, выполненных ИЭ/ИОЭ  $i$ -й,  $i = 1, \dots, I_m$ , группой элементов с номером  $m$ ,  $m = 1, \dots, M_1$ ;

$$\sum_{m=1}^{M_1} \sum_{i=1}^{I_l} N_i^m x_{ni}^m = X_n^m;$$

$N_i^m$  — число  $i$ -го типа элементов в структуре СЭС с номером  $m$ .

Вероятности  $P_{im}(\|r_{km}\|, x_{ni}^m)$  выполнения  $x_{ni}^m$  задач ИЭ/ИОЭ при заданном распределении  $\|X_{ni}^m\|, i = 1, \dots, I_m, m = 1, \dots, M_1$ , определяются, в основном, вероятностью вскрытия активного и/или информационного воздействия со стороны СЭС  $\{B\}$  и результатами применения элементами СЭС средств и способов индивидуального и группового ИВ.

Вероятность  $V_{im}(x_{ni}^m)$  выполнения  $x_{ni}^m$ -й задачи характеризуется числом состоявшихся действий  $X_{ni}^{*m}$  ИЭ/ИОЭ по выполнению поставленных задач на основе применения ими комплексов индивидуального и группового ИВ.

С учетом (14) для заданного распределения числа ИЭ/ИОЭ для выполнения  $x_{ni}^{*m}$  задач выражения (12), (13) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \max_{r_{km}} \min_{\tilde{B}_k} & \sum_{m=1}^{M_1} \lambda_m \sum_{i=1}^{I_m} \gamma_{im} \sum_{n=1}^N \sum_{x_{ni}^m} P_{im}(\|r_{km}\|, x_{ni}^{*m}) \times \\ & \times V_{im}^*(x_{ni}^{*m}) = \\ = \max_{r_{km}} \min_{\tilde{B}_k} & \sum_{m=1}^{M_1} \lambda_m \sum_{i=1}^{I_m} \gamma_{im} P_{im}^{\text{КГВ}}(\|r_{ik}\|, x_{ni}^{*m}) \quad (15) \end{aligned}$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M_1} r_{km} = R_k; \\ k = 1, \dots, K; & r_{km} = 0, 1, 2, \dots, R_k; M_1 = 3. \quad (16) \end{aligned}$$

В принципе при решении задачи (15), (16), кроме определения способов применения КГВ для обеспечения конфликтной устойчивости функционирования каждой подсистемы (комплекса) СЭС, необходимо определить способы использования  $k$ -х СГВ при обеспечении эффективного применения каждого  $i$ -го ( $i = 1, 2, 3$ , соответственно) типа элемента — или некоторый план назначения  $\|r_{km}^i\|$ , для  $k = 1, \dots, K; m = 1, \dots, M_1$ .

## 5. Алгоритм решения задачи

Задача (15), (16) является оптимизационной нелинейной задачей целочисленного программирования с экстремальными переменными, для ее решения возможно применение приближенных комбинаторных методов, алгоритмы которых строятся на максимальном учете специфики конкретной задачи. Рассматриваемая задача, как задача оптимального управления (назначения), более всего относится к классу задач дискретной оптимизации, для решения которых используются методы последовательного назначения единиц ресурса [5] и методы

ветвей и границ [6]. Данными методами реализуется последовательный алгоритм определения оптимального решения на основе ветвления (построения дерева решений) или разбиения всего множества решений по распределению дискретного ресурса элементов ИВ на подмножества в соответствии с выбранным признаком (показателем) и определение нижних (верхних) оценок на каждом шаге ветвления.

В данном случае под множеством решений понимается множество возможных планов распределения  $\|r_{km}^i\|$  с учетом возможных оценок влияния плана распределения ресурса средств  $k$ -го типа КГВ на эффективность каждого  $i$ -го типа элементов, входящих в состав подсистемы (комплекса) с номером  $m = 1, \dots, M_1$ .

Дерево ветвления строится следующим образом. Подмножество первого шага (уровня) разбиения формируется с фиксированием назначения СГВ всех типов ( $k$ -е,  $k = 1, \dots, K$ ) для обеспечения эффективного применения элементов первого типа ( $i = 1$ ) —  $\bar{r}_m^1 = (r_1^1, \dots, r_k^1, \dots, r_K^1)$  при ограничивающем условии  $r_{km}^1 \leq R_{km}^1, k = 1, \dots, K$ . Подмножество  $\bar{r}^1$  включает все возможные планы распределения  $k$ -х типов СГВ при обеспечении применения  $i = 1$  типа элементов в условиях  $\tilde{B}_{k1}$  активного и/или информационного противодействия. Аналогично подмножество второго шага (уровня) формируется исходя из цели эффективного применения элементов второго типа ( $i = 2$ ) —  $\bar{r}^2 = (r_1^2, \dots, r_k^2, \dots, r_K^2)$  при ограничивающем условии  $r_k^2 \leq R_k^2, k = 1, \dots, K$ , и с учетом оптимального плана распределения СГВ  $k$ -х,  $k = 1, \dots, K$ , типов для обеспечения эффективного применения  $i = 1$  типа элементов в условиях  $\tilde{B}_{k2}$  активного и/или информационного противодействия. И так далее для подмножеств всех  $i$ -х типов элементов.

Для каждого из подмножеств строятся оценки целевых функций:

а) для первого шага ( $i = 1$ )

$$\begin{aligned} V_1(\bar{r}_{om}^1) = \max_{\bar{r}_{km}^1} \min_{\tilde{B}_k} & \sum_{m=1}^3 \lambda_m [\gamma_{1m} P_{1m}^{\text{КГВ}}(\bar{r}_{km}^1, x_{n1}^{*m}) + \\ & + \gamma_{2m} P_{2m}^{\text{КГВ}}(\bar{r}_{km}^{*2}, x_{n2}^m) + \gamma_{3m} P_{3m}^{\text{КГВ}}(\bar{r}_{km}^{*3}, x_{n3}^m)] \end{aligned}$$

при ограничениях  $r_{km}^1 \leq R_{km}^1, r_{km}^1 = 0, 1, 2, \dots$ ;  
заданы  $\bar{r}_m^2 = \bar{r}_r^{*2}, \bar{r}_m^3 = \bar{r}_r^{*3}; x_{ni}^{*m}$ ;

б) для второго шага ( $i = 2$ )

$$V_2(\bar{r}_{om}^2) = \max_{\bar{r}_{km}^2} \min_{\bar{B}_k} \sum_{m=1}^3 \lambda_m [\gamma_{1m} P_{1m}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^1, x_{n1}^{*m}) + \gamma_{2m} P_{2m}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^2, x_{n2}^{*m}) + \gamma_{3m} P_{3m}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^3, x_{n3}^{*m})]$$

при ограничениях  $r_{km}^2 \leq R_{km}^2$ ;  $r_{km}^2 = 0, 1, 2, \dots$ ;

заданы  $\bar{r}_m^3 = \bar{r}_r^{*3}$ ,  $\bar{r}_m^3 = \bar{r}_r^{*3}$ ;  $x_{ni}^{*m}$ ;

в) для третьего шага ( $i = 3$ )

$$V_3(\bar{r}_{om}^3) = \max_{\bar{r}_{km}^3} \min_{\bar{B}_k} \sum_{m=1}^3 \lambda_m [\gamma_{1m} P_{1m}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^1, x_{n1}^{*m}) + \gamma_{2m} P_{2m}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^2, x_{n2}^{*m}) + \gamma_{3m} P_{3m}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^3, x_{n3}^{*m})]$$

при ограничениях  $r_{km}^3 \leq R_{km}^3$ ;  $r_{km}^3 = 0, 1, 2, \dots$ ;

$k = 1, \dots, K$ ; заданы  $x_{ni}^{*m}$ .

Из выражений (17)–(22) следует, что для каждого  $i = 1, \dots, I_m$ ,  $m = 1, \dots, M_1$ ,

$$V_i(\bar{r}_{om}^i) = \max_{\bar{r}_m^i} \min_{\bar{B}_k} \left[ \sum_{m=1}^{M_1} \lambda_m \gamma_{im} P_{im}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^i, x_{ni}^{*m}) \right] = \max_{\bar{r}_m^i} \sum_{m=1}^{M_1} \lambda_m \gamma_{im} \max_{\bar{r}_m^i} \min_{\bar{B}_k} [P_{im}^{КГВ}(\bar{r}_{km}^i, x_{ni}^{*m})]$$

при ограничениях  $r_{km}^i \leq R_{km}^i$ ;  $r_{km}^i = 0, 1, 2, \dots$ ;

$$\sum_{i=1}^I r_{km}^i \leq R_{km}; \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^{M_1} r_{km}^i = M_1.$$

Применение полученных в соответствии с предложенным методом синтеза СУ позволяет определить оптимальные планы распределения возможных способов и средств ИВ для обеспечения с заданной эффективностью функционирования различного типа элементов и СЭС в целом. Результаты этих решений можно использовать в задачах технико-экономического обоснования оптимальных составов и способов применения средств ИВ для реализации стратегий управления, а также при обосновании основных требований к системе управления различного типа СЭО, реализующих эти стратегии.

#### Список литературы

1. Мистров Л. Е. Конфликтная устойчивость взаимодействия организационно-технических систем: общие понятия, научные подходы, метод синтеза. // Научно-технические технологии. 2011. Т. 12, № 4. С. 70–80.
2. Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Рефлексия и управление. М.: Физматлит, 2012. 412 с.
3. Ковалев М. М. Дискретная оптимизация. Целочисленное программирование. Минск: УРСС, 2006. 192 с.
4. Галкина В. Л. Дискретная математика: комбинаторная оптимизация на графах. М.: Гелиос АРВ, 2003. 232 с.

L. E. Mistrov, Professor,

FGBOU VPO central branch "Russian Academy of Justice", Voronezh

## Method of Synthesis of Strategy of Management of the Conflict Stability of the Social and Economic Organizations

The method of synthesis of strategy of management by the social and economic organizations on the basis of methods of individual and group information influence for achievement of conflict stability of their functioning in the conditions of competitive active and/or information counteraction is offered. Use of methods of pogruppovy optimization, consecutive purpose of units of a resource, branches and borders is the basis for a method.

**Keywords:** the social and economic organization (system), the competition, the conflict, active and/or information influence, conflict stability, the management strategy, operating, executive and information providing element, methods and means of individual and group information influence

#### References

1. Mistrov L. E. Konfliktnaja ustojchivost' vzaimodejstvija organizacionno-tehnicheskix sistem: obshhie ponjatija, nauchnye podhody, metod sinteza. *Naukoemkie tehnologii*. 2011. V. 12, N. 4. P. 70–80.
2. Novikov D. A., Chhartishvili A. G. *Refleksija i upravlenie*. M.: Fizmatlit, 2012. 412 p.
3. Kovalev M. M. *Diskretnaja optimizacija. Celochislennoe programmirovanie*. Minsk: URSS, 2006. 192 p.
4. Galkina V. L. *Diskretnaja matematika: kombinatornaja optimizacija na grafah*. M.: Gelios ARV, 2003. 232 p.

**М. Г. Мамедова**, д-р техн. наук, проф., зав. отделом,

**З. Г. Джабраилова**, канд. техн. наук, доц., зав. сектором, **Ф. Р. Мамедзаде**, диссертант,  
Институт информационных технологий НАН Азербайджана, e-mail: depart15@iit.ab.az, www.ikt.az

## Методы управления согласованием спроса и предложения на рынке труда специалистов по информационным технологиям

*Рассмотрены процессы моделирования взаимодействия спроса и предложения на рынке труда специалистов по информационным технологиям (ИТ-специалистов) и управления их количественным несоответствием на макроуровне. Выделены типы дисбаланса спроса и предложения на ИТ-специалистов, показана эволюция подходов к выявлению потребностей в ИТ-кадрах, определены основные направления согласования спроса и предложения на ИТ-специалистов. Предложены методы оценки структурного несоответствия на рынке труда ИТ-специалистов, степени дисбаланса спроса и предложения на ИТ-специалистов на основе нечеткой шкалы рассогласованности, алгоритм нечеткой классификации состояний дисбаланса.*

**Ключевые слова:** рынок труда ИТ-специалистов, согласование спроса и предложения, количественный дисбаланс, нечеткая шкала рассогласованности, нечеткая классификация состояний дисбаланса

### Введение

Попытки моделирования процессов взаимодействия спроса и предложения на рынке труда предпринимались рядом специалистов. В большинстве исследований взаимоотношение спроса и предложения рассматривается с позиций отдельных субъектов спроса и предложения и их поведенческих стратегий [1–6], т. е. на микроуровне. При этом задача согласования спроса и предложения фактически сводится к разработке механизмов эффективного отбора и найма кадров, т. е. к управлению персоналом предприятия. Предлагаемые в этих работах модели базируются в основном на эконометрических методах, контент-анализе и статистических методах обработки результатов социологических опросов, методах исследования операций, а также на теории нечетких множеств и нечеткой логики. Другая часть работ посвящена вопросам совершенствования методологии и методов анализа и прогнозирования движения кадров [7–9]. Проблемам исследования теоретических и прикладных аспектов соотношения потребности на профессиональные кадры и предложения рынка образовательных услуг с учетом глобальных тенденций занятости (на макроуровне), в том числе в региональном разрезе, посвящены работы [10–15].

Авторами предпринята попытка моделирования процессов взаимодействия спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов, а также оценки степени их согласованности на макроуровне. Задача согласования спроса и предложения на ИТ-специалистов предполагает проведение исследований по следующим направлениям:

- количественные аспекты определения спроса и предложения на ИТ-специалистов, в том числе

и в разрезе ИТ-профессий, и по типам образования;

- оценка степени дисбаланса спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов с учетом количественных показателей спроса и предложения;
- многокритериальная оценка дисбаланса спроса и предложения на ИТ-специалистов;
- качественные аспекты определения дисбаланса спроса и предложения на умения, включающие стандарт умений, вписанный в модель согласования спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов в разрезе: а) ИТ-профессий и специальностей, т. е. по структуре ИТ-занятий; б) профилей профессиональных навыков (компетенций) в сфере ИТ.

В настоящей статье рассмотрены подходы к оценке количественных аспектов дисбаланса спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов.

### Метод оценки структурного (профессионально-квалификационного) дисбаланса на рынке труда ИТ-специалистов

Базовыми элементами рынка труда ИТ-специалистов являются:

- спрос на ИТ-кадры с позиций потребностей предприятий отраслей национальной экономики;
- предложение ИТ-специалистов, формирующееся в основном посредством рынка непрерывных образовательных услуг;
- соотношение спроса и предложения на ИТ-рынке труда, отражающее уровень (степень интенсивности) взаимодействия субъектов рынка труда ИТ-специалистов, т. е. степень согласованности (рассогласованности) спроса на ИТ-специалистов и их реального предложения.

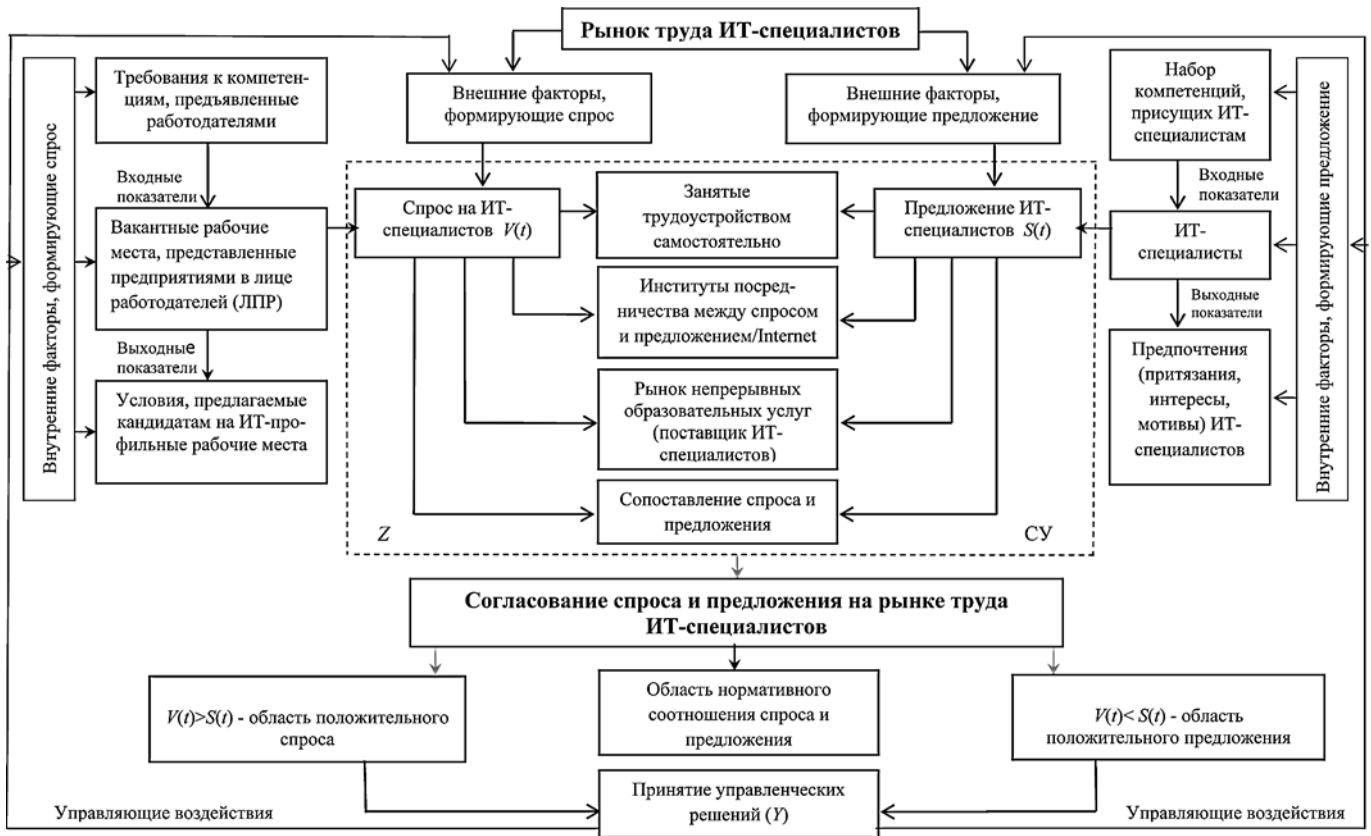


Рис. 1. Трансакционная схема системы интеллектуального управления рынком труда ИТ-специалистов

В соответствии с принятой концепцией функционирования рынка труда ИТ-специалистов [16] предложена трансакционная схема интеллектуального управления им (рис. 1). При этом принят во внимание тот факт, что рынок образовательных услуг является одним из основных источников притока рабочей силы на рынок труда и инфраструктурным элементом его регулирования, в том числе и в разрезе профессионально-квалификационных групп [11]. Квалификация в данном контексте означает официальное подтверждение (диплом или свидетельство) успешного завершения образования или обучения и законного права заниматься определенной профессиональной деятельностью. В секторе информационных технологий именно через рынок непрерывных образовательных услуг обеспечивается входной поток ИТ-специалистов, являющихся носителями востребованных на рынке труда ИТ-профессий, специальностей и квалификаций. Это дает возможность разработать единое модельное представление взаимодействия системы вакансий (спроса), ИТ-профильной рабочей силы (предложения), институтов, непосредственно воздействующих на процессы и механизмы управления спросом и предложением на ИТ-специалистов. Следует также учесть характерную особенность задач, имеющих место при оценке дисбаланса спроса и предложения на рынке труда, заключающуюся в том,

что информация для их решения складывается из процессов наблюдения состояний спроса и предложения в различных временных интервалах и из разных источников. Это означает, что данные о наблюдаемых ситуациях являются существенно зависимыми от времени, и необходимо говорить о спросе и предложении и их соотношении в определенном временном диапазоне.

В соответствии с приведенной схемой дадим формализованное описание функционирования структурных элементов рынка труда ИТ-специалистов в профессионально-квалификационном разрезе.

Пусть  $[t_1, t_2]$  — заданный интервал времени. Объем и структуру спроса на ИТ-специалистов в разрезе ИТ-профессий и специальностей опишем вектором

$$V[t_1, t_2] = \{V_1[t_1, t_2], V_2[t_1, t_2], \dots, V_N[t_1, t_2]\},$$

представляющим множество ИТ-вакансий по отраслям национальной экономики во временном горизонте  $[t_1, t_2]$ , где  $N$  — численность ИТ-профессий и специальностей, имеющих на рынке труда.

Объем и структуру предложения ИТ-специалистов в заданном интервале времени в разрезе ИТ-профессий и специальностей можно охарактеризовать вектором предложения

$$S[t_1, t_2] = \{S_1[t_1, t_2], S_2[t_1, t_2], \dots, S_M[t_1, t_2]\}.$$

Взаимодействие спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов и движение ресурсных потоков происходят в основном посредством трех источников.

Так, общее число ИТ-специалистов с определенной профессионально-квалификационной структурой, занятых трудоустройством самостоятельно (через друзей, родных, близких и пр.), может быть описано вектором

$$S^1[t_1, t_2] = \{S_1^1[t_1, t_2], S_2^1[t_1, t_2], \dots, S_N^1[t_1, t_2]\}.$$

Число трудоустроенных ИТ-специалистов из этой категории в течение времени  $[t_1, t_2]$  обозначим  $H^+[t_1, t_2]$ , а численность ищущих работу —  $H^-[t_1, t_2]$ . Эти векторы могут быть описаны также в разрезе числа трудоустроенных

$$H^+[t_1, t_2] = \{H_1^+[t_1, t_2], H_2^+[t_1, t_2], \dots, H_N^+[t_1, t_2]\}$$

и ищущих работу

$$H^-[t_1, t_2] = \{H_1^-[t_1, t_2], H_2^-[t_1, t_2], \dots, H_N^-[t_1, t_2]\}$$

по каждой ИТ-профессии и специальности.

Общее число и структуру ИТ-специалистов, занятых трудоустройством через Интернет и другие посреднические рекрутинговые агентства, опишем вектором

$$S^2[t_1, t_2] = \{S_1^2[t_1, t_2], S_2^2[t_1, t_2], \dots, S_N^2[t_1, t_2]\}.$$

Среди них  $W^+[t_1, t_2]$  — число трудоустроенных, а  $W^-[t_1, t_2]$  — численность нетрудоустроенных. В разрезе профессионально-квалификационной структуры число трудоустроенных и нетрудоустроенных ИТ-специалистов этой категории описано следующими векторами:

$$W^+[t_1, t_2] = \{W_1^+[t_1, t_2], W_2^+[t_1, t_2], \dots, W_N^+[t_1, t_2]\};$$

$$W^-[t_1, t_2] = \{W_1^-[t_1, t_2], W_2^-[t_1, t_2], \dots, W_N^-[t_1, t_2]\}.$$

Общее число и структуру ИТ-специалистов, занятых трудоустройством через рынок образовательных услуг, опишем вектором

$$S^3[t_1, t_2] = \{S_1^3[t_1, t_2], S_2^3[t_1, t_2], \dots, S_N^3[t_1, t_2]\},$$

среди них  $Q^+[t_1, t_2] = \{Q_1^+[t_1, t_2], Q_2^+[t_1, t_2], \dots,$

$Q_N^+[t_1, t_2]\}$  — число и профессионально-квалификационная структура трудоустроенных, поступивших на рынок труда через источники различных форм обучения и переподготовки, а  $Q^-[t_1, t_2] = \{Q_1^-[t_1, t_2], Q_2^-[t_1, t_2], \dots, Q_N^-[t_1, t_2]\}$  — число и профессионально-квалификационная структура нетрудоустроенных из этой категории, претендующих на ИТ-вакансии.

Построенная таким образом система векторов позволяет полностью описать общее число и количественную структуру ИТ-специалистов, находящихся на рынке труда.

Нетрудоустроенная часть ИТ-специалистов составляет вектор предложения на текущий момент времени  $t$ , который может быть описан следующим образом:

$$S(t) = \{H^-[t_1, t_2] + W^-[t_1, t_2] + Q^-[t_1, t_2]\}.$$

Общая численность удовлетворенных заявок спроса и предложения на ИТ-специалистов за некоторый отрезок времени  $[t_1, t_2]$  по всем источникам взаимодействия спроса и предложения может быть представлена в виде суммы:

$$VIS[t_1, t_2] = \{H^+[t_1, t_2] + W^+[t_1, t_2] + Q^+[t_1, t_2]\}.$$

Тогда спрос в текущий момент времени  $t$  определяется следующим образом:

$$V(t) = V[t_1, t_2] - VIS[t_1, t_2], \quad (1)$$

а предложение может быть рассчитано из выражения

$$S(t) = S[t_1, t_2] - VIS[t_1, t_2]. \quad (2)$$

Общая численность удовлетворенных запросов и предложений в разрезе отдельных ИТ-профессий и специальностей за некоторый отрезок времени  $[t_1, t_2]$  по всем источникам взаимодействия спроса и предложения может быть определена из следующих выражений:

$$VIS_1[t_1, t_2] = \{H_1^+[t_1, t_2] + W_1^+[t_1, t_2] + Q_1^+[t_1, t_2]\};$$

$$VIS_N[t_1, t_2] = \{H_N^+[t_1, t_2] + W_N^+[t_1, t_2] + Q_N^+[t_1, t_2]\}.$$

Спрос и предложение по отдельным ИТ-профессиям и специальностям за период  $[t_1, t_2]$  будут описаны следующим образом:

$$V_1(t) = V_1[t_1, t_2] - VIS_1[t_1, t_2], \dots, V_N(t) = V_N[t_1, t_2] - VIS_N[t_1, t_2];$$

$$S_1(t) = S_1[t_1, t_2] - VIS_1[t_1, t_2], \dots, S_N(t) = S_N[t_1, t_2] - VIS_N[t_1, t_2].$$

### Конъюнктура рынка труда ИТ-специалистов

Взаимодействие спроса и предложения на ИТ-специалистов формирует конъюнктуру соответствующего сегмента рынка труда. Конъюнктура рынка труда — это реальная ситуация, которая складывается на рынке труда в процессе взаимодействия спроса и предложения (купли-продажи рабочей силы) под влиянием многочисленных факторов (политических, социально-экономических, демографических и др.) [17, 18]. Она характеризуется соотношением спроса и предложения. С точки зрения конъюнктуры рынка труда традиционно различают три его состояния: равновесное, трудодефицитное и трудоизбыточное. На практике как общее, так и



структурное равновесие (сбалансированность, согласованность) спроса и предложения рабочей силы трудно достижимы. Конъюнктура рынка труда оказывает непосредственное воздействие на цену рабочей силы (оплату труда), которая, в свою очередь, колеблется в зависимости от условий, действующих на рынках.

Рассмотрим конъюнктуру рынка труда в контексте сегмента информационных технологий:

- если в момент времени  $t$  вектор спроса  $V(t)$  превосходит вектор предложения  $S(t)$ , т. е. суммарный спрос на ИТ-специалистов по различным ИТ-профессиям и специализациям больше суммарного предложения в разрезе рассматриваемых ИТ-профессий и специализаций  $V(t) > S(t)$ , то на рынке труда наблюдается дефицит ИТ-специалистов;
- если в момент времени  $t$  вектор предложения  $S(t)$  превосходит вектор спроса  $V(t)$ , т. е. суммарное предложение ИТ-специалистов по различным ИТ-профессиям и специализациям больше суммарного спроса на ИТ-специалистов в разрезе рассматриваемых ИТ-профессий и специализаций  $V(t) < S(t)$ , то на рынке труда наблюдается избыток ИТ-специалистов;
- если в момент времени  $t$  векторы предложения  $S(t)$  и спроса  $V(t)$  совпадают, т. е. число и структура предложения ИТ-специалистов равны числу ИТ-профильных вакансий, на которые требуются ИТ-специалисты заявленной квалификации и специализации, то можно говорить об идеальной ситуации равновесия  $V(t) = S(t)$  на рынке труда.

Описание конъюнктуры рынка труда посредством указанных выше трех состояний не позволяет выявить широкий спектр взаимоотношений спроса и предложения на ИТ-специалистов. Например, разрыв (дисбаланс) между спросом и предложением может быть достаточно большим (критическим) или же, наоборот, несущественным. Необходимо также обратить внимание на характер тенденций роста или уменьшения дисбаланса с позиций спроса и предложения, т. е. выявить как динамику предложения, так и тенденции изменения спроса. Многообразие возможных состояний спроса и предложения порождает соответствующее множество различных конъюнктурных ситуаций на рынке труда ИТ-специалистов. Это, в свою очередь, для каждого конкретного случая предопределяет необходимость оперативного принятия соответствующего управленческого решения в направлении уменьшения дисбаланса спроса и предложения.

Стремление государств к повышению и обеспечению устойчивого экономического роста и конкурентоспособности выдвинуло в последние годы на первый план в качестве чрезвычайно важной стратегической задачи вопросы сбалансирования (согласования) и прогнозирования спроса и пред-

ложения на рынке труда. Необходимость подготовки и формирования ИТ-кадров с профессиональными умениями, соответствующими потребностям рынка труда, требует разработки новых, более гибких подходов и методов согласования спроса и предложения на ИТ-специалистов.

### **Эволюция подходов к определению потребности в кадрах и согласованию спроса и предложения на рынке труда**

За последние десятилетия наблюдается значительная эволюция в понимании потребностей рынка труда и устранении несоответствий спроса и предложения, в том числе и конъюнктурных.

Традиционно существующие методологии по устранению количественных несоответствий на рынке труда сводятся к заполнению вакансий и уменьшению уровня безработицы. Политика диверсификации экономики, быстрые изменения в технологиях, глобальная информатизация предъявляют новые требования к современному производству, способствуют стремительному устареванию знаний и, соответственно, содержания и структуры ИТ-профессий и специальностей. В этих условиях для определения потребности в квалифицированных кадрах и устранения несоответствий на рынке труда в европейских странах применяется модель согласования спроса и предложения в разрезе профессий (по роду занятий) и по типам образования (квалификациям).

В настоящее время все большую значимость приобретают вопросы согласования спроса и предложения на компетенции (профессиональные знания, навыки, умения, опыт и т. п.) [19—27]. Непрерывно меняющаяся экономическая ситуация, стремление стран к достижению инновационного развития экономики обуславливают изменение требований к ИТ-профильным рабочим местам, расширение содержания и появление новых ИТ-профессий и специализаций. Это, в свою очередь, приводит к формулированию со стороны работодателей новых требований к компетенциям ИТ-специалистов (профилям профессиональных навыков) и вызывает необходимость в определении спроса на компетенции последних через квалификационные требования к ИТ-профильным рабочим местам. Компетенции, рассматриваемые через призму формальных квалификаций ИТ-специалистов, являются инструментом, агрегирующим профессиональные профили, индивидуальный опыт, личностные и другие качества последних, а также определяют возможности их трудоустройства, карьерный рост, уверенность в себе и т. п. Компетенции также являются важным фактором и механизмом при разработке и согласовании политики в сфере труда, образования и экономического развития. Вызовы, с которыми сталкивается рынок труда ИТ-специалистов, предъявляют к образовательной системе новые

требования. Сущность этих требований сводится к созданию условий, позволяющих определить квалификацию выпускника посредством признания не пройденного курса обучения, а результатов обучения как совокупности полученных в процессе освоения образовательных программ знаний и умений, соответствующих квалификационным требованиям работодателя к ИТ-профильному рабочему месту.

Актуальность проблемы несоответствия электронных навыков (профессиональных знаний, умений, практического опыта и т. п.) ИТ-специалистов, формируемых учебными заведениями, э-навыкам, востребованным на рынке труда, способствовала выдвижению ряда инициатив и проведению исследований в этой сфере [20, 22, 27–33].

Естественно, для каждого типа дисбаланса или их комбинации принимаемые решения по выработке соответствующих управляющих воздействий по согласованию спроса и предложения на ИТ-специалистов будут различными. Так, в зависимости от сложившейся на рынке труда текущей ситуации, а также в соответствии с прогнозными потребностями формирования инновационной экономики управляющие воздействия могут быть направлены на согласование:

- количественных характеристик (устранение нехватки или переизбытка ИТ-кадров);
- качественных характеристик (устаревание профессиональных умений);
- уровня профессиональной подготовки ИТ-специалистов (чрезмерно высокий или недостаточный уровень квалификации);
- структуры профессиональной подготовки ИТ-специалистов (дефицит или избыток ИТ-специалистов определенной специализации, устаревание одних и появление новых ИТ-профессий и специализаций);
- различных сочетаний указанных типов дисбаланса.

При исследовании процессов согласования спроса и предложения также необходимо четко выделить уровень, на котором будет оцениваться дисбаланс. Это могут быть:

- микрофокус, включающий индивидуальный уровень (ИТ-специалиста), уровень работодателя (предприятия);
- макрофокус, включающий уровни отрасли (сектора, сегмента) или всей экономики.

В работах [34, 35] предложены методы управления рынком труда ИТ-специалистов на микроуровне, базирующиеся на нечетких многокритериальных методах отбора ИТ-специалистов и на нечетком распознавании образов.

Учитывая многофакторный характер процедур согласования спроса и предложения, можно сделать вывод о том, что ограничение задачи устранения несоответствий на рынке труда ИТ-специалистов

достижением баланса спроса и предложения на ИТ-специалистов может привести к ошибкам прогнозирования их перспективной потребности.

### **Подходы к минимизации дисбаланса спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов**

Практика стран с развитой рыночной экономикой [15, 23, 25, 36] показывает, что полное совпадение спроса и предложения на рынке труда невозможно. Более того, рынок труда изначально неустойчив вследствие временного запаздывания потенциального спроса и предложения [12]. Наиболее распространенная идеальная целевая функция рассогласованности имеет следующий вид:

$$V(t) - S(t) \rightarrow 0.$$

Среди исследователей и практиков чаще всего наблюдается стремление минимизировать разницу между векторами спроса и предложения. Для достижения минимального дисбаланса между спросом и предложением на ИТ-специалистов компоненты векторов спроса и предложения должны изменяться таким образом, чтобы при данном уровне спроса (числа вакансий) и предложения (числа безработных и ищущих работу ИТ-специалистов) общий уровень найма был максимален, т. е.

$$VIS[t_1, t_2] = \{H^+[t_1, t_2] + W^+[t_1, t_2] + Q^+[t_1, t_2]\} \rightarrow \max.$$

Можно рассмотреть также достижение согласованности спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов в структурном разрезе. В этом случае необходимо стремиться к достижению максимального найма по каждой отдельной ИТ-профессии и специальности:

$$\max D = \max\{VIS_1(t) + VIS_2(t) + \dots + VIS_N(t)\}.$$

Показатель сбалансированности спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов можно описать также с позиций предложения, т. е. достижения минимального уровня безработицы, который в принятых обозначениях имеет вид

$$S(t) = \{H^-[t_1, t_2] + W^-[t_1, t_2] + Q^-[t_1, t_2]\} \rightarrow \min.$$

Можно ввести также понятие сбалансированности с позиций достижения минимального уровня структурной безработицы в течение определенного времени, который может быть определен как минимум суммарного дисбаланса по различным ИТ-профессиям и специальностям:

$$\min D^* = \min\{(V_1(t) - VIS_1(t)) + (V_2(t) - VIS_2(t)) + \dots + (V_N(t) - VIS_N(t))\}.$$

### **Метод оценки степени дисбаланса спроса и предложения с использованием нечеткой шкалы рассогласованности**

Для получения обобщенной характеристики соотношения спроса и предложения на рынке труда

ИТ-специалистов во временном интервале  $[t_1, t_2]$  введем понятие "показатель количественного дисбаланса", который определяет отношение численности безработных и ищущих работу ИТ-специалистов (предложения) к числу ИТ-профильных вакансий:

$$\delta = S[t_1, t_2]/V[t_1, t_2], \text{ если } S[t_1, t_2] < V[t_1, t_2]$$

и

$$\delta = V[t_1, t_2]/S[t_1, t_2], \text{ если } S[t_1, t_2] > V[t_1, t_2].$$

Пусть показатели, описывающие рынок труда ИТ-специалистов, информационно поддержаны, и на основе приведенных выше выражений (1) и (2) можно рассчитать величину спроса и предложения. Как правило, фактические данные для оценки спроса и предложения поступают из различных источников информации. Эта информация неидеальна, далека от полноты и не лишена субъективизма и противоречивости. Поэтому естественным представляется рассмотреть показатель "дисбаланс спроса и предложения" как лингвистическую переменную. В зависимости от значения отклонения (расогласованности) спроса и предложения каждая градация состояния дисбаланса может быть вербально выражена такими лингвистическими терминами, как оптимальный дисбаланс, минимальный дисбаланс, допустимый дисбаланс, предельный дисбаланс, полный дисбаланс спроса и предложения. Предлагается описать диапазон изменения дисбаланса спроса и предложения на ИТ-специалистов в виде шкалы рассогласованности, которая в зависимости от степени превосходства спроса над предложением или, наоборот, предложения над спросом состоит из двух отрезков. Эти отрезки назовем областью положительного спроса в случае превосходства последнего над предложением и областью положительного предложения — в противном случае. Информация о степени дисбаланса на шкале рассогласованности представляет собой экспертные оценки в виде функций принадлежности нечетких множеств, полученных отображением экспертами указанных выше вербальных градаций (значений) лингвистической переменной "дисбаланс спроса и предложения" на универсальную нечеткую шкалу, представленную отрезком  $[0,1]$ . Здесь точка 0 соответствует неприемлемому значению количественной характеристики дисбаланса, т. е. отражает полный дисбаланс спроса и предложения, а точка 1 соответствует состоянию равновесия спроса и предложения, т. е. отражает идеальное соотношение последних. Для формального

описания вербальных параметров экспертами определяются соответствующие лингвистические и нечеткие переменные, базовые множества и функции принадлежности нечетких переменных, при задании которых применяются прямые и косвенные методы [37–40]. При использовании прямых методов степени принадлежности элементов  $x \in X$  могут быть заданы одним экспертом или группой экспертов. В случае одного эксперта последний для каждой из  $l = \overline{1, m}$  вербальных градаций лингвистической переменной "дисбаланс спроса и предложения" ставит в соответствие степень принадлежности  $\mu_l(x) \in [0,1]$ , которая, с его точки зрения, наилучшим образом согласуется со смысловой интерпретацией нечеткого множества.

Рис. 2 графически иллюстрирует шкалу рассогласованности, отражающую дисбаланс спроса и предложения. Как видно на рисунке, каждая из указанных областей изменения дисбаланса  $[E, A]$  и  $[E^*, A^*]$  представляет собой интервал  $[0,1]$ , разделенный в соответствии с возможной степенью рассогласованности спроса и предложения на ряд отрезков — областей отклонения от нормативного значения дисбаланса.

Для формализации параметров, определяющих степень дисбаланса спроса и предложения в некоторый момент времени, воспользуемся введенными в работе [41] для оценки меры неопределенности функциями  $s(S_j)$ , названными нечеткими мерами и представляющими собой действительное число, которое эксперт ставит в соответствие каждому событию  $S_j$ . Для  $\forall i$  функции  $s(S_j)$  характеризуют сте-

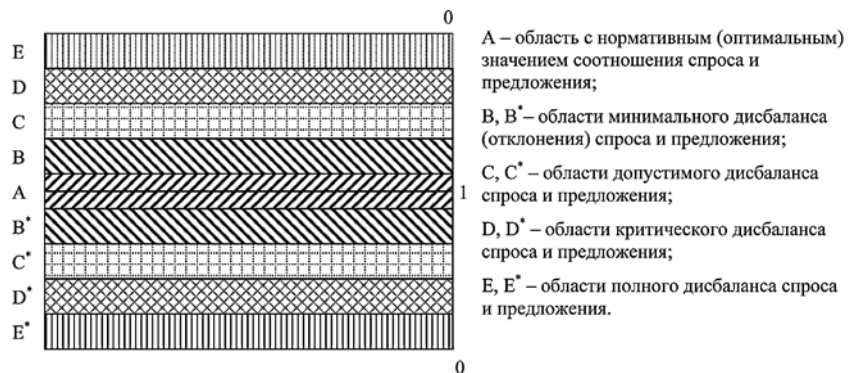


Рис. 2. Графическая иллюстрация степени дисбаланса спроса и предложения

Область изменения функций принадлежности нечетких множеств вербальных градаций дисбаланса спроса и предложения, в том числе в разрезе отдельных ИТ-профессий и специальностей

Термы — вербальные (нечеткие) оценки градаций лингвистической переменной "дисбаланс спроса и предложения"	Диапазон изменения термов на шкале рассогласования
Оптимальный (нормативный) дисбаланс спроса и предложения	[0,8; 1]
Минимальный дисбаланс	[0,6; 0,8)
Допустимый дисбаланс	[0,4; 0,6)
Критический дисбаланс	[0,2; 0,4)
Полный дисбаланс спроса и предложения	[0; 0,2)

пень уверенности эксперта в том, что  $s(S_j) \subset \Psi_S$ . Таким образом, диапазон изменения дисбаланса в зависимости от степени его выраженности, т. е. семантической интерпретации вербальных градаций, методом экспертной оценки может быть разделен на несколько нечетких интервалов, отражающих область изменения функций принадлежности нечетких множеств вербальных градаций лингвистической переменной "дисбаланс спроса и предложения"  $\delta_j$ , определенного на множестве действительных чисел  $R_\delta$  в виде отображения  $\mu_{\delta_j} : R_\delta \rightarrow [0,1]$ . Так, например, нормативному значению дисбаланса спроса и предложения, с точки зрения эксперта, может соответствовать диапазон изменения степени принадлежности в интервале  $[0,8; 1]$ , а полный дисбаланс спроса и предложения может иметь место в случае попадания значений функций принадлежности в интервал  $[0; 0,2)$  (см. таблицу).

Обозначим нормативное значение дисбаланса (оптимальное соотношение спроса и предложения) в момент времени  $t^m$  (или в определенном временном отрезке) через  $\delta_{norm}^{t^m} = S_{norm}^{t^m} / V_{norm}^{t^m}$ , если  $S_{norm}^{t^m} < V_{norm}^{t^m}$ , и  $\delta_{norm}^{t^m} = V_{norm}^{t^m} / S_{norm}^{t^m}$ , если  $S_{norm}^{t^m} > V_{norm}^{t^m}$ . Если известны текущие значения спроса и предложения и, соответственно, их соотношение (текущий дисбаланс), т. е.  $\delta_{cur}^{t^m} = S_{cur}^{t^m} / V_{cur}^{t^m}$ , тогда функции принадлежности текущего состояния дисбаланса по шкале рассогласования могут быть определены из следующего выражения:

$$\mu_j(x) = 1 - |\delta_{cur}^{t^m} - \delta_{norm}^{t^m}|. \quad (3)$$

Как видно на рис. 2, дисбаланс спроса и предложения может изменяться в широком диапазоне: от нормативного значения соотношения спроса и предложения до их полного дисбаланса. Чем ближе значение текущего дисбаланса к нормативному, тем в более благоприятную область изменения попадают значения функций принадлежности текущего состояния. Предложенный подход к оценке ситуации на рынке труда позволяет осуществить нечеткую классификацию его состояний по степени дисбаланса спроса и предложения.

Нечеткая классификация состояний дисбаланса по степени его выраженности на определенный момент времени может быть определена согласно следующему алгоритму.

1. Определить набор вербальных параметров лингвистической переменной "дисбаланс спроса и предложения", отражающих классы нечетких состояний дисбаланса.

2. Для каждого класса нечетких состояний рассогласованности определить область изменения

функций принадлежности нечетких множеств градаций дисбаланса.

3. Для каждого класса нечетких состояний дисбаланса в соответствии со значениями функций принадлежности в рамках областей их изменения с использованием экспертных знаний сгенерировать соответствующие управляющие воздействия в виде продукционных правил.

4. Для каждого оцениваемого временного среза по формуле (3) определить рассогласование (отклонение) между текущим состоянием и нормативным значением дисбаланса.

5. В соответствии с величиной рассогласованности спроса и предложения и значением соответствующей функции принадлежности установить класс, к которому относится исследуемое состояние дисбаланса.

6. В зависимости от класса, в который попадают значения отклонения спроса и предложения, активизировать из базы знаний продукционное правило, соответствующее искомому управленческому решению.

Так, например, управляющие воздействия, формируемые в виде продукционных правил в открытой базе знаний, в зависимости от класса, в который они включены, могут относиться к устранению несоответствий между спросом и предложением в разрезе восполнения количественного дефицита ИТ-специалистов, в том числе и в разрезе отдельных ИТ-профессий и специальностей, или же согласования структурного дисбаланса ИТ-специалистов. Далее продукционные правила могут затрагивать качественные аспекты дисбаланса спроса и предложения, связанные с устареванием навыков в сфере ИТ, появлением и необходимостью устранения факторов, сдерживающих рост сектора ИТ. Еще один класс управляющих правил может быть связан с мерами политики в сфере непрерывного образования и обучения (переподготовки, повышения квалификации, дополнительного образования), направленными на устранение несоответствия спроса и предложения. Другой класс правил может отражать меры по расширению и созданию новых инновационных ИТ-профильных рабочих мест, развитию необходимого человеческого потенциала, адаптации системы ИТ-образования к потребностям рынка ИТ-специалистов, разработке механизмов координации деятельности стейкхолдеров на рынке труда ИТ-специалистов и т. п.

## Заключение

Рассогласованность спроса и предложения на рынке труда на сегодня является одной из актуальных проблем во всем мире. В сфере информационных технологий эта проблема еще более усложняется. Высокая динамичность сектора ИКТ, глобальная информатизация, быстрая смена технологий, стремительное устаревание знаний и, соответст-

венно, содержания и структуры ИТ-профессий и специальностей определяют несоответствие объема и структуры входящих и исходящих потоков на рынке труда ИТ-специалистов. Это, в свою очередь, приводит к рассогласованию спроса и предложения на последних как в профессионально-квалификационном, так и в количественном разрезе. В зависимости от качественных и количественных аспектов дисбаланс спроса и предложения на ИТ-специалистов имеет различные формы, может рассматриваться на разных уровнях (микрофокус или макрофокус) и требует применения соответствующих подходов к его сокращению.

Несмотря на понимание странами необходимости принятия политических мер по устранению дисбаланса спроса и предложения на ИТ-специалистов, в рамках которых разработаны и внедряются новые технологии и инструменты, вопросам взаимодействия спроса и предложения на ИТ-специалистов, разработки адекватных подходов и методов их моделирования, поддержки принятия управленческих решений по согласованию спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов, учитывающих специфику данного сектора экономики, предпочтения основных его акторов и характер дисбаланса, в научной литературе не уделено достаточного внимания.

Предложенные в статье подходы к моделированию взаимодействия спроса и предложения на рынке труда ИТ-специалистов и управления их количественным несоответствием на макроуровне, транзакционная схема интеллектуального управления рынком труда ИТ-специалистов, методы оценки структурного дисбаланса на рынке труда ИТ-специалистов, степени дисбаланса спроса и предложения на основе нечеткой шкалы рассогласованности, алгоритм нечеткой классификации состояний дисбаланса, подходы к формированию базы знаний в виде продукционных правил, описывающих зависимость принятия того или иного управляющего решения от значения рассогласованности спроса и предложения, являются одним из возможных вариантов согласования спроса и предложения в количественном разрезе и могут оказать поддержку различным заинтересованным лицам в принятии ими обоснованных решений по управлению дисбалансом на рынке труда ИТ-специалистов.

Работа выполнена в рамках гранта Государственной нефтяной компании Азербайджанской Республики *SOCAREF 2013* "Разработка для SOCAR механизмов решения задач эффективного управления человеческими ресурсами посредством применения интеллектуальных информационных технологий". Выбор в качестве примера конкретных субъектов исследования именно ИТ-специалистов и исследование спроса и предложения на последних обусловлены особой ролью ИКТ в развитии производительности, конкурентоспособности и

инновационного потенциала отраслей и предприятий. На основе предложенного метода, включенного в методологическую базу системы поддержки принятия решений по управлению человеческими ресурсами SOCAR, проведены эксперименты для решения реальных практических задач по подбору и найму ИТ-кадров в нефтяную компанию.

#### Список литературы

1. **Сизова И. И.** Разработка методов ситуационного управления при решении задач о назначениях. Автореферат дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук, Таганрог, 2006. URL: <http://www.disserscat.com/content/razrabotka-metodov-situatsionnogo-upravleniya-pri-reshenii-zadach-o-naznacheniayah>
2. **Мисиченко Н. Ю.** Формализованный анализ и моделирование информационных процессов в системе поддержки трудоустройства выпускников вуза. Автореферат дис. на соиск. ученой степени кандидата экон. наук. Ростов-на-Дону, 2009. URL: <http://www.referun.com/n/formalizovannyi-analiz-i-modelirovanie-informatsionnyh-protsessov-v-sisteme-podderzhki-trudoustroystva-vypusknikov-vuza>
3. **Никитина Н. Ш., Бурмистрова Е. В.** Методика отбора персонала на вакансию на основе нечетких показателей // Университетское управление: практика и анализ. 2001. № 3. С. 98–103.
4. **Lichter A., Peichl A., Sieglach S.** Micro-level labor demand estimation for Germany. Institute for the Study of Labor (IZA), 2013. 54 p. URL: <http://ftp.iza.org/dp7494.pdf>
5. **Dolls M., Lichter A., Schneider H., Sommer E.** Projected micro-level dataset for Germany based on reweighting / Institute for the Study of Labor, 2012. 18 p. URL: [http://www.neujobs.eu/sites/default/files/publication/2012/11/D10\\_5-Database%20ProjectedMicro-level%20database.pdf](http://www.neujobs.eu/sites/default/files/publication/2012/11/D10_5-Database%20ProjectedMicro-level%20database.pdf)
6. **Hackl P., Wellund A.** Customer Satisfaction Measurement: PLS and Alternative Estimation Methods // Proceeding of the 44<sup>th</sup> annual EOQ Congress, Budapest, 2000. V. 2. P. 45–52.
7. **Коровкин А. Г.** Динамика занятости и рынка труда. Вопросы макроэкономического анализа и прогнозирования. М.: МАКС-Пресс. 2001. 327 с.
8. **Галлямов Р. Р.** Система оптимизационных моделей профессионально-квалификационного дисбаланса рынка труда. Автореферат дис. на соиск. ученой степени канд. экон. наук. Уфа, 2007. URL: <http://economy-lib.com/sistema-optimizatsionnyh-modeley-professionalno-kvalifikatsionnogo-disbalansa-rynka-truda>
9. **Гайнанов Д. А., Галлямов Р. Р.** Модель минимизации структурных дисбалансов рынка труда // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 8, № 2. С. 89–92.
10. **Васильев В. Н., Гуртов В. А., Питухин Е. А.** и др. Рынок труда и рынок образовательных услуг в субъектах Российской Федерации. М.: Техносфера. 2007. 680 с.
11. **Ильин Е. М., Клупт М. А., Лисовик Б. С.** и др. Прогнозирование рынка труда. СПб.: Левша. 2001. 458 с.
12. **Сигова С. В.** Государственное регулирование сбалансированности рынка труда. Автореферат дис. на соиск. ученой степени докт. экон. наук. Москва, 2011. URL: <http://www.dissers.ru/avtoreferati-dissertatsii-ekonomika/a176.php>
13. **Шиянова Л. А.** К проблеме обеспечения сбалансированности рынка образовательных услуг и потребностей экономических систем в профессиональных кадрах (на примере Калининградской области) // Вестник экономической интеграции. 2009. № 8. С. 138–145.
14. **Fasih T.** Linking Education Policy to Labor Market Outcomes. Washington: The World Bank. 2008. 108 p.
15. **Pouliakas K.** A Balancing Act at Times of Austerity: Matching the Supply and Demand for Skills in the Greek Labour Market // CeDEFop and IZA, 2014. 43 p. URL: <http://ftp.iza.org/dp7915.pdf>
16. **Мамедова М. Г., Мамедзаде Ф. Р.** Концептуальные подходы к интеллектуальному управлению рынком труда ИТ-специалистов // Проблемы информационных технологий. 2013. № 2. С. 43–54. URL: <http://ipit.az/storage/files/article/4c6a7d9627737d406672aefd687e9fb4.pdf>
17. **Конъюнктура** рынка труда. URL: [http://komresurs.ru/Rrti-page01\\_a07.php](http://komresurs.ru/Rrti-page01_a07.php)

18. **Конъюнктура** рынка труда. URL: <http://be5.biz/ekonomika/t003/25.htm>
19. **E-Skills** for Jobs in Europe: measuring progress and moving ahead. Prepared for the European Commission. Bonn. 2014. URL: [file:///C:/Users/HP/Downloads/e-Skills%20in%20Europe%20Report%20-%20Feb%202014%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/e-Skills%20in%20Europe%20Report%20-%20Feb%202014%20(1).pdf)
20. **European** Commission. EU Skills Panorama Analytical Highlight "ICT Professionals". URL: <http://euskills Panorama.ec.europa.eu>
21. **Skill** supply and demand in Europe: medium-term forecasts up to 2020. Cedefop. 2012. 84 p. URL: [http://www.cedefop.europa.eu/en/Files/3052\\_en.pdf](http://www.cedefop.europa.eu/en/Files/3052_en.pdf)
22. **Wennergren D. M.** U. S. Forecast of Future IT Labor Supply and Demand. 2007. URL: <http://dodcio.defense.gov/Home/Initiatives/NetGenerationGuide/ForecastofFutureLaborSupplyandDemand.aspx>
23. **Anticipating** the development of the supply and demand of e-skills in Europe 2010–2015. URL: [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/e-skills\\_fore-sight\\_scenarios\\_2015\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/e-skills_fore-sight_scenarios_2015_en.pdf)
24. **Bartlett W.** Skills anticipation and matching systems in transition and developing countries: conditions and challenges. Working paper for the European Training Foundation, 2011. URL: [www.etf.europa.eu](http://www.etf.europa.eu)
25. **Forecast** and anticipation for skills demand and supply in ETF partner countries. Working paper for the European Training Foundation. 2013. URL: [www.etf.europa.eu](http://www.etf.europa.eu)
26. **Employment** and Social Development Canada. Canadian occupational Projection System. Imbalances Between Labour Demand and Supply 2011–2020. URL: <http://www23.hrsdc.gc.ca/1.3bd.2t.lilshhtml@-eng.jsp?lid=16&fid=1&lang=en>
27. **Кекконен А. Л., Сигова С. В.** Качественные характеристики в количественных прогнозах рынка труда // Сб. докл. по матер. Девятой Всероссийской научно-практической интернет-конф. "Спрос и предложение на рынке труда и рынке образовательных услуг в регионах России". Петрозаводск, 31 октября — 1 ноября 2012. Кн. 1. С. 154–164. URL: [http://labourmarket.ru/i\\_confs/conf9/book/iconf9\\_book1.pdf](http://labourmarket.ru/i_confs/conf9/book/iconf9_book1.pdf)
28. **Ticol D.** Labour supply / demand dynamics of Canada's information and communications technology (ICT) sector. Final Report, Nordicity. 2012. 30 p. URL: <http://www.nordicity.com/media/20121112pznzutcbz.pdf>
29. **Roodt J., Paterson A.** ICT skills in the labour market: An occupational-level analysis focusing on computer professionals and associate professionals 1996–2005. 2008. 68 p. URL: [http://www.labour.gov.za/DOL/downloads/documents/research-documents/ICT%20skills\\_DoL\\_Report.pdf](http://www.labour.gov.za/DOL/downloads/documents/research-documents/ICT%20skills_DoL_Report.pdf)
30. **Department** for Employment and Learning. Research Study on High-Level Skill Needs in NI ICT Sector. Final Report. Oxford Economics. 2009. 129 p. URL: [http://www.delni.gov.uk/research\\_study\\_on\\_high-level\\_skill\\_needs\\_in\\_ni\\_ict\\_sector\\_final\\_report.pdf](http://www.delni.gov.uk/research_study_on_high-level_skill_needs_in_ni_ict_sector_final_report.pdf)
31. **Thinking** ahead on e-skills for the ICT industry in Europe. Council of European Professional Informatics Societies. 2007. 144 p.
32. **Mammadova M., Mammadzadeh F.** Formation of supply and demand for IT Specialists on the base of competency model. Proceedings IV International Conference Problems of Cybernetics and Informatics (PCI–2012). Baku. Sept. 12–14, 2012. V. 4. P. 199–201.
33. **Salzman H., Kuehn D., Lowell L.** Guestworkers in the high-skill U.S. labor market: an analysis of supply, employment, and wage trends. 2013. URL: <http://www.epi.org/publication/bp359-guestworkers-high-skill-labor-market-analysis>
34. **Мамедова М. Г., Джабраилова З. Г., Мамедзаде Ф. Р.** Нечеткие многокритериальные методы для поддержки принятия решений по отбору ИТ-специалистов. Приложение к журналу "Информационные технологии". 2011. № 9. С. 17–24.
35. **Мамедова М. Г., Джабраилова З. Г., Мамедзаде Ф. Р.** Ситуационное управление рынком труда специалистов по информационным технологиям // Проблемы информационных технологий. Баку. 2014. № 1. С. 9–17.
36. **Dousek P., Nedomova L., Maryska M.** Differences between Offer and Demand on the ICT specialist's Czech Labor Market // Organizacija, 2012. V. 45, N. 6. P. 261–275. URL: <http://organizacija.fov.uni-mb.si/index.php/organizacija/article/view/498>
37. **Меллихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я.** Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука. 1990. 272 с.
38. **Борисов А. Н., Алексеев А. В., Крумберг О. А.** и др. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. Рига: Зинатне. 1982. 256 с.
39. **Zadeh L. A.** Fuzzy logic and approximate reasoning // Synthese. 1975. V. 80. P. 407–428.
40. **Нечеткие** множества и теория возможностей. Последние достижения: Пер. с англ. под ред. П. Р. Ягера. М.: Радио и связь. 1986. 408 с.
41. **Sugeno M.** Theory of fuzzy integral and its application. PhD thesis, Tokyo Institute of Technology, Japan. 1974. URL: <http://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/Author/SUGENO-M.html>

**M. H. Mammadova**, Head of Department, **Z. G. Jabrayilova**, Head of Sector, **F. R. Mammadzada**, Thesis Defender, Institut of Information Technology of Azerbaijan National Academy of Science. e-mail: [depart15@iit.ab.az](mailto:depart15@iit.ab.az), [www.ikt.az](http://www.ikt.az)

## Management Methodology of Coordination of Demand and Supply at the Labor Market of Information Technologies Specialists

*Modeling process of supply and demand interaction in the information technologies specialists (IT-specialists) labor market and management of their qualitative imbalance at macrolevel are considered. Types of supply and demand mismatch are allocated for IT specialists, evolution of approaches to identification of requirements for IT-personnel is shown, the main directions of supply and demand matching by IT specialists are defined. Methods of structural imbalance assessment on IT specialists labor market, degrees of IT specialists supply and demand mismatch on the basis of an fuzzy mismatch scale, algorithm of fuzzy classification of imbalance state are offered in the article.*

**Keywords:** labor market of IT specialists, supply and demand matching, quantitative mismatch, fuzzy mismatch scale, fuzzy classification of imbalance state

### References

1. **Sizova I. I.** *Razrabotka metodov situatsionnogo upravleniya pri reshenii zadach o naznacheniiah*. Avtoreferat dis. na sois. uchenoj stepeni kandidata tehn. nauk, Taganrog, 2006. URL: <http://www.dis-sercat.com/content/razrabotka-metodov-situatsionnogo-upravleniya-pri-reshenii-zadach-o-naznacheniayah>
2. **Misichenko N. Ju.** *Formalizovannyj analiz i modelirovanie informacionnyh processov v sisteme podderzhki trudoustrojstva vypusnikov vuza*. Avtoreferat dis. na sois. uchenoj stepeni kandidata jekon. Nauk.

- Rostov-na-Donu. 2009. URL: <http://www.referun.com/n/formalizovanny-analiz-i-modelirovanie-informatsionnyh-protsessov-v-sisteme-podderzhki-trudoustroystva-vypusnikov-vuza>
3. **Nikitina N. Sh., Burmistrova E. V.** Metodika otbora personala na vakansiju na osnove nechetkih pokazatelej. *Universitetskoe upravlenie: praktika i analiz*. 2001. N. 3. P. 98–103.
  4. **Lichter A., Peichl A., Sieglösch S.** *Micro-level labor demand estimation for Germany*. Institute for the Study of Labor (IZA), 2013. 54 p. URL: <http://ftp.iza.org/dp7494.pdf>
  5. **Dolls M., Lichter A., Schneider H., Sommer E.** *Projected micro-level dataset for Germany based on reweighting*. Institute for the Study of Labor. 2012. 18 p. URL: [http://www.neujobs.eu/sites/default/files/publication/2012/11/D10\\_5-Database%20ProjectedMicro-level%20database.pdf](http://www.neujobs.eu/sites/default/files/publication/2012/11/D10_5-Database%20ProjectedMicro-level%20database.pdf)
  6. **Hackl P., Wellund A.** Customer Satisfaction Measurement: PLS and Alternative Estimation Methods. *Proceeding of the 44<sup>th</sup> annual EOQ Congress*. Budapest. 2000. V. 2. P. 45–52.
  7. **Korovkin A. G.** *Dinamika zanjatosti i rynka truda. Voprosy makroekonomicheskogo analiza i prognozirovaniya*. M.: MAKSPress. 2001. 327 p.
  8. **Galljamov R. R.** *Sistema optimizacionnyh modelej professional'no-kvalifikacionnogo disbalansa rynka truda*. Avtoreferat dis. na sois. uchenoj stepeni kand. jekon. nauk. Ufa. 2007. URL: <http://economy-lib.com/sistema-optimizatsionnyh-modelej-professionalno-kvalifikatsionnogo-disbalansa-rynka-truda>
  9. **Gajjanov D. A., Galljamov R. R.** Model' minimizacii struktury disbalansov rynka truda. *Vestnik UGATU*. 2006. T. 8, № 2. S. 89–92.
  10. **Vasil'ev V. N., Gurtov V. A., Pituhin E. A.** i dr. *Rynok truda i rynek obrazovatel'nyh uslug v sub#ektah Rossijskoj Federacii*. M.: Tehnosfera. 2007. 680 s.
  11. **Il'in E. M., Klupt M. A., Lisovik B. S.** i dr. *Prognozirovaniye rynka truda*. SPb.: Levsha. 2001. 458 s.
  12. **Sigova S. V.** *Gosudarstvennoe regulirovanie sbalansirovannosti rynka truda*. Avtoreferat dis. na sois. uchenoj stepeni dokt. jekon. nauk. Moskva. 2011. URL: <http://www.dissers.ru/avtoreferati-dissertatsii-ekonomika/a176.php>
  13. **Shijanova L. A.** K probleme obespechenija sbalansirovannosti rynka obrazovatel'nyh uslug i potrebnostej jekonomicheskikh sistem v professional'nyh kadrah (na primere Kaliningradskoj oblasti). *Vestnik jekonomicheskoy integracii*. 2009. N. 8. S. 138–145.
  14. **Fasih T.** *Linking Education Policy to Labor Market Outcomes*. Washington: The World Bank. 2008. 108 p.
  15. **Pouliakas K.** A Balancing Act at Times of Austerity: Matching the Supply and Demand for Skills in the Greek Labour Market. *Cedefop and IZA*. 2014. 43 p. URL: <http://ftp.iza.org/dp7915.pdf>
  16. **Mamedova M. G., Mamedzade F. R.** Konceptual'nye podhody k intellektual'nomu upravleniju ryнком truda IT-specialistov. *Problemy informacionnyh tehnologij*. Baku. 2013. N. 2. C. 43–54. URL: <http://jpit.az/storage/files/article/4c6a7d9627737d406672aef687e9fb4.pdf>
  17. **Kon'junktura rynka truda**. URL: [http://komresurs.ru/Rrti-page01\\_a07.php](http://komresurs.ru/Rrti-page01_a07.php)
  18. **Kon'junktura rynka truda**. URL: <http://be5.biz/ekonomika/t003/25.htm>
  19. **E-Skills for Jobs in Europe: measuring progress and moving ahead**. Prepared for the European Commission. Bonn. 2014. 253 p. URL: [file:///C:/Users/HP/Downloads/e-Skills%20in%20Europe%20Report%20-%20Feb%202014%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/e-Skills%20in%20Europe%20Report%20-%20Feb%202014%20(1).pdf)
  20. **European Commission.** *EU Skills Panorama Analytical Highlight "ICT Professionals"*. URL: <http://euskillspanorama.ec.europa.eu>
  21. **Skill supply and demand in Europe: medium-term forecasts up to 2020**. Cedefop. 2012. 84 p. URL: [http://www.cedefop.europa.eu/en/Files/3052\\_en.pdf](http://www.cedefop.europa.eu/en/Files/3052_en.pdf)
  22. **Wennergren D. M. U. S.** *Forecast of Future IT Labor Supply and Demand*. 2007. URL: <http://dodcio.defense.gov/Home/Initiatives/NetGenerationGuide/ForecastofFutureLaborSupplyandDemand.aspx>
  23. **Anticipating the development of the supply and demand of e-skills in Europe 2010–2015**. URL: [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/e-skills\\_fore-sight\\_scenarios\\_2015\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/e-skills_fore-sight_scenarios_2015_en.pdf)
  24. **Bartlett W.** *Skills anticipation and matching systems in transition and developing countries: conditions and challenges*. Working paper for the European Training Foundation, 2011. URL: [www.etf.europa.eu](http://www.etf.europa.eu)
  25. **Forecast and anticipation for skills demand and supply in ETF partner countries**. Working paper for the European Training Foundation. 2013. URL: [www.etf.europa.eu](http://www.etf.europa.eu)
  26. **Employment and Social Development Canada.** Canadian Occupational Projection System. Imbalances Between Labour Demand and Supply 2011–2020. URL: <http://www23.hrsdc.gc.ca/1.3bd.2t.lilshhtml@-eng.jsp?lid=16&fid=1&lang=en>
  27. **Kekkonen A. L., Sigova S. V.** Kachestvennyye karakteristiki v kolichestvennyh prognozakh rynka truda. *Sb. dokladov po materialam Devjatoj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy internet-konferencii "Spros i predlozhenie na rynke truda i rynke obrazovatel'nyh uslug v regionah Rossii"*. Petrozavodsk, 31 oktjabrja — 1 nojabrja 2012. Kniga I. S. 154–164. URL: [http://labourmarket.ru/i\\_confs/conf9/book/iconf9\\_book1.pdf](http://labourmarket.ru/i_confs/conf9/book/iconf9_book1.pdf)
  28. **Ticol D.** *Labour supply / demand dynamics of Canada's information and communications technology (ICT) sector*. Final Report, Nordicity. 2012. 30 p. URL: <http://www.nordicity.com/media/20121112pnzutcbz.pdf>
  29. **Roodt J., Paterson A.** *ICT skills in the labour market: An occupational-level analysis focusing on computer professionals and associate professionals 1996–2005*. 2008. 68 p. URL: [http://www.labour.gov.za/DOL/downloads/documents/research-documents/ICT%20skills\\_DoL\\_Report.pdf](http://www.labour.gov.za/DOL/downloads/documents/research-documents/ICT%20skills_DoL_Report.pdf)
  30. **Department for Employment and Learning.** Research Study on High-Level Skill Needs in NI ICT Sector. Final Report. Oxford Economics. 2009. 129 p. URL: [http://www.delni.gov.uk/research\\_study\\_on\\_high-level\\_skill\\_needs\\_in\\_ni\\_ict\\_sector\\_final\\_report.pdf](http://www.delni.gov.uk/research_study_on_high-level_skill_needs_in_ni_ict_sector_final_report.pdf)
  31. **Thinking ahead on e-skills for the ICT industry in Europe**. Council of European Professional Informatics Societies. 2007. 144 p.
  32. **Mammadova M., Mammadzadeh F.** Formation of supply and demand for IT Specialists on the base of competency model. *Proceedings IV International Conference Problems of Cybernetics and Informatics (PCI–2012)*. Baku. Sept. 12–14, 2012. V. 4. P. 199–201.
  33. **Salzman H., Kuehn D., Lowell L.** *Guestworkers in the high-skill U. S. labor market an analysis of supply, employment, and wage trends*. 2013. URL: <http://www.epi.org/publication/bp359-guestworkers-high-skill-labor-market-analysis>
  34. **Mamedova M. G., Dzhabrailova Z. G., Mamedzade F. R.** *Nechetkie mnogokriterial'nye metody dlja podderzhki prinjatija reshenij po otboru IT-specialistov*. Prilozhenie k zhurnalu "Informacionnyye tehnologii". 2011. № 9. C. 17–24.
  35. **Mamedova M. G., Dzhabrailova Z. G., Mamedzade F. R.** Situacionnoe upravlenie ryнком truda specialistov po informacionnym tehnologijam. *Problemy informacionnyh tehnologij*. Baku. 2014. N. 1. C. 9–17.
  36. **Docsek P., Nedomova L., Maryska M.** Differences between Offer and Demand on the ICT specialist's Czech Labor Market. *Organizacija*, 2012. V. 45, N. 6. P. 261–275. URL: <http://organizacija.fov.uni-mb.si/index.php/organizacija/article/view/498>
  37. **Melihov A. N., Bernshtejn L. S., Korovin S. Ja.** *Situacionnyye sovetujushhie sistemy s nechetkoj logikoj*. M.: Nauka. 1990. 272 s.
  38. **Borisov A. N., Alekseev A. V., Krumberg O. A.** i dr. *Modeli prinjatija reshenij na osnove lingvisticheskoy peremennoj*. Riga: Zinatne. 1982. 256 s.
  39. **Zadeh L. A.** Fuzzy logic and approximate reasoning. *Synthese*, 1975. V. 80. P. 407–428.
  40. **Nechetkie mnozhestva i teorija vozmozhnostej. Poslednie dostizhenija**: Per. s angl. pod red. R. R. Jagera. M.: Radio i svjaz'. 1986. 408 s.
  41. **Sugeno M.** *Theory of fuzzy integral and its application*. PhD thesis. Tokyo Institute of Technology, Japan. 1974. URL: <http://www.lamsade.dauphine.fr/mcda/biblio/Author/SUGENO-M.html>

Ю. А. Зак, д-р техн. наук, науч. эксперт и консультант,  
Германия, г. Аахен, e-mail: yuriy\_zack@hotmail.com

## Вероятностные динамические модели анализа работы сборочных конвейерных линий

*Рассматриваются вероятностные динамические модели работы конвейерных линий в условиях стохастически заданных времен выполнения операций. Приведены законы распределения и вероятностные характеристики времени такта работы синхронных конвейерных линий. Предложены стохастические критерии эффективности работы. Сформулирована и решена задача оптимального распределения технологических операций по постам сборочного конвейера, с максимальной вероятностью обеспечивающая достижение времени такта работы конвейерной линии не выше заданного установленного значения либо обеспечивающая с вероятностью не ниже заданной некоторого минимального такта работы конвейера.*

*Предложены математические модели, технико-экономические показатели эффективности работы и алгоритмы анализа этих производств на основе дискретных цепей Маркова в условиях разбиения технологического процесса на несколько независимых друг от друга стадий и создания промежуточных накопителей определенных объемов. Сформулированы критерии эффективности работы производств, обеспечивающие минимальное значение суммарных приведенных потерь в этих условиях.*

**Ключевые слова:** конвейерные линии, минимизация времени такта, вероятностные динамические модели анализа, стохастические критерии эффективности

### Введение

Под структурной надежностью работы конвейерной линии понимается обеспечение возможности функционирования и эффективной работы отдельных стадий технологического процесса в условиях:

- случайных изменений времен выполнения отдельных технологических операций на некоторых сборочных постах;
- выхода из строя или снижения производительности отдельных рабочих станций;
- сбоев в поступлении материалов, заготовок и комплектующих, работы транспорта;
- отбраковки изделий после выполнения определенных объемов работ.

Обеспечение структурной надежности достигается рассинхронизацией технологического процесса, разбиением его на несколько независимых друг от друга стадий и созданием промежуточных накопителей определенных объемов. Благодаря наличию этих буферных накопителей и запасов изделий между отдельными стадиями технологического процесса при остановке или снижении производительности отдельных постов конвейера остальные посты некоторое время могут продолжать работать с прежней производительностью. При этом успешное решение задачи создания промежуточных накопителей между отдельными стадиями, определение оптимальных мест их расположения и объемов

этих накопителей позволит повысить эффективность их работы и сократить затраты на их создание и эксплуатацию.

В литературе наибольшее внимание уделялось решению задач в детерминированной постановке оптимального распределения всего множества технологических операций по постам сборочного конвейера, которые являются чрезвычайно важными для массового и крупносерийного производства (см., например, [1–9]). В качестве критерия эффективности работы сборочного конвейера можно рассматривать максимальную производительность сборочного конвейера, т. е. количество изделий, выпускаемых в единицу времени при заданном числе рабочих станций, определяемую выражением

$$E_1 = \max_{1 \leq k \leq m} \sum_{i \in \tilde{I}_k} t_i + \tau \geq \frac{1}{m\theta} \sum_{i \in \tilde{I}} t_i, \quad (1)$$

где  $m$  — заданное число рабочих станций;  $\tilde{I} = \{1, \dots, i, \dots, n\}$  — множество технологических операций, длительность каждой из которых равна  $t_i$ ;  $\theta = \bar{\theta} + \tau$  — время такта работы конвейера, включающего максимальную длительность обработки изделия на рабочих постах  $\bar{\theta}$  и время  $\tau$  перемещения изделия с одного рабочего поста на другой. В дальнейшем для простоты изложения под тактом работы конвейерной линии будем понимать величину  $\bar{\theta} = \theta - \tau$ ;  $\tilde{I}_k$  — подмножество операций, выполняемых на  $k$ -й рабочей станции. Пусть допусти-



мая последовательность выполнения технологических операций задана некоторым графом, где  $\bar{U}$  — множество всех дуг графа. Определим также следующие показатели:

$\bar{A}(i)$  — множество операций, которые могут выполняться только после завершения выполнения операции  $i$ ;  $\bar{B}(i)$  — множество операций, которые должны быть выполнены перед началом выполнения операции  $i$ .

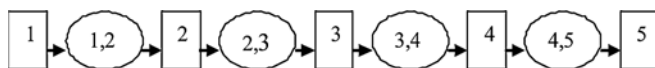
Рассматриваемая задача относится к классу  $NP$ -сложных задач экспоненциальной сложности. Применяемые на практике методы решения этой задачи, основанные на методах ветвей и границ, глобального случайного поиска, генетических алгоритмах и эволюционных стратегиях, а также эвристических методах, требуют больших объемов вычислений и не гарантируют получения точных решений для реальных практических приложений в условиях большой размерности.

Задачам обеспечения структурной надежности конвейерных линий в условиях стохастических или нечетких данных о временах выполнения отдельных операций и суммарных времен выполнения всех операций на отдельных постах сборочного конвейера уделялось недостаточное внимание в монографиях и периодической литературе. Здесь следует отметить работы [6, 7].

В данной работе рассматриваются математические модели анализа в следующих условиях. Конвейерная линия разбивается на несколько относительно независимо друг от друга работающих участков, соединенных буферными накопителями определенных размеров (см. рисунок), функцией которых является хранение продукции незавершенного производства.

В этих условиях снижение производительности отдельных рабочих станций или стадий технологического процесса не оказывает существенного влияния на остальные посты (рабочие станции) конвейерной линии, которые даже в этих условиях могут работать с прежней производительностью.

Создание буферных накопителей больших размеров связано с увеличением площадей, капитальных и эксплуатационных затрат и, начиная с некоторых размеров, уже не приводит к существенному увеличению производительности конвейерной линии. Изменяя структуру технологической линии, варьируя размерами буферных накопителей и распределением операций по постам сборочного конвейера, можно методами имитационного моделирования определить оптимальную структуру и технологию производственного процесса. Поэтому выбор их месторасположения и оптимальных раз-



Организация конвейерного производства

меров, а также алгоритма управления линией является очень важной задачей проектирования и организации конвейерного производства.

### 1. Распределение вероятностей времени такта работы конвейерной линии без буферных накопителей

Рассмотрим синхронно работающую конвейерную линию без буферных накопителей, включающую  $m$  рабочих станций. Пусть заданы  $W_k = \{w_{k1}, \dots, w_{kl}, \dots, w_{kL}\}$ ,  $k = 1, \dots, m$ , — множество операций, выполняемых на  $k$ -й рабочей станции,  $g_{kl}^p$  — время выполнения операции  $t(w_{kl})$ , а также дискретное распределение времени выполнения каждой из операций  $\pi_{kl}^g = p\{t(w_{kl}) = g_{kl}^p, l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, m; p = 1, \dots, d$ . Тогда дискретные распределения вероятностей суммарных времен выполнения всех технологических операций на каждой рабочей станции  $p_{kr} = p\{T_k = r\}$ ,  $r = 1, \dots, R$ ,  $k = 1, \dots, m$ , определяются по формулам

$$p_{kr} = \left\{ \prod_{l=1}^L \pi_{kl}^p \mid l = 1, \dots, L; \sum_{l=1}^L g_{kl}^p = r \right\}. \quad (2)$$

Если рабочая станция состоит из нескольких сборочных постов  $v = 1, \dots, V$  и  $\pi_{kl}^{vp} = p\{t(w_{kl}^{vp}) = g_{kl}^{vp}\}$  — дискретное распределение времени выполнения каждой из операций на  $v$ -м посту  $k$ -й рабочей станции, то распределение вероятностей суммарного времени выполнения всех технологических операций на этой рабочей станции

$$p_{kl}^v = \left\{ \prod_{l=1}^L \pi_{kl}^{vp} \mid l = 1, \dots, L; \sum_{l=1}^L g_{kl}^{vp} = r \right\},$$

$$p_{kr}\{T_k = r\} = \sum_{\eta=1}^V p_{kr}^v \left[ \prod_{v=1}^{\eta-1} \left( \sum_{l=1}^{r-1} p_{kl}^v \right) \right] \left[ \prod_{v=\eta+1}^V \left( \sum_{l=1}^r p_{kl}^v \right) \right]. \quad (3)$$

**Пример 1.** На рабочей станции выполняются три технологические операции. Распределение вероятностей времен выполнения операций на этой рабочей станции задано в табл. 1.

Таблица 1  
Распределение вероятностей времени выполнения операций на  $k$ -й рабочей станции

№ операции $l$	Распределение вероятностей времен выполнения операций					
	1-е значение		2-е значение		3-е значение	
	$g_l^1$	$\pi(g_l^1)$	$g_l^2$	$\pi(g_l^2)$	$g_l^3$	$\pi(g_l^3)$
1	2	0,4	3	0,6	—	—
2	5	0,3	6	0,4	7	0,3
3	4	0,2	5	0,8	—	—

**Распределение вероятностей суммарных времен выполнения операций на рабочих станциях**

№ стан- ции $k$	Распределение вероятностей суммарных времен выполнения операций							
	1-е значение		2-е значение		3-е значение		4-е значение	
	$T_k$	$p(T_k)$	$T_k$	$p(T_k)$	$T_k$	$p(T_k)$	$T_k$	$p(T_k)$
1	10	0,1	11	0,5	12	0,3	13	0,1
2	10	0,2	11	0,3	12	0,3	13	0,2
3	10	0,1	11	0,4	12	0,3	13	0,2

Распределение вероятностей суммарного времени выполнения всех операций на данной  $k$ -й рабочей станции:

$$\begin{aligned}
 p\{T_k = 11\} &= 0,4 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,024; \\
 p\{T_k = 12\} &= 0,4 \cdot 0,3 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,2 + \\
 &+ 0,6 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,164; \\
 p\{T_k = 13\} &= 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,3 \cdot 0,2 + \\
 &+ 0,6 \cdot 0,3 \cdot 0,8 + 0,6 \cdot 0,4 \cdot 0,2 = 0,344; \\
 p\{T_k = 14\} &= 0,4 \cdot 0,3 \cdot 0,8 + 0,6 \cdot 0,4 \cdot 0,8 + \\
 &+ 0,6 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,324; \\
 p\{T_k = 15\} &= 0,6 \cdot 0,3 \cdot 0,8 = 0,144.
 \end{aligned}$$

Математическое ожидание и дисперсия времени такта

$$\begin{aligned}
 m\{T_k\} &= (11 \cdot 0,024 + 12 \cdot 0,164 + 13 \cdot 0,344 + \\
 &+ 14 \cdot 0,324 + 15 \cdot 0,144 = 13,224; \\
 D\{T_k\} &= 0,024 \cdot [11 - 13,224]^2 + 0,164 \cdot [12 - 13,224]^2 + \\
 &+ 0,344 \cdot [13 - 13,224]^2 + 0,324 \cdot [14 - 13,224]^2 + \\
 &+ 0,144 \cdot [15 - 13,224]^2 = 0,8359.
 \end{aligned}$$

Распределение вероятностей времени такта работы конвейерной линии, т. е. распределение максимального времени работы среди всех рабочих станций, определяется согласно выражению

$$\begin{aligned}
 P\{\bar{T} = r\} &= \\
 &= \sum_{k=1}^m p_{kr} \left[ \prod_{l=1}^{k-1} \left( \sum_{l=1}^{r-1} p_{kl} \right) \right] \left[ \prod_{l=k+1}^m \left( \sum_{l=1}^r p_{kl} \right) \right], \\
 &r = 1, \dots, R. \tag{4}
 \end{aligned}$$

Если заданы непрерывные распределения вероятностей времен выполнения технологических операций на каждой рабочей станции  $p\{T_k = r\}$ ,  $r \in [q, R]$ ,  $k = 1, \dots, m$ , то распределение  $P\{\bar{T} = r\}$  вычисляется по формуле

$$P\{\bar{T} = r\} = p(T_{kr}) \cdot \sum_{l=1}^m \int_{l=k}^r p(T_{ls}) \cdot dp(T_l), \quad r \in [q, R]. \tag{5}$$

Здесь и в дальнейшем  $r \in [q, R]$  — возможный диапазон времен выполнения всех технологических операций.

Математическое ожидание и дисперсия времени такта работы конвейерной линии определяются согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
 m\{\bar{T}\} &= \sum_{r=1}^R r \cdot P\{\bar{T} = r\}, \\
 D\{\bar{T}\} &= \sum_{r=1}^R P\{\bar{T} = r\} \cdot (r - m\{\bar{T}\})^2. \tag{6}
 \end{aligned}$$

**Пример 2.** Пусть конвейерная линия состоит из трех рабочих станций. Распределение вероятностей суммарных времен выполнения технологических операций на каждой рабочей станции сведены в табл. 2.

Распределение вероятностей времени такта работы конвейерной линии

$$p\{\bar{T} = 10\} = 0,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 + 0,2 \cdot 0,9 \cdot 1,0 = 0,352;$$

$$p\{\bar{T} = 11\} = 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,9 + 0,3 \cdot 0,4 \cdot 0,9 + 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,5 = 0,548;$$

$$p\{\bar{T} = 12\} = 0,3 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,5 + 0,3 \cdot 0,1 \cdot 0,2 = 0,096;$$

$$p\{\bar{T} = 13\} = 0,1 \cdot 0,2 \cdot 0,2 = 0,004.$$

Математическое ожидание и дисперсия времени такта работы конвейерной линии соответственно равны

$$\begin{aligned}
 m\{\bar{T}\} &= (10 \cdot 0,352 + 11 \cdot 0,548 + 12 \cdot 0,096 + \\
 &+ 13 \cdot 0,004 = 10,652;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D\{\bar{T}\} &= 0,352 \cdot [10,652 - 10,0]^2 + \\
 &+ 0,548 \cdot [10,652 - 11,0]^2 + 0,096 \cdot [10,652 - 12,0]^2 + \\
 &+ 0,004 \cdot [10,652 - 13,0]^2 = 0,412.
 \end{aligned}$$

## 2. Критерии эффективности работы синхронных конвейерных линий

В случае стохастически заданных времен выполнения операций на постах сборочного конвейера в качестве критерия оптимальности могут рассматриваться следующие показатели:

- минимизация математического ожидания времени такта работы конвейерной линии ( $m\{\bar{T}\} \rightarrow \min$ ) в условиях ограничений  $D\{\bar{T}\} \leq \bar{D}$ ;
- максимизация вероятности того, что время такта работы конвейерной линии будет не более некоторого наперед заданного значения  $E$ :

$$\Phi_1 = P\{\bar{T} \leq E\} \rightarrow \max; \tag{7}$$

- минимизация времени такта работы конвейерной линии, значение ниже которого гарантируется с вероятностью не ниже заданной  $\bar{P}$  —

$$\Phi_2 = \min\{F|P\{\bar{T} \leq F\} \geq \bar{P}\}. \quad (8)$$

Кроме того, может рассматриваться двухкритериальная задача

$$m\{\bar{T}\} \rightarrow \min, D\{\bar{T}\} \rightarrow \min,$$

которая может быть сведена к однокритериальной линейной свертке критериев

$$\Phi_3 = m\{\bar{T}\} + \alpha \cdot \sigma\{\bar{T}\} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Здесь  $\sigma\{\bar{T}\} = \sqrt{D\{\bar{T}\}}$ ,  $\alpha$  — некоторый весовой коэффициент, который может быть выбран в пределах  $\alpha \in [0,15; 0,25]$ .

Наибольший интерес для практических приложений представляют критерии (7) и (8). В случае дискретных распределений суммарных времен выполнения операций на рабочих станциях сборочного конвейера

$$P\{\bar{T} \leq E\} = \sum_{r=\rho}^H \{P(\bar{T} = r)|H \leq E\} \rightarrow \max, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \{F|P\{\bar{T} \leq F\} \geq \bar{P}\} = \\ & = \left\{ \min H \left| \sum_{r=\rho}^H P(\bar{T} = r) \geq \bar{P} \right. \right\} \rightarrow \min, \quad (11) \end{aligned}$$

где значения  $P(\bar{T} = r)$  вычисляются по формулам (4).

В случае непрерывных законов распределения вероятностей

$$P\{\bar{T} \leq E\} = \int_{\rho}^E \{P(\bar{T} = r)\} \cdot dP(\bar{T} = r) \rightarrow \max, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \{F|P\{\bar{T} \leq F\} \geq \bar{P}\} = \\ & = \left\{ \min H \left| \int_{\rho}^H P(\bar{T} = r) \cdot dP(\bar{T} = r) \geq \bar{P} \right. \right\} \rightarrow \min. \quad (13) \end{aligned}$$

Здесь значения  $P(\bar{T} = r)$  вычисляются по формулам (6).

Рассмотрим алгоритм получения приближенного решения эвристическими методами задачи оптимального распределения технологических операций по постам сборочного конвейера, оптимизирующего один из критериев оптимальности (9)—(13).

Задача формулируется следующим образом. Пусть последовательность технологических операций сборки задана некоторым графом. Известны число рабочих станций, последовательности и длительности выполнения технологических операций  $t_i$ . Каждая из технологических операций должна выполняться только на какой-либо одной из рабочих станций.

Необходимо определить распределение всех операций по рабочим постам (станциям) и построить последовательность их выполнения на каждом  $k$ -м посту, обеспечивающие заданную технологию сборки и максимальную производительность сборочного конвейера, т. е. минимизацию одного из критериев оптимальности (9)—(13). Точные и приближенные методы решения этой задачи в условиях детерминированных времен выполнения технологических операций рассматривали многие авторы (см., например, [4—8]). Автором разработаны алгоритмы точных и приближенных методов решения этой задачи с учетом целого ряда важных для практических приложений ограничений на условия работы конвейерной линии. Автору неизвестны публикации, описывающие методы решения этой задачи в условиях стохастически заданных времен выполнения операций  $t_i$  с критериями оптимальности (9)—(13).

### 3. Обсуждение алгоритмов решения задачи обеспечения с максимальной вероятностью заданного времени такта работы конвейерной линии

Если известны математические ожидания времени выполнения каждой из технологических операций

$$M(t_i) = \sum_{l=1}^L p\{t_i = g_i^l\} \cdot g_i^l, \quad i \in \tilde{I} = \{1, \dots, i, \dots, n\}, \quad (14)$$

то нижняя граница приближенного значения такта работы конвейерной линии определяется выражением

$$\xi\{M(\bar{\theta})\} = \max \left\{ \left\lfloor \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n M(t_i) \right\rfloor; \max_{1 \leq i \leq n} M(t_i) \right\} + \tau. \quad (15)$$

Здесь и в дальнейшем  $\lfloor \cdot \rfloor$  — целая часть частного от деления двух величин;  $\tau$  — детерминированное значение времени транспортировки собираемого изделия с одного поста на другой.

Обозначим  $\tilde{I}_k$  — подмножество операций, выполняемых на  $k$ -м сборочном посту. Приближенное решение задачи минимизации математического ожидания времени такта работы конвейерной линии может быть выполнено алгоритмами минимизации времени такта работы синхронных конвейерных линий, алгоритмами, описанными в работах [5—8, 10], принимая значения  $M(t_i)$  в качестве детерминированных времен выполнения операций. В результате решения этой задачи будут определены подмножества выполнения операций на каждом из постов сборочного конвейера  $\tilde{I}_k$ ,  $k = 1, \dots, m$ , а также допустимые последовательности их выполнения.

Полученное допустимое решение задачи может быть использовано в качестве начального приближения и в дальнейшем улучшаться относительно значений критериев (10), (12) (или (11), (13)), описанным ниже методом локальных вариаций (см., например, [10]).

Если построено некоторое допустимое решение  $\tilde{\Omega}_0$ , удовлетворяющее условиям технологической последовательности выполнения операций, то для этого начального приближения могут быть вычислены следующие показатели:

- дискретные распределения вероятностей суммарных времен выполнения всех технологических операций на каждой рабочей станции  $p_{kr} = P\{T_k = r\}$  по формулам (2) или (3), которые обозначим  $(p_{kl}/\tilde{\Omega}_s)$ ,  $s = 0$ ;
- вероятность того, что суммарное время выполнения всех технологических операций на каждой рабочей станции не будет превышать заданное значение  $E$ ,

$$P\{T_k \leq E\} = \sum_{r=q}^H \{P(T_k \leq r) | H \leq E\}, \quad (16)$$

где  $q$  и  $H$  — соответственно минимальное и максимальное из допустимых в выражении (16) времена выполнения всех технологических операций;

- минимальное значение суммарного времени выполнения всех технологических операций на каждой рабочей станции, достижение которого гарантируется с вероятностью не ниже величины  $\bar{P}$ .

$$F_k = \{F | P(T_k \leq F) \geq \bar{P}\} = \left\{ \min H \mid \sum_{r=q}^H P(T_k \leq r) \geq \bar{P} \right\}; \quad (17)$$

- распределение вероятностей времени такта работы конвейерной линии по формулам (5) или (6);
- вероятность того, что время такта работы конвейерной линии не будет превышать заданного значения  $E$  и минимального времени такта работы конвейерной линии, достижение которого гарантируется с вероятностью не ниже величины  $\bar{P}$ , которые вычисляются соответственно по формулам (10), (11).

Обозначим все эти величины соответственно  $(p_{kl}/\tilde{\Omega}_s)$ ,  $P\{(T_k \leq E)|\tilde{\Omega}_s\}$ ,  $\{F_k|\tilde{\Omega}_s\}$ ,  $l = 1, \dots, L$ ,  $k = 1, \dots, m$ ,  $\{P(\bar{T} \leq E)|\tilde{\Omega}_s\}$ ,  $\{F|\tilde{\Omega}_s\}$  — значения соответствующих показателей на  $s$ -м шаге алгоритма.

Здесь  $s = 0, 1, \dots, S$  — шаги алгоритма локальной вариации.

С помощью процедуры локальной вариации осуществляется переход к другому допустимому

решению (от  $\tilde{\Omega}_s$  к  $\tilde{\Omega}_{(s+1)}$ ) с лучшим значением критерия оптимальности. Для простоты изложения алгоритм локальной вариации описываем для случая, когда каждая рабочая станция включает только один пост сборки изделий.

На каждом  $s$ -м шаге алгоритма ( $s = 0, 1, \dots, S$ ) выполняем следующее.

1. Вычисляем значения  $(p_{kl}/\tilde{\Omega}_s)$ ,  $l = 1, \dots, L$ ;  $P\{(T_k \leq E)|\tilde{\Omega}_s\}$  или  $\{F_k|\tilde{\Omega}_s\}$ ,  $k = 1, \dots, m$ , а также значения критерия оптимальности  $\{P(\bar{T} \leq E)|\tilde{\Omega}_s\}$  или  $\{F|\tilde{\Omega}_s\}$ .

2. Находим индекс рабочей станции, являющейся "узким местом":

$$\lambda_s = \arg \min_{1 \leq k \leq K} P\{(T_k \leq E)|\tilde{\Omega}_s\} \text{ или } \lambda_s = \arg \max_{1 \leq k \leq K} \{F_k|\tilde{\Omega}_s\}. \quad (18)$$

3. Обозначим  $\tilde{I}_{\lambda_s}$ ,  $\tilde{I}_{\lambda_s-1}$  и  $\tilde{I}_{\lambda_s+1}$  — подмножества технологических операций, выполняемых соответственно на  $\lambda_s$ -й,  $(\lambda_s - 1)$ -й и  $(\lambda_s + 1)$ -й рабочих станциях. Если

$$P\{(T_{\lambda_s+1} \leq E)|\tilde{\Omega}_s\} \geq P\{(T_{\lambda_s-1} \leq E)|\tilde{\Omega}_s\} \text{ или } \{F_{\lambda_s+1}|\tilde{\Omega}_s\} \leq \{F_{\lambda_s-1}|\tilde{\Omega}_s\}, \quad (19)$$

а) выберем одну из операций  $j \in \tilde{I}_{\lambda_s}$ , для которой  $\bar{A}(i) \cap \{\tilde{I}_{\lambda_s}/j\} = \emptyset$ , и перенесем ее в подмножество операций  $\tilde{I}_{\lambda_s+1}$ . Выполняем преобразования

$$\tilde{I}_{\lambda_s} = (\tilde{I}_{\lambda_s+1}/j), \tilde{I}_{\lambda_s+1} = (\tilde{I}_{\lambda_s} \cup j); \quad (20)$$

б) выберем одну из операций  $j \in \tilde{I}_{\lambda_s}$ , для которой  $\bar{A}(i) \cap \{\tilde{I}_{\lambda_s}/j\} = \emptyset$ , и одну из операций  $\zeta \in \tilde{I}_{\lambda_s+1}$ , для которых  $\bar{A}(i) \cap \{\tilde{I}_{\lambda_s}/j\} = \emptyset$ , и  $\bar{B}(i) \cap \{\tilde{I}_{\lambda_s+1}/\zeta\} = \emptyset$ , если  $M(t_j) > M(t_\zeta)$ , и поменяем их местами. Для этого выполняем преобразования

$$\tilde{I}_{\lambda_s} = \{(\tilde{I}_{\lambda_s+1}/j) \cup \zeta\}, \tilde{I}_{\lambda_s+1} = \{(\tilde{I}_{\lambda_s}/\zeta) \cup j\}. \quad (21)$$

Вычислим для вновь образованных подмножеств операций значения

$$(p_{kl}/\tilde{\Omega}_s), l = 1, \dots, L; P\{(T_k \leq E)|\tilde{\Omega}_s\} \text{ или } \{F_k|\tilde{\Omega}_s\},$$

где  $k = \lambda_s, \lambda_s + 1$ .

Вновь полученное решение обозначим  $\tilde{\Omega}_s^1$ .

Если для преобразования 3а или хотя бы для одной пары преобразования 3б справедливо неравенство

$$\begin{aligned} \max\{P\{(T_{\lambda_s} \leq E)|\tilde{\Omega}_s^1\}; P\{(T_{\lambda_s+1} \leq E)|\tilde{\Omega}_s^1\}\} > \\ > P\{(\bar{T} \leq E)|\tilde{\Omega}_s\}, \\ \min\{F_{\lambda_s}|\tilde{\Omega}_s^1\}; \{F_{\lambda_s+1}|\tilde{\Omega}_s^1\} < \{F|\tilde{\Omega}_s\}, \end{aligned} \quad (22)$$

то оставляем преобразованные подмножества выполнения операций на рабочих станциях  $k = \lambda_s, \lambda_s + 1$ , формируем новые последовательности выполнения операций на этих рабочих станциях и переходим к  $(s + 1)$ -му шагу итерации, т. е., положив  $s := (s + 1)$ , возвращаемся к пункту 1 алгоритма. В противном случае переходим к пункту 4.

4. а) Выберем одну из операций  $j \in \tilde{I}_{\lambda_s}$ , для которой  $\bar{B}(i) \cap \{\tilde{I}_{\lambda_s}/j\} = \emptyset$ , и перенесем ее в подмножество операций  $i \in \tilde{I}_{\lambda_s-1}$ . Выполняем преобразование

$$\tilde{I}_{\lambda_s} = (\tilde{I}_{\lambda_s+1}/j)\tilde{I}_{\lambda_s-1} = (\tilde{I}_{\lambda_s} \cup j). \quad (23)$$

б) Выберем одну из операций  $j \in \tilde{I}_{\lambda_s}$ , для которой  $\bar{B}(i) \cap \{\tilde{I}_{\lambda_s}/j\} = \emptyset$ , и одну из операций  $\varsigma \in \tilde{I}_{\lambda_s-1}$ , для которой  $\bar{A}(i) \cap \{\tilde{I}_{\lambda_s-1}/\varsigma\} = \emptyset$  и  $M(t_j) > M(t_\varsigma)$ . Поменяем их местами, выполнив преобразования соответствующих подмножеств

$$\tilde{I}_{\lambda_s} = \{(\tilde{I}_{\lambda_s+1}/j) \cup \varsigma\}, \tilde{I}_{\lambda_s-1} = \{(\tilde{I}_{\lambda_s}/\varsigma) \cup j\}. \quad (24)$$

Вычислим для вновь образованных подмножеств операций значения

$$(p_{kl}|\tilde{\Omega}_s), l = 1, \dots, L; P\{(T_k \leq E)|\tilde{\Omega}_s\} \text{ или } \{F_k|\tilde{\Omega}_s\},$$

где  $k = \lambda_s, \lambda_s - 1$ .

Вновь полученное решение обозначим  $\tilde{\Omega}_s^2$ .

Если для преобразования 3а или хотя бы для одной пары преобразования 3б справедливо неравенство

$$\begin{aligned} \max\{P\{(T_{\lambda_s} \leq E)|\tilde{\Omega}_s^2\}; P\{(T_{\lambda_s-1} \leq E)|\tilde{\Omega}_s^2\}\} > \\ > P\{(\bar{T} \leq E)|\tilde{\Omega}_s\}, \\ \min\{F_{\lambda_s}|\tilde{\Omega}_s^2\}; \{F_{\lambda_s-1}|\tilde{\Omega}_s^2\} < \{F|\tilde{\Omega}_s\}, \end{aligned} \quad (25)$$

то оставляем преобразованные подмножества выполнения операций на рабочих станциях  $k = \lambda_s, \lambda_s - 1$ , формируем новые последовательности выполнения операций на этих рабочих станциях и, положив  $\tilde{\Omega}_{s+1} = \tilde{\Omega}_s^2$ , переходим к  $(s + 1)$ -му шагу итерации, положив  $s := (s + 1)$ , возвращаемся к п. 1 алгоритма. В противном случае алгоритм завершает свою работу и полученное распределение операций по постам сборочного конвейера принимается в качестве оптимального решения.

Отметим, что если не выполняется система неравенств (19), то вначале выполняется пункт 4 алгоритма, а потом пункт 3.

Автором был выполнен вычислительный эксперимент, в процессе которого решались задачи размерностью  $n = 100 \dots 150$  операций и  $m = 8 \dots 15$  рабочих станций. Матрица смежности графа последовательности технологических операций содержала 10...15 % единиц. Времена выполнения технологических операций в диапазоне  $t_j \in [3, 10]$  выбирались случайным образом. Было решено более 40 задач. В результате выполненного вычислительного эксперимента было установлено, что алгоритмом локальных вариаций за число больших итераций, равное  $S \leq 75$ , как правило, может быть получено решение, значение критерия оптимальности которого на 7...15 % лучше решения, принятого в качестве начального приближения.

#### 4. Стохастический анализ работы асинхронных конвейерных линий

Рассматриваются динамические вероятностные модели (на основе дискретных цепей Маркова с конечным множеством состояний) анализа состояния производительности и запасов в буферных накопителях для различных организационных структур конвейерных линий. Суммарные времена выполнения операций на каждом из постов сборочного конвейера заданы произвольными дискретными законами распределения вероятностей. Распределения вероятностей времени такта и производительности сборочного конвейера — функция от размеров буферных емкостей и выбранного распределения времени выполнения всех операций на различных постах сборочного конвейера. В результате анализа будут определены вероятности различных значений производительности отдельных станций, участков технологического процесса и всей технологической линии, а также состояния запасов в буферных накопителях в произвольные моменты времени.

Введем следующие обозначения:

$k = 1, \dots, m$  — индексы рабочих станций (постов сборочного конвейера);

$l = 0, 1, \dots, L$  (в частности,  $L = m$ ) — индексы буферных накопителей;

$t = 0, 1, \dots, T$  — номера временных интервалов;

$B_l(B_l^-, B_l^+)$  — максимальный объем  $l$ -го буферного накопителя (стоящего до ( $l = k - 1$ ) и после  $k$ -й ( $l = k$ ) рабочей станции), измеряемый числом хранящихся в нем изделий;

$\rho_k(t, \tau) \geq 0$  — вероятность того, что в  $t$ -м временном интервале суммарное время выполнения всех операций на  $k$ -й рабочей станции равно  $\tau$ ,

$$\sum_{\tau = d_k}^{D_k} \rho_k(t, \tau) = 1, \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T. \text{ Если}$$

случайные процессы изменения времени выполнения технологических операций стационарны, то значения вероятностей  $\rho_k(t, \tau)$  при установлении стационарного режима работы системы не зависят от уровня начальных запасов в накопителях;  $d_k$  и  $D_k$  — соответственно минимальное и максимальное значения времени выполнения всех операций на  $k$ -й рабочей станции;

$S_k^-(t) = S_{k-1}(t)$  и  $S_k^+(t) = S_k(t)$  — соответственно число изделий в буферном накопителе перед и после  $k$ -й рабочей станции в  $t$ -м временном интервале;

$p(S_k^-(r, t)), p(S_k^+(r, t))$  — вероятности того, что в  $t$ -м временном интервале число изделий в соответствующем накопителе будет равно  $r$ ;

$$\sum_{r=0}^{B_k^-} p(S_k^-(r, t)) = 1, \quad \sum_{r=0}^{B_k^+} p(S_k^+(r, t)) = 1, \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (26)$$

$p(A_k(t))$  — вероятности того, что в  $t$ -й временной интервал  $k$ -я рабочая станция начнет выполнение технологических операций;  $p(E_k(t))$  — вероятности того, что в  $t$ -й временной интервал  $k$ -я рабочая станция завершит выполнение всех технологических операций по сборке какого-то изделия;  $p(G_k(t))$  — вероятности того, что в  $t$ -й временной интервал  $k$ -я рабочая станция завершила обработку предыдущего и будет готова к началу обработки нового изделия;  $p(F_k(t))$  — вероятности того, что в  $t$ -й временной интервал  $k$ -я рабочая станция в одном из предыдущих временных интервалов закончила обработку изделия и передает его в накопитель, стоящий после этой станции;  $p(R_k(t))$  — некоторое вспомогательное значение вероятности, необходимое для последующих вычислений.

Дискретные распределения вероятностей времени начала, завершения обработки изделия и готовности каждой рабочей станции для начала обработки

следующего изделия в произвольный момент времени  $t$  могут быть вычислены либо по формулам

$$p(E_k(t)) = \sum_{\tau = d_k}^{D_k} \rho_k(t, \tau) \cdot p(A_k(t - \tau)), \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 1, \dots, T; \quad (27)$$

$$p(A_k(t)) = p(G_k(t)) \cdot p[S_k^-(t - 1) \geq 1], \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (28)$$

$$p(R_k(t)) = p(E_k(t)) + p(F_k(t - 1)) - p(E_k(t)) \cdot p(F_k(t - 1)), \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (29)$$

$$p(G_k(t)) = p(R_k(t)) \cdot p(S_k^+(t - 1) < B_k), \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (30)$$

$$p(F_k(t)) = p(R_k(t)) \cdot [1 - p(G_k(t))], \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (31)$$

или согласно выражениям

$$p(G_k(t)) = p(G_k(t - 1)) \cdot [1 - p(A_k(t - 1))] + p(E_k(t - 1)) - p(G_k(t - 1)) \times [1 - p(A_k(t - 1))] \cdot p(E_k(t - 1)), \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (32)$$

$$p(F_k(t)) = p[S_k^+(t - 1) < B_k^+] \cdot \{p(E_k(t)) + \sum_{h=1}^{H_k} p(E_k(t - h)) \cdot p[S_k^+(t - h - 1) = B_k^+] - \sum_{h=1}^{H_k} p(E_k(t)) \cdot p(E_k(t - h)) \cdot p[S_k^+(t - h - 1) = B_k^+]\}, \quad k = 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T. \quad (33)$$

Вероятности различных значений состояния запасов (измеряемое числом изделий) в накопителях, расположенных перед и после рабочих станций, в произвольный момент времени  $t$  могут быть вычислены по следующим формулам:

$$p(S_k(r, t)) = p(S_k(r, t - 1)) \cdot \{p(A_{k+1}(t)) \cdot p(G_k(t)) + [1 - p(A_{k+1}(t))] \cdot [1 - p(G_k(t))] + p(S_k(r + 1, t)) \times p(A_{k+1}(t)) \cdot [1 - p(G_k(t))] + p(S_k(r - 1, t)) \times [1 - p(A_{k+1}(t))] \cdot p(G_k(t)), \quad k = 0, 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (34)$$

$$p(S_k(0, t)) = p(S_k(0, t - 1)) \cdot \{p(A_{k+1}(t)) \cdot p(G_k(t)) + [1 - p(G_k(t))] + p(S_k(1, t)) \cdot p(A_{k+1}(t)) \times [1 - p(G_k(t))], \quad k = 0, 1, \dots, m, \quad t = 0, 1, \dots, T; \quad (35)$$

$$p(S_k(B_k, t)) = p(S_k(B_k, t - 1)) \cdot \{p(A_{k+1}(t)) \cdot p(G_k(t)) + [1 - p(A_{k+1}(t))] + p(S_k(B_k - 1, t)) \cdot p(G_k(t)) \times [1 - p(A_{k+1}(t))], \quad k = 0, 1, \dots, m; \quad t = 0, 1, \dots, T. \quad (36)$$

В качестве частных случаев могут быть рассмотрены ситуации, в которых отсутствуют буферные накопители, стоящие либо перед, либо после рабочей станции, а также случаи, когда отсутствуют два накопителя. Во всех рассматриваемых ниже случаях вероятности того, что завершение выполнения всех технологических операций на  $k$ -й рабочей станции произойдет в  $t$ -м временном интервале, т. е. значение  $p(E_k(t))$ , рассчитывается по формулам (27). Распределения вероятностей времен начала выполнения операций на рабочей станции в этих случаях рассчитывают по другим формулам. Рассмотрим следующие случаи:

а) отсутствуют два накопителя:

$$p(F_k(t)) = p(E_k(t)) + p(F_k(t-1)) \cdot [1 - p(A_k(t-1))] - p(E_k(t)) \cdot p(F_k(t-1)) \cdot [1 - p(A_k(t-1))],$$

$$k = 0, 1, \dots, m; t = 0, 1, \dots, T; \quad (37)$$

$$p(A_k(t)) = p(F_k(t)) \cdot p(E_{k-1}(t-1)) \cdot p(E_{k+1}(t-1));$$

$$k = 0, 1, \dots, m; t = 0, 1, \dots, T; \quad (38)$$

б) отсутствует буферный накопитель перед рабочей станцией. Вероятности  $p(R_k(t))$ ,  $p(G_k(t))$  и  $p(F_k(t))$  рассчитываются по формулам (29)–(31); вероятности значений времени начала обработки изделий на  $k$ -й рабочей станции в момент времени  $t$  определяются по формулам

$$p(A_k(t)) = p(G_k(t)) \cdot p(E_{k-1}(t-1)),$$

$$k = 0, 1, \dots, m; t = 0, 1, \dots, T; \quad (39)$$

в) отсутствует буферный накопитель перед рабочей станцией.

Вероятности  $p(F_k(t))$  рассчитываются по формулам (31), а вероятности  $p(A_k(t))$  — по следующим формулам:

$$p(A_k(t)) = p(F_k(t)) \cdot p(F_{k+1}(t-1)) \cdot p(S_k^-(t-1) \geq 1),$$

$$k = 0, 1, \dots, m; t = 0, 1, \dots, T. \quad (40)$$

Анализ работы асинхронной конвейерной линии представляет собой некоторый итеративный процесс. На каждом шаге итерации  $t = 0, 1, \dots, T$ , число которых равно числу анализируемых временных интервалов, предусматривается последовательность расчетов вероятностей начала, завершения выполнения всех операций на каждой рабочей станции, а также распределения вероятностей состояния запасов во всех буферных накопителях в каждом временном интервале  $t$ , т. е. выполняются вычисления и рассчитываются все показатели технологического процесса для данного временного интервала  $t$  по формулам (27)–(36). После выполнения итеративного процесса рассчитываются все технико-экономические показатели производства по формулам, приведенным ниже в разделе 5 работы.

## 5. Анализ технико-экономических показателей результатов моделирования

Математическое ожидание и дисперсия суммарного числа изделий, обработанных каждой рабочей станцией и всей конвейерной линией за  $T$  временных интервалов, определяются согласно выражениям

$$M[G_k(T)] = \sum_{t=0}^T p(E_k(t)), \quad k = 1, \dots, m; \quad (41)$$

$$\sigma^2[G_k(T)] = \sum_{t=0}^T \left\{ p(E_k(t)) - \frac{M[G_k(T)]}{T+1} \right\}^2,$$

$$k = 1, \dots, m. \quad (42)$$

Для приближенных расчетов распределения вероятностей суммарного количества выпущенных  $k$ -й рабочей станцией изделий за  $(T+1)$  временных интервалов можно воспользоваться предельной теоремой теории вероятностей. Согласно этой теореме при значении  $(T+1) \rightarrow \infty$  распределение суммы независимых случайных величин стремится к нормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным  $M[G_k(T)]$ , и дисперсией, равной  $\sigma^2[G_k(T)]$ , которые рассчитываются согласно выражениям (41), (42). Перейдем к рассмотрению нормированных значений переменных:

$$z_k = \frac{G_k(T) - M[G_k(T)]}{\sigma[G_k(T)]\sqrt{2}}, \quad k = 1, \dots, m. \quad (43)$$

Функция нормального закона распределения для нормированных переменных имеет вид

$$P\{\beta_{1k} \leq z_k \leq \beta_{2k}\} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\beta_{1k}}{\sigma_k}}^{\frac{\beta_{2k}}{\sigma_k}} e^{-\frac{z_k^2}{2}} dz_k,$$

$$k = 1, \dots, m. \quad (44)$$

Вероятности соответствующих значений объемов выпуска изделий вычисляются по формулам Лапласа. В литературе по теории вероятностей и математической статистике [11] приведены соответствующие таблицы, упрощающие выполнение таких расчетов. В выражении (44) значения  $M_k$  и  $\sigma_k$  заменены величинами  $M[G_k(T)]$  и  $\sigma[G_k(T)]$ , рассчитанными по формулам (41), (42). Вместо значений  $\beta_{1k}$  и  $\beta_{2k}$  должны быть подставлены соответствующие граничные значения временного диапазона.

Если известна функция распределения вероятностей суммарного количества выпущенных изделий каждой  $k$ -й рабочей станцией за  $(T+1)$  временных интервалов, то могут быть рассчитаны все моменты более высоких порядков этой функции распределения, а также следующие технико-экономические показатели и вероятностные оценки

работы каждой рабочей станции и всей конвейерной линии:

— суммарное количество обработанных изделий, выпуск которого гарантируется с вероятностью не ниже заданной;

— вероятность того, что объем выпуска изделий будет больше и равен заданного установленного количества.

#### Список литературы

1. Конвей Р. В., Максвелл В. Л., Миллер Л. В. Теория расписаний. М.: Физматгиз, Наука, 1975. 359 с.
2. Танаев В. С., Ковалев М. Я., Шафранский Я. М. Теория расписаний. Групповые технологии. Минск: Изд-во Института технической кибернетики НАН Беларуси, 1998. 289 с.
3. Танаев В. С., Сотсков Ю. Н., Струевич В. А. Теория расписаний. Многостадийные системы. М.: URSS, 1989. 328 с.

4. Ху Т. С. Параллельное упорядочение и проблемы линии сборки // Кибернетический сборник. 1967. Вып. 4. С. 43—56.

5. Зак Ю. А. Оптимальное распределение технологических операций на сборочном конвейере // Кибернетика. 1990. № 4. С. 45—54.

6. Зак Ю. А. Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. М.: URSS, 2012. 394 с.

7. Зак Ю. А. Повышение эффективности работы сборочных конвейерных линий // Научное обозрение: экономика и управление. 2012. № 4. С. 123—134.

8. Domschke W., Scholl A., Voss S. Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005. 456 s.

9. Joldbauer H. Produktionsoptimierung: Wirtschaftliche sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. Berlin-Wien: Springer, 2008. 390 s.

10. Зак Ю. А. Методы локальных вариаций в решении задач теории расписаний // Информационные технологии. 2013. № 4. С. 12—19.

11. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

Yu. A. Zack, Dokt.-Ing. Deutschland, Aachen, Deutschland  
e-mail: yuriy\_zack@hotmail.com

## Probabilistic Dynamic Models of the Analysis of Functioning of Assembly Conveyorlines

*Probabilistic dynamic models of the conveyor lines are considered for stochastically given times of the operations. The distribution and probabilistic characteristics of the machine cycle of the synchronous assembly lines are defined. Stochastic performance criteria are introduced. The problem of optimal allocation of technological operations of the assembly line with the maximal probability of the machine cycle time of the assembly line to be not higher than a given value or with the probability to be not less than a given minimal conveyor's cycle time is considered.*

*The mathematical models, technical and economic parameters of the efficiency and algorithms of the analysis of these types of industries are based on using discrete Markov chains assuming the partition of the technological process in several independent stages and the creation of intermediate storage of certain volumes. The criteria of the efficiency of production minimizing total losses are formulated.*

**Keywords:** conveyor lines, minimization of machine cycle, probabilistic dynamic models, stochastic criteria of efficiency

#### References

1. Konvej R. V., Maxwell V. L., Miller L. V. Teoria raspisanij. M.: Fizmatgiz, Nauka, 1975. 395 p.
2. Tanajev V. S., Kovalev M. Ja., Shafransky Ja. M. Teoria raspisanij. Gruppovije tehnologij. Minsk: Institut Technicheskoj Kibernetiki NAN Belorusii, 1998. 289 p.
3. Tanajev V. S., Sotskov Yu. N., Strusevitch V. A. Teoria raspisanij. Mnogostadijnije sistemi. M.: URSS, 1989, 328 p.
4. Hu T. S. Parallelnoje uporyadochenije i problemi linii sborki. Kibemeticheskij sbornik. M.: Nauka, 1967. V. 4. P. 43—56.
5. Zack Yu. A. Optimalnoje raspredelemje texnologicheskich operacij na sborochnom konvejere. Kibemetika (Kiev). 1990. N. 4. P. 45—54.

6. Zack Yu. A. Prikladnije zadachi teorii raspisanij i marshrutisazij perevosok. M.: URSS, 2012. 394 p.

7. Zack Yu. A. Povishenije effektivnosti raboti sborochnich konvejernih linij. Nauchnoje obosrenije: ekonomika i upravlenije. 2012. N. 4. P. 123—134.

8. Domschke W., Scholl A., Voss S. Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005, 456 p.

9. Joldbauer H. Produktionsoptimierung: Wirtschaftliche sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. Berlin-Wien: Springer, 2008. 390 p.

10. Zack Yu. A. Metodi lokalnich variatsij v reshenii sadach teorii raspisanij. Informatsionnije tehnologij. 2013. N. 4. P. 12—19.

11. Ventzel E. S. Teorija verojatnostej. M.: Nauka, 1969. 576 p.



**ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ**



# НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**№ 4**

**АПРЕЛЬ**

**2015**

**Главный редактор:**

ГАЛУШКИН А. И.

**Редакционная коллегия:**

АВЕДЬЯН Э. Д.  
БАЗИЯН Б. Х.  
БЕНЕВОЛЕНСКИЙ С. Б.  
БОРИСОВ В. В.  
ГОРБАЧЕНКО В. И.  
ЖДАНОВ А. А.  
ЗЕФИРОВ Н. С.  
ЗОЗУЛЯ Ю. И.  
КРИЖИЖАНОВСКИЙ Б. В.  
КУДРЯВЦЕВ В. Б.  
КУЛИК С. Д.  
КУРАВСКИЙ Л. С.  
РЕДЬКО В. Г.  
РУДИНСКИЙ А. В.  
СИМОРОВ С. Н.  
ФЕДУЛОВ А. С.  
ЧЕРВЯКОВ Н. И.

**Иностранные  
члены редколлегии:**

БОЯНОВ К.  
ВЕЛИЧКОВСКИЙ Б. М.  
ГРАБАРЧУК В.  
РУТКОВСКИЙ Л.

**Редакция:**

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

**Гридин В. Н., Солодовников В. И., Евдокимов И. А.**

Нейросетевой алгоритм симметричного шифрования . . . 306

**Кульчин Ю. Н., Ким А. Ю., Ноткин Б. С., Люхтер А. Б.**

Обработка сигналов распределенной волоконно-оптической сети для распознавания динамических образов с применением нейронных сетей . . . . . 312

**В. Н. Гридин**, д-р техн. наук, проф., директор, e-mail: info@ditc.ras.ru,  
**В. И. Солодовников**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., e-mail: info@ditc.ras.ru,  
**И. А. Евдокимов**, мл. науч. сотр., e-mail: info@ditc.ras.ru  
 Центр информационных технологий в проектировании (ЦИТП) РАН, г. Одинцово, МО

## Нейросетевой алгоритм симметричного шифрования\*

*Рассмотрены вопросы применения нейронных сетей для криптографической защиты информации. Проведен анализ особенностей использования ряда нейросетевых парадигм. Предложены алгоритмы шифрования, дешифрования и преобразования данных. Проанализирован ключ шифрования и его влияние на криптостойкость. Исследована возможность применения частотного криптоанализа. Предложена общая схема подсистемы шифрования.*

**Ключевые слова:** нейронные сети, перцептрон, RBF-сети, LVQ-сети, криптографическая защита, шифрование, дешифрование

### Введение

Данные являются ценным ресурсом, доступ к которому необходимо строго контролировать и регламентировать. В целях предупреждения возможной угрозы несанкционированного доступа наиболее часто используют методы криптографической защиты. В настоящее время единственно надежным способом шифрования является метод "одно-разового блокнота", предложенный в 1917 г. Гильбертом Вернамом (Gilbert Vernam), поскольку доказана его безусловная секретность, т. е. секретность по отношению к лицу, которое стремится получить несанкционированный доступ к информации и обладает неограниченными временем и вычислительной мощностью. Поэтому непрерывно идет поиск новых подходов и алгоритмов, которые обеспечивали бы надежную сохранность информации. В качестве основы одного из таких подходов предлагается использование нейросетевых технологий. Это объясняется тем обстоятельством, что особенностью ряда нейронных сетей является способность восстановления искаженных сигналов и распознавания объектов, имеющих характеристики, отличные от эталонных. Вместе с тем многие асимметричные криптосистемы основаны на использовании односторонних функций  $f$  с секретом, для которых инвертирование функции затруднено. К таким функциям можно отнести сигмоидные (логистические) и радиальные базисные функции, вычисление обратных значений которых проблематично, если неизвестны значения их коэффициентов. Эти же функции используют во многих парадигмах нейронных сетей [1, 2], причем поиск обратного значения здесь усложняется, поскольку это значение может находиться в некоторой области, связанной с функ-

цией некоторым набором правил. Эта сложность зависит от характеристик области (линейные или нелинейные границы, связная или несвязная область и т. д.). Именно эти принципы и положены в основу предлагаемого подхода. Кроме того, алгоритмы на основе нейронных сетей реализуются аппаратно, что позволяет увеличить скорость шифрования и дешифрования данных.

### Общий принцип шифрования на базе нейронных сетей

Предлагаемый алгоритм может быть отнесен к блочным шифрам, что обусловлено структурными особенностями нейронных сетей, а именно фиксированным числом входных элементов и внутренним представлением данных. Без потери общности будем рассматривать алгоритм шифрования некоторой текстовой информации, т. е. будем оперировать символами или наборами символов (классами) и их кодами. В случае необходимости аналогичные рассуждения могут быть проведены для любых кортежей вида  $(x_1, \dots, x_s)$ , состоящих из 0 и 1, где  $s$  — размерность блока шифруемых данных. Таким образом, предлагаемый алгоритм применим для любого потока данных.

Системы шифрования обычно включают следующие основные компоненты [3]:

- ключ шифрования;
- алгоритм шифрования, который определяет способ преобразования исходных данных в зашифрованные с помощью ключа шифрования;
- ключ дешифрования;
- алгоритм дешифрования, который задает, как с помощью ключа дешифрования преобразовать зашифрованные данные в исходные.

Рассмотрим, как соотносятся указанные компоненты с нейросетевым подходом. Так, в систему могут быть включены несколько шаблонов различ-

\* Работа выполняется по Программе фундаментальных исследований ОНИТ РАН, проект № 2.4.

ных нейронных сетей (многослойный персептрон, сети с радиальными базисными функциями RBF, LVQ-сети и т. д.) [1, 2]. Выбранную парадигму для конкретного случая можно считать одной из составных частей ключа шифрования и дешифрования. Чтобы использовать сеть, необходимо задать ее структурные характеристики: число слоев, число нейронов в слое, значения весовых коэффициентов, функции активации, пороговые значения и т. д. Эти характеристики используются как еще одна составная часть ключа. Они определяют алгоритмы шифрования и дешифрования и, с одной стороны, зависят от нейронной сети, а с другой стороны, определяются представлением кода — его длиной, числом одновременно кодируемых символов и т. п.

Алгоритм шифрования основывается на поиске искаженного кода, который может распознать или восстановить используемая сеть с заданными характеристиками [4]. В наиболее общем случае можно выделить два варианта:

- если известна область, в которой допустимы искажения кода символа или группы символов, код выбрасывается датчиком случайных чисел в этой области;
- если такая область неизвестна, датчик случайных чисел выбрасывает произвольный код; этот код пропускается через нейронную сеть; если требуемый код не удается восстановить, процесс повторяется до тех пор, пока не будет восстановлен код.

Таким образом, важным вопросом при построении нейросетевой системы шифрования является подготовка данных и формирование областей допустимых искажений кода. С одной стороны, это обусловлено тем обстоятельством, что во втором случае, когда генерируется произвольный код, процесс шифрования может занимать довольно длительные промежутки времени. С другой стороны, для улучшения стойкости получаемого шифротекста необходимо стремиться к равномерному распределению кодов символов (классов) в пространстве шифрования, что способно сильно затруднить процесс частотного криптоанализа.

Алгоритм дешифрования заключается в распознавании поступающего на вход сети шифротекста. В результате на выходе пользователь получает набор исходных символов (кодов классов).

### Алгоритм шифрования

Для реализации алгоритма шифрования необходимо рассмотреть следующие основные этапы [4]:

- предварительный этап, на котором осуществляется преобработка дан-

ных [5] и формируется обучающее множество с учетом частотности появления символов из исходного алфавита (формирование кластеров);

- построение нейросети — выбор нейросетевой парадигмы, определение структуры нейронной сети и задание значений весовых коэффициентов (обучение);
- основной этап, на котором происходит процесс шифрования.

Предварительный этап и формирование нейросети обязательно должны предшествовать этапу шифрования, однако после получения обученной сети процесс шифрования может осуществляться многократно.

На рис. 1 представлены основные составляющие блока шифрования.

**Предварительный этап.** Для создания обучающего множества используется информация о частотности появления символов (групп символов) из исходного алфавита. Если такие данные отсутствуют, то проводится анализ исходного текста и рассчитывается частота вхождения каждого символа в шифруемом сообщении  $\alpha(n_1...n_t)$ , где  $t$  — число различных символов в исходном тексте;  $n_i$  — число вхождения  $i$ -го символа в исходный текст.

Формирование областей (кластеров) пространства шифрования, в границах которых будут осуществляться искажения кодов символов, состоит из следующих шагов.

1. Автоматически генерируется число областей для каждого символа (класса) с учетом частотного анализа  $\alpha$ . В результате получается вектор числа областей  $\gamma(m_1...m_t)$ , где  $t$  — число различных символов (классов);  $m_i$  — число областей для  $i$ -го класса.

2. Случайным образом формируются области, соответствующие каждому символу в зависимости от векторов  $\gamma(m_1...m_t)$ . Число областей для каждого символа будет различным. Область задается в виде обучающей выборки — набора близко лежащих

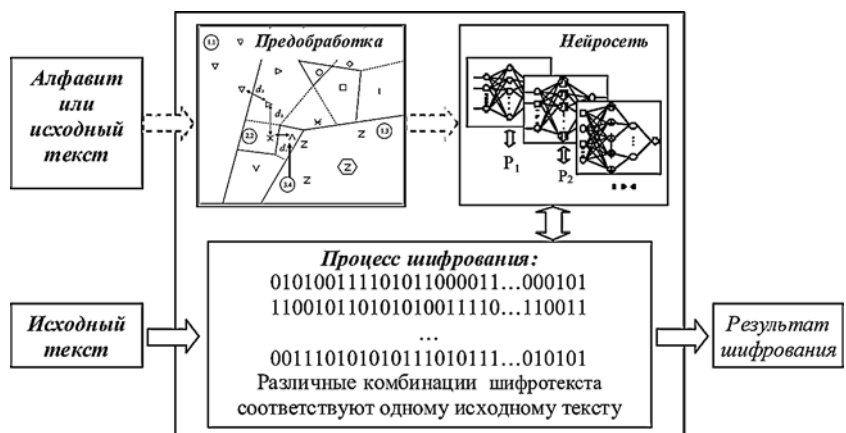


Рис. 1. Блок шифрования: преобработка, формирование нейросети, основной этап

векторов с указанием их класса. При этом вновь сгенерированные вектора сравниваются с уже полученными, что гарантирует принадлежность каждого вектора к единственному классу.

В качестве примера рассмотрим следующее шифруемое сообщение: *"jerome k. jerome. three men in a boat (to say nothing of the dog). there were four of us — george, and william samuel harris, and myself, and montmorency."* Несложно заметить, что частотность появления символов неравномерна. Так, пробел встречается 28 раз, "e" — 17 раз, а символы *k*, *b*, *c*, *(*, *)*, — всего по одному разу. Основные статистические показатели шифруемого текста приведены в таблице.

Статистика шифруемого текста

Общее число символов в сообщении $M$	154
Размер алфавита $A$	27
Среднее значение частоты появления символа $F_{average}$	0,037
Минимальное значение частоты появления символа $F_{min}$	0,0065
Максимальное значение частоты появления символа $F_{max}$	0,1818

На рис. 2 (см. третью сторону обложки) приведено сравнение частотности символов во входной последовательности и распределение точек в пространстве шифрования по соответствующим классам входной последовательности.

Из рисунка видно, что графики очень близки. Данная особенность гарантирует равномерное распределение символов входной последовательности по области шифрования, что делает затруднительным применение к алгоритму методов частотного криптоанализа.

**Построение нейронной сети.** После предобработки данных и формирования обучающего множества строится нейронная сеть. Прежде всего выбирается нейросетевая парадигма. Затем формируется структура сети, задаются значения весовых коэффициентов, проводится обучение.

Построение различных типов нейросетей имеет свои индивидуальные особенности, но преследует единую цель: научиться распознавать и классифицировать искаженный код из областей, сформированных на предварительном этапе. Фактически создается ключ шифрования, который в данном случае будет представлять собой информацию о выбранном типе нейросети и значениях ее структурных характеристик: число нейронов в каждом слое, весовые коэффициенты слоев  $W1$  и  $W2$ .

Процесс обучения определяется внутренним представлением данных выбранной сети [1]. Так, для многослойного персептрона характерно разбиение пространства входных данных посредством гиперплоскостей или поверхностей. Правила классификации входного значения содержатся в весовых коэффициентах, функциях активации и связях между нейронами, но обычно их структура слишком сложна. Таким образом, как правило, не представляется возможным отделить влияние определенного признака на целевое значение, потому что этот эффект может быть опосредован значениями других параметров. В связи с этим особенностью использования нейронных сетей данного типа применительно к задаче шифрования является необходимость отдельно хранить информацию об областях допустимых искажений кода. Также потребуются обучение сети решению задачи классификации, что для данного типа сети может занять довольно продолжительное время.

Нейросети, использующие радиальные базисные функции в нейронах промежуточного слоя, основаны на разбиении пространства окружностями или в общем случае гиперсферами (групповое представление) [1]. С точки зрения задачи аппроксимации скрытые элементы RBF-сети формируют совокупность функций (локальной поддержки), которые образуют базисную систему для представления входных примеров в построенном на ней пространстве. Вследствие чего такие сети, в отличие от многослойного персептрона, не умеют экстраполировать свои выводы за область известных данных. При удалении от обучающего множества значение функции отклика быстро спадает до нуля, таким образом RBF-нейроны действуют в достаточно малой области входного пространства, и чем шире пространство (число входов и расстояние между ними), тем больше требуется нейронов.

При построении RBF-сети для задачи шифрования в качестве центров скрытых радиально-базисных элементов могут быть выбраны центры областей допустимых искажений кода. В этом случае необходимо подобрать ширину функции активации. Другим вариантом может служить соотнесение некоторого множества RBF-нейронов каждому шифруемому символу, что позволяет задавать довольно сложные области искажений, в том числе несвязанные. Число элементов в каждом множестве необходимо задавать с учетом частотного анализа исходного алфавита и стремиться к равномерному распределению кодов символов в пространстве шифрования.

Поиск значений весовых коэффициентов линейного выходного слоя может как осуществляться с помощью алгоритмов обучения RBF-сети, так и задаваться пользователем. В частности, пользователь

может указать, какому символу (группе символов) исходного алфавита соответствует RBF-нейрон. Для этого значение весового коэффициента, связывающего скрытый радиально-базисный элемент с соответствующим нейроном выходного слоя, задается равным 1, а значения всех остальных весовых коэффициентов равными 0.

**Основной этап алгоритма шифрования.** Основной этап заключается в формировании шифротекста, который может быть распознан используемой нейронной сетью. На вход модуля шифрования подается исходное сообщение. Далее последовательно выполняется такой набор действий.

1. Из исходного текста выделяется очередной символ или группа символов используемого алфавита, т. е. определяется класс.

2. Для найденного класса случайным образом выбирается эталонный вектор, который характеризует определенный кластер (область), соответствующий данному классу. Для нейронных сетей, использующих RBF-нейроны, эталонный вектор может быть взят из матрицы  $W1$ , тогда как для персептрона необходимо отдельно хранить информацию об областях допустимых искажений кода.

3. Для данного кластера случайным образом выбирается вектор  $p = (x_1 \dots x_r)$  (где  $x_i$  — значение  $i$ -й координаты вектора, а  $r$  — размерность области определения), для которого результат работы сети  $net(p)$  соответствует исходному классу. Тем самым мы получаем случайный вектор, принадлежащий выбранному кластеру и классу.

4. Полученный шифр  $p = (x_1 \dots x_r)$  сохраняется, а алгоритм переходит к следующему символу. Диаграмма потоков данных модуля шифрования представлена на рис. 3.

Результатом работы будет набор векторов  $p_1(x_1 \dots x_r) \dots p_K(x_1 \dots x_r)$ , который соответствует полученному зашифрованному тексту, где  $K$  — число символов или групп символов в исходном сообщении. Полученная последовательность не является числовыми кодами символов, поэтому прочесть ее, не имея ключа, не представляется возможным. Данный алгоритм позволяет шифровать одни и те же символы или группы символов различными кодовыми последовательностями, причем находиться они могут в несвязанных областях.

## Алгоритм дешифрования

Алгоритм дешифрования заключается в распознавании полученного шифротекста. Ключ дешифрования является составным ключом, включающим топологию сети и ее основные характеристики, в частности матрицы весовых коэффициентов  $W1$  и  $W2$ . На вход алгоритма поступает зашифрованное сообщение, из которого выделяется очередной вектор пространства, в котором осуществлялось шифрование. Полученный вектор подается на вход сети, где происходит прямое прохождение сигнала и его классификация, т. е. определяется класс и выбирается соответствующий символ исходного алфавита.

Диаграмма потока данных модуля дешифрования представлена на рис. 4.

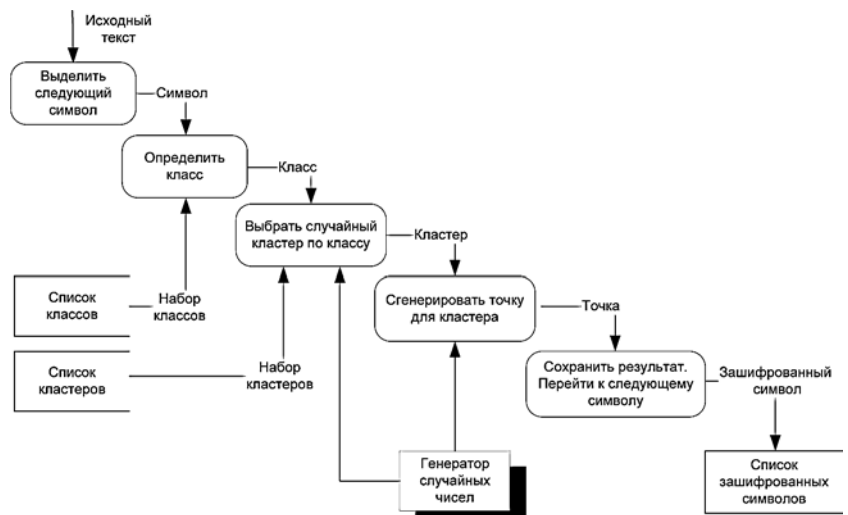


Рис. 3. Диаграмма потоков данных модуля шифрования

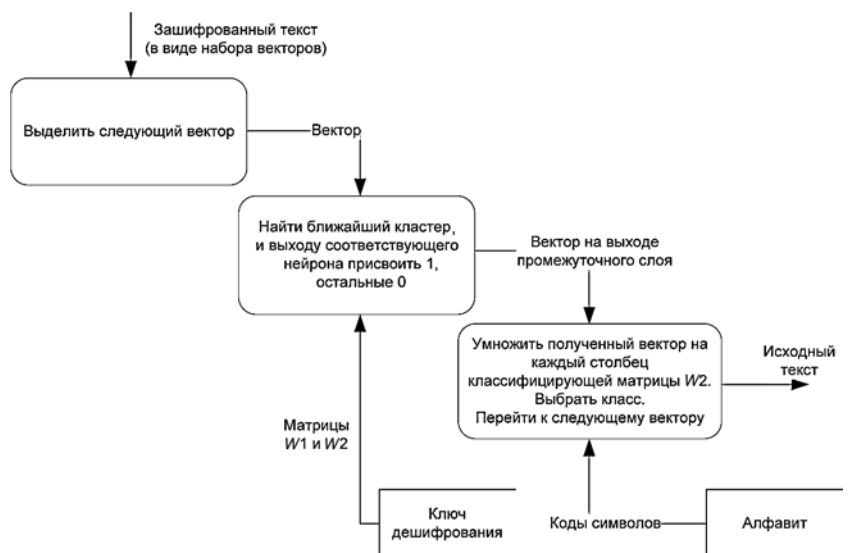


Рис. 4. Диаграмма потока данных модуля дешифрования

Полученный текст сохраняется, а алгоритм переходит к следующему элементу зашифрованного сообщения.

### Анализ алгоритма и ключей шифрования

Предложенный алгоритм шифрования с использованием нейронных сетей основывается на генерации случайных чисел. Ключом шифрования и дешифрования является сама нейросеть, а именно выбранная парадигма и ее структурные характеристики. Эти значения, с одной стороны, зависят от нейронной сети, а с другой стороны, определяются представлением кода — его длиной, числом одновременно кодируемых символов и т. п. При использовании для обучения истинно случайных чисел и достаточно большой области обучения (пространства, в котором осуществляется шифрование) вероятность получения одинаковых топологий сети крайне мала. Все полученные топологии являются равноправными, т. е. и ключи шифрования являются равноправными. Невозможно установить простые зависимости между ключами, используемыми в процессе шифрования.

При формировании обучающего множества сначала составляется вектор классов  $C = C_1 \dots C_c$ , где  $C_i$  —  $i$ -й класс, характеризующий символ или группу символов,  $c$  — общее число классов. Затем формируется вектор кластеров  $K = (x_1 \dots x_s)_1 \dots (x_1 \dots x_s)_k$ , где  $k$  — число кластеров,  $k \geq c$ ;  $(x_1 \dots x_s)_i$  — координаты  $i$ -го кластера;  $s$  — размерность пространства, в котором осуществляется шифрование. Матрица  $W1$  имеет размер  $s \times k$ . Для сетей, использующих RBF-нейроны, матрица состоит из элементов, характеризующих координаты кластеров. Для многослойного персептрона  $k$  характеризует не число кластеров, а число нейронов промежуточного слоя, достаточное для разделения кластеров. В свою очередь, матрица  $W2$  имеет размер  $k \times c$ . Так как для сохранения целостности задачи требуется передавать в качестве ключа шифрования всю топологию сети, то размер ключа вычисляется по формуле

$$N = s \cdot k \cdot b + k \cdot c \cdot b,$$

где  $b$  — число бит, необходимое для хранения значения весового коэффициента.

Из приведенной формулы видно, что размер ключа прямо пропорционален числу используемых кластеров и размерности пространства, в котором осуществляется шифрование. Данное обстоятельство может быть использовано пользователем для улучшения криптостойкости алгоритма, так как размер ключа связан с количеством вычислений, требуемых для подбора ключей, соотношением  $N_{\text{операций}} = 2^N$ .

Однако, используя особенности различных нейросетевых парадигм, в приведенную формулу могут

быть внесены некоторые изменения. Например, для сетей, использующих RBF-нейроны, в частности для сети LVQ, другим вариантом подсчета требуемого объема памяти для матрицы  $W2$  является указание класса для текущего кластера в виде пары [номер кластера, номер класса], так как все остальные веса равны 0, то их можно не учитывать. Тогда для второго слоя достаточно  $k$  пар или  $2 \cdot k \cdot b'$  бит, где  $b'$  бит необходимо для хранения номера нейрона. В этом случае  $N = s \cdot k \cdot b + 2 \cdot k \cdot b'$ .

Для сетей класса многослойный персептрон нет необходимости использовать в выходном слое число нейронов, равное числу классов, а можно воспользоваться кодированием номера класса с помощью бинарного вектора. В этом случае число нейронов в выходном слое будет равно значению  $c' = \log_2 c$ , округленному до большего целого. Кроме того, для данного типа нейросетей число нейронов промежуточного слоя  $k'$  не характеризует число кластеров, а должно быть достаточным для разделения имеющихся кластеров в пространстве шифрования. Для двумерной плоскости его можно оценить исходя из числа прямых, которое необходимо для разбиения плоскости на  $k$  областей.

Если рассматривать тестовое шифруемое сообщение из предварительного этапа, то размер алфавита и число классов  $c = 27$ . Число кластеров не может быть меньше 27, так как каждому классу должен соответствовать хотя бы один кластер. Размерность пространства шифрования равна 2. На рис. 5 (см. третью сторону обложки) представлены графики с оценочными значениями количества бит, необходимого для хранения значений весовых коэффициентов, для следующих вариантов нейросетей:

- НС1 — многослойный персептрон, у которого число нейронов выходного слоя равно  $c$ , число нейронов промежуточного слоя меняется от 7 до 10 в зависимости от числа кластеров, для хранения весового коэффициента используется 64 бита;
- НС2 — многослойный персептрон, аналогичный НС1, но у которого число нейронов выходного слоя закодировано с помощью бинарного вектора и равно 5;
- НС3 — нейросеть с RBF-нейронами промежуточного слоя, где для хранения весовых коэффициентов используется по 16 бит;
- НС4 — нейросеть, аналогичная НС3, но для хранения весовых коэффициентов промежуточного слоя (кластеров) используется 64 бита.

Размер ключа зависит от размерности пространства, в котором осуществляется шифрование, и от числа классов, характеризующих символ или группу символов. Однако необходимо учитывать тот факт, что с ростом размерности пространства  $s$  также увеличивается и длина получаемого шифротекста,

что нежелательно, поэтому данный параметр стоит использовать крайне осторожно. Увеличение длины получаемого шифротекста может быть компенсировано с помощью введения дополнительных классов, которые будут включать не единичные символы, а часто встречающиеся в тексте цепочки символов, но это потребует дополнительных вычислительных затрат на предварительном этапе в процессе построения сети.

### Заключение

В статье рассмотрены принципы применения нейронных сетей для криптографической защиты информации. В основу предлагаемого подхода положена способность ряда нейронных сетей к восстановлению искаженных сигналов и распознаванию объектов, имеющих характеристики, отличные от эталонных. Рассмотрены особенности применения многослойного перцептрона и сетей, использующих радиальные базисные функции в нейронах промежуточного слоя. Предложены алгоритмы шифрования, дешифрования и предобработки данных. Алгоритм шифрования основан на генерации различных вариантов искаженного кода, который может распознать или восстановить используемая сеть.

Ключ шифрования и дешифрования включает информацию о выбранном шаблоне нейросети и ее структурных характеристиках (число нейронов в слое, весовые коэффициенты, функции активации, пороговые значения и т. д.). Показана зависимость ключа от числа используемых кластеров и размерности пространства шифрования. Данный подход может быть использован для решения задач защиты информации, хранящейся на электронных носителях и передаваемой по различным каналам связи, как на персональном, так и на корпоративном уровне.

### Список литературы

1. **Ежов А., Шумский С.** Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе. М.: МИФИ, 1998. 224 с.
2. **Медведев В. С., Потемкин В. Г.** Нейронные сети. MATLAB 6. М.: Диалог МИФИ, 2002. 496 с.
3. **Алферов А. П., Zubov A. Ju., Кузьмин А. С., Черемушкин А. В.** Основы криптографии. М.: Гелиос АРВ, 2005. 480 с.
4. **Гридин В. Н., Солодовников В. И., Евдокимов И. А.** Применение нейросетевого подхода на основе LVQ-сети для шифрования текстовой информации // Системы высокой доступности. 2011. Т. 7, № 1. С. 65—68.
5. **Евдокимов И. А., Гридин В. Н., Солодовников В. И., Солодовников И. В.** Предобработка данных с учетом заданных значений отдельных признаков // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 1. С. 14—17.

**V. N. Griding**, Prof., Doctor of Science, Director, **V. I. Solodovnikov**, Ph. D., Senior Researcher,  
**I. A. Evdokimov**, Junior Researcher

Design information technologies Center Russian Academy of Sciences (DITC RAS)  
Russia, Moscow region, Odintsovo, st. Marshal Biryuzova 7a, tel.: (495) 596-02-19, e-mail: info@ditc.ras.ru

## Neural Network Algorithm for Symmetric Encryption

*Data is a valuable resource, with access which is necessary to be strictly monitored and regulated. Even the partial loss of such data can have dire consequences for the owner. One of the most popular approaches, used to prevent the possible threat of unauthorized access, is the cryptographic protection or encryption.*

*The article investigates the possibility of using neural network methods for the cryptographic protection of information. The proposed approach is based on the ability of some neural networks for restoration of distorted signals and recognition of objects having characteristics different from the references. The features of using multilayer perceptron and networks with RBF-neurons in the intermediate layer were considered. Algorithms of encryption, decoding and data preprocessing were proposed. The basic idea of the encryption algorithm is to generate a distorted code that can be recognized or restored by the network. The encryption and decoding key includes information about the selected neural network template and its structural characteristics (the number of neurons in layer, weights, activation functions, threshold values, etc.). The encryption key dependences on number of used clusters and the dimension of encryption space were considered.*

**Keywords:** neural network, perceptron, RBF neural network, LVQ neural network paradigm, cryptographic protection, encryption, decoding

### References

1. **Ezhov A., Shumskij S.** *Nejrokompjuting i ego primenenie v ekonomike i biznese.* М.: МИФИ, 1998. 224 p.
2. **Medvedev V. S., Potemkin V. G.** *Nejronnye seti. MATLAB 6.* М.: Dialog MIFI, 2002. 496 p.
3. **Alferov A. P., Zubov A. Ju., Kuzmin A. S., Cheremushkin A. V.** *Osnovy kriptografii.* М.: GeliOS ARV, 2005. 480 p.

4. **Gridin V. N., Solodovnikov V. I., Evdokimov I. A.** *Primenenie nejrosetevogo podhoda na osnove LVQ-seti dlja shifrovaniya tekstovoj informacii. Sistemy vysokoj dostupnosti.* 2011. V. 7, N. 1. P. 65—68.
5. **Evdokimov I. A., Gridin V. N., Solodovnikov V. I., Solodovnikov I. V.** *Predobrabotka dannyh s uchetom zadannyh znachenij ot del'nyh priznakov. Informatsionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy.* 2009. N. 1. P. 14—17.

Ю. Н. Кульчин<sup>1, 2</sup>, академик, д-р физ.-мат. наук, директор ИАПУ ДВО РАН, e-mail: kulchin@iacp.dvo.ru.

А. Ю. Ким<sup>1</sup>, млад. науч. сотр., e-mail: ayukim@mail.ru.

Б. С. Ноткин<sup>1, 2</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: boris\_notkin@mail.ru.

А. Б. Люхтер<sup>3</sup>, канд. техн. наук, советник при ректорате, e-mail: 3699137@gmail.com

<sup>1</sup> ФГБУН Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток,

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,

<sup>3</sup> Владимирский государственный университет, г. Владимир

## Обработка сигналов распределенной волоконно-оптической сети для распознавания динамических образов с применением нейронных сетей

*Рассматриваются способы, методы и алгоритмы обработки сигналов распределенной волоконно-оптической измерительной сети (РВОИС) и формирование с их помощью моделей образов в виде набора характерных признаков или главных компонент для совокупностей зарегистрированных состояний движущегося идентифицируемого объекта. Также предложено получение выборки примеров для обучения и тестирования нейронных сетей с помощью созданных программных модулей (генератора сенсорных данных и модуля преобразования данных). Анализ результатов исследований проведен в рамках разработки интеллектуальной распределенной информационно-измерительной системы (ИРИИС) на основе РВОИС для распознавания динамических образов.*

**Ключевые слова:** нейронные сети, интеллектуальные информационно-измерительные системы, экспертные системы, модели образов, распознавание динамических образов

### Введение

Бурное развитие современной техники в конце XX и начале XXI веков характеризуется разнообразием контролируемых процессов и измеряемых физических величин. При этом первостепенное значение приобретает мониторинг явлений, происходящих в условиях высоких скоростей их протекания, широком диапазоне изменения температуры и давления, а также других параметров окружающей среды. В связи с чем особое значение приобретает создание распределенных волоконно-оптических измерительных сетей (РВОИС) [1], способных не только обеспечить мониторинг состояния масштабных и многопараметрических систем и объектов в реальном времени, но и адаптироваться под конкретные воздействия окружающей среды. Именно эти два обстоятельства диктуют необходимость создания интеллектуальных распределенных информационно-измерительных систем (ИРИИС), в которых происходит сочетание достоинств РВОИС, способных со скоростью света собирать большие объемы данных, с достоинствами интеллектуальных экспертных систем [2], строящихся на нейросетевых принципах [3], способных обрабатывать эти большие массивы данных в реальном времени [4]. Поскольку скорость сбора РВОИС данных об объекте и время их обработки экспертной системой оказываются различными, возникает необходимость поиска способов, позволяющих уменьшить необ-

ходимый объем поступающей на вход системы обработки данных информации без искажения вычислительного результата, чтобы обеспечить реальное время их обработки. Поэтому целью данной работы стало выявление оптимальных и эффективных способов обработки больших массивов данных с использованием ИРИИС.

В основу подхода к уменьшению необходимого объема данных при мониторинге состояния объекта была положена процедура предварительного формирования модели образа (МО). Это позволяет сократить время обучения нейронных сетей и выполнить процесс распознавания (обработки) динамического образа объекта за один такт. С этой целью была разработана структурно-функциональная модель системы обработки данных ИРИИС (рис. 1), в которой процесс распознавания динамических образов объектов организован в виде последовательности взаимосвязанных функций: от сбора данных об объекте (блок I) до обработки (блок II).

Для извлечения значимой информации при формировании МО из полученных данных РВОИС и для проверки качества работы СОД ИРИИС были использованы многомерные статистические методы (метод главных компонент, снижение размерности признакового пространства, корреляционный анализ количественных переменных) в комплексе с многослойными нейронными сетями прямого распространения.



## Способы сжатия данных для формирования моделей образов

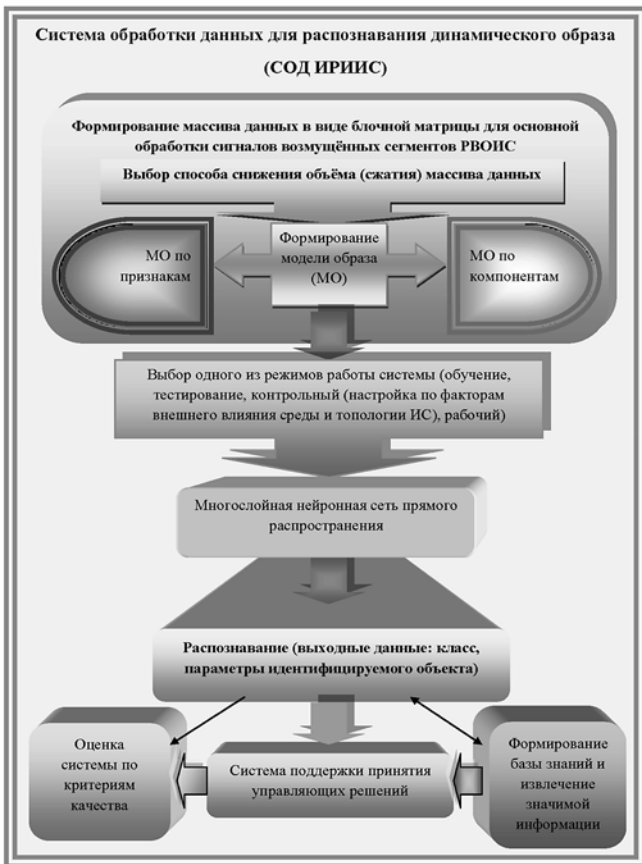


Рис. 1. Структурно-функциональная модель системы обработки данных ИРИИС для распознавания динамического образа

С помощью многослойных нейронных сетей прямого распространения происходит распознавание динамических образов с определением параметров движущихся идентифицируемых объектов после обучения на подготовленных выборках примеров массивов данных, полученных от РВОИС, которые прошли процедуру снижения объёма данных.

Одной из основных проблем, возникающих при функционировании ИРИИС на основе РВОИС, является возрастающий поток данных в течение времени опроса РВОИС и, в итоге, большие массивы данных, которые необходимо обрабатывать. Подбор преобразования для снижения объёма (сжатия) обрабатываемых массивов данных без существенной потери в них информативности позволяет ускорить процесс распознавания динамических образов.

Для создания алгоритмов сжатия данных РВОИС использовались два способа. Первый способ основан на методе главных компонент, а второй — на формировании набора характерных признаков объекта, регистрируемого по его воздействиям на РВОИС в процессе опроса системы. Так как метод главных компонент хорошо известен и описан в работах других авторов [5], то подробно остановимся на втором способе. При этом способе на основе полученных данных выделяют характерные признаки, по которым можно восстановить параметры самого регистрируемого объекта. Такой способ требует понимания как основных особенностей поведения (состояний) идентифицируемого объекта, так и знание того, какие параметры необходимо восстанавливать в процессе распознавания ИРИИС.

При проверке возможности применения способа сжатия данных путем выделения характерных признаков и последующего получения выборок примеров для различных видов движения идентифицируемых объектов использовали генератор сенсорных данных распределенной измерительной системы (РИС). Смоделированная сенсорная зона РИС в генераторе представлена в виде совокупности независимых измерительных линий (ИЛ), уложенных параллельно с заданным шагом (рис. 2). Такого

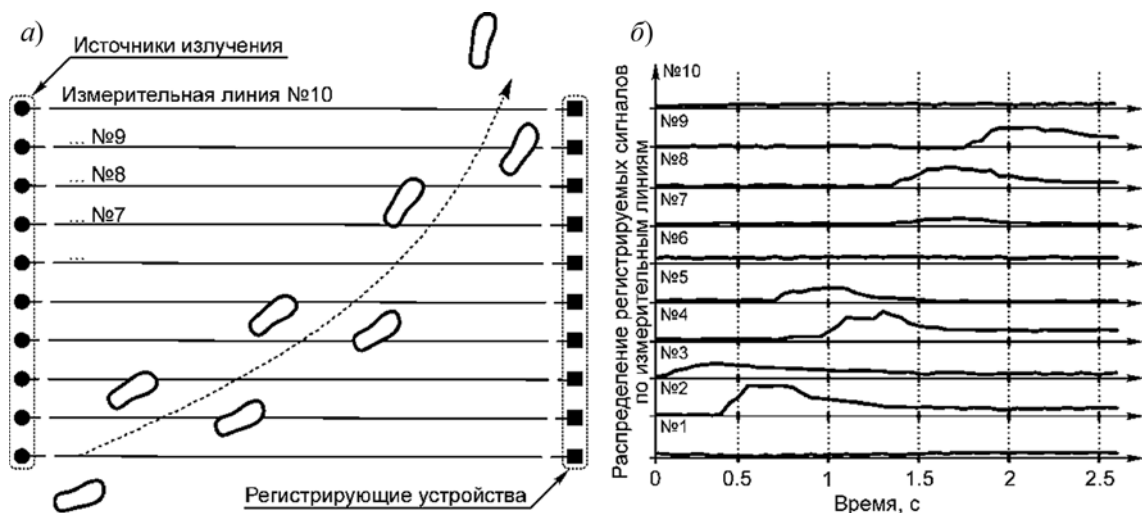


Рис. 2. Пример моделирования идущего в зоне мониторинга человека

Сведения об условных нарушителях периметра

Условное обозначение класса	Представители	Траектория движения	Диапазон масс, кг	Диапазон скоростей, м/с
"Человек"	Человек: идущий, бегущий, хромающий	Линейная, дугообразная	40...120	0,6...5
"Авто"	Автомобиль, трактор	Линейная	800...2000	2...15
"ВелоМото"	Велосипед, мотоцикл, мотоцикл с коляской	Линейная	50...250	2...10
"Фауна"	Собака, корова, заяц	Линейная, дугообразная, зигзагообразная	5...250	0,5...4

типа укладка ИЛ возможна при организации маскируемых волоконно-оптических охранных систем [6]. Поэтому в основу моделирования результатов функционирования измерительной системы были положены принципы, наиболее существенные при реализации такого рода систем охраны периметра. К ним относятся: давление на грунт в районе прокладки оптоволокну; фактор упругости грунта; особенности воздействия в зависимости от типа, скорости, траектории движущегося объекта. Конечный вид регистрируемого сигнала определяется с учетом существенного вклада случайного фактора, имитирующего широкий спектр неучтенных при моделировании и часто случайных явлений, неизбежно присутствующих в реальных условиях (степень однородности грунта, глубина прокладки оптоволокну, температурные флуктуации, вид обуви нарушителя, его походка и т. д.).

В последующих экспериментах по сгенерированным данным рассматривали 11 примеров условных нарушителей периметра, разбитых на четыре класса. Информация о них сведена в табл. 1. Масса, скорость и траектория нарушителя при моделировании каждого нового инцидента выбираются случайным образом. Пример моделирования идущего человека и регистрируемых при этом сигналов представлен на рис. 2. Измерительная часть системы, смоделированная в генераторе сенсорных данных РИС (рис. 2, а), состоит из измерительных линий ( $n = 10$ ); шаг укладки  $h = 20$  см. Частота регистрации данных  $a = 20$  Гц.

Рис. 2, б иллюстрирует пример получаемых данных, на основе которых система должна принять решение о классе нарушителя, его скорости, массе и направлении движения.

Для реализации способа, основанного на выделении характерных признаков, необходимо иметь, кроме непосредственно самих сгенерированных данных измерительной сети, результат предобработки в целях выявления фактов воздействия на измерительные линии, т. е. для каждой измерительной линии необходимо определить моменты времени, в которые на нее оказано воздействие. Эти моменты

определяются по факту положительного приращения амплитуды, превышающего исходно заданный порог. Важно знать, в какие моменты объект "наступал" на измерительные линии.

Измерительные линии, на которых регистрируется хотя бы одно внешнее воздействие, будем считать "активными". А измерительные линии, на которых за время инцидента не наблюдают внешних воздействий объекта, называют "пассивными". Время инцидента — это время регистрации одного примера или одного множества данных.

Таким образом, матрица признаков формируется по всем примерам инцидентов, полученным с помощью генератора сенсорных данных РИС, и передается на вход нейронной сети. Полный набор выделенных признаков для распознавания движущегося объекта по сгенерированным данным представлен в табл. 2.

Выбранные способы сжатия данных не только использовались при обработке по сгенерированным данным, но и прошли дальнейшую проверку на реальных данных, которые получены с помощью созданного макета РВОИС охраны периметра, разработанного по типу смоделированной сенсорной зоны генератора РИС (рис. 2), и предварительно

Таблица 2

Признаки для распознавания движущегося объекта по сгенерированным данным

Символы	Признаки
P1	Длительность инцидента
P2	Число активных измерительных линий
P3	Среднее арифметическое и среднее квадратичное отклонение количества воздействий на активные измерительные линии
P4	Среднее арифметическое и среднее квадратичное отклонение максимальных амплитуд для активных измерительных линий
P5	Среднее арифметическое и среднее квадратичное отклонение максимальных амплитуд для активных измерительных линий
P6	Периодичность внешних воздействий на измерительную систему
P7	Траектория движения нарушителя
P8	Средняя квадратичная ошибка аппроксимации траектории движения нарушителя
P9—P12	
P13	Средняя квадратичная ошибка аппроксимации траектории движения нарушителя

Таблица 3

**Признаки для распознавания движущегося объекта по реальным данным**

Символы	Признаки
P(1)	<i>Длительность</i> инцидента
P(2)	Число <i>активных</i> измерительных линий
P(3)	Суммарное <i>количество воздействий</i> по всем линиям за время мониторинга РВОИС
P(4)	Среднее квадратичное отклонение <i>числа воздействий</i> по линиям
P(5)	Среднее арифметическое значение <i>амплитуд воздействий</i> по всем линиям
P(6)	Среднее квадратичное значение <i>амплитуд воздействий</i> по всем линиям
P(7)	Средняя <i>периодичность</i> воздействий
P(8)	Среднее квадратичное отклонение <i>периодичности</i> воздействий
P(9)–P(12)	Коэффициенты полинома, описывающего <i>траекторию</i> движения объекта
P(13)	Средняя квадратичная ошибка аппроксимации <i>траектории</i> движения
P(14)	<i>Непрерывность</i> воздействия на ИЛ
P(15)	<i>Параллельность</i> воздействий на ИЛ
P(16)	<i>Одновременность</i> воздействий на РВОИС
P(17)	<i>Длина "пути"</i>
P(18)	<i>Направление</i>
P(19), P(20)	Взвешенные <i>"центры масс"</i> положения

обработаны с помощью специально разработанного программного модуля преобразования данных.

Предварительно полученные реальные данные в виде временных рядов с ИЛ макета РВОИС проходили два этапа предобработки. На первом этапе происходит фильтрация скользящим средним [7] с заданным периодом (или сглаживающим интервалом) и децимация исходных данных в модуле преобразования данных. На втором этапе по полученным двум скользящим средним с разными периодами  $n_1$  и  $n_2$ , а именно по расхождению значений полученных функций в определенные моменты времени, устанавливают непосредственно временные интервалы возникновения воздействий на каждой ИЛ по превышению разницы между возмущениями допустимого заданного шумового порога  $u_0$ . После двух этапов предобработки данных одним из двух

предложенных способов (методом главных компонент или выделением характерных признаков) формируют МО из главных компонент или признаков для последующего распознавания параметров идентифицируемого движущегося объекта. С помощью программного модуля преобразования данных, используя 200 примеров реально измеренных данных для различных вариантов поведения движущихся объектов двух типов (катящиеся и шагающие), дополнительно получили 10 000 альтернативных примеров, изменяя основные характеристики движущегося объекта (скорость, ускорение, массу и направление движения объекта), что обеспечило репрезентативность выборки примеров при обучении нейронной сети. При определении основных параметров идентифицируемого движущегося объекта по реальным данным используют выделенные признаки, представленные в табл. 3.

Сжатие массива данных приводит к формированию двух типов МО. Один тип получают нахождением главных компонент, а другой тип — выделением характерных признаков. Для реализации этих двух типов МО были созданы программы в среде MATLAB.

**Результаты численного моделирования и обработки данных с применением нейронных сетей**

Исследования по сгенерированным данным проводили в целях определения необходимого для выборки числа примеров измерений, получаемых от РВОИС, и допустимости сокращения размерности входного вектора нейронной сети при обработке, не вызывая при этом существенных потерь в качестве распознавания динамических образов ИРИИС. Результаты обработки многослойными нейронными сетями прямого распространения при тестировании на выборках примеров, которые не были использованы при обучении, представлены в табл. 4.

Здесь и далее во всех случаях для обучения нейронных сетей используется метод Левенберга—Марквардта (LMA) [8].

Таблица 4

**Результаты обработки многослойными нейронными сетями по сгенерированным данным**

Расознаваемые параметры объекта	Значимые признаки	Ошибка, % (при использовании значимых признаков для расширенной выборки объектов)			
		20 000 примеров	1000 примеров	500 примеров	200 примеров
Масса, кг	1, 3, 5, 6, 13	15,16	6,07	6,45	16,95
Скорость, м/с	1, 3, 5, 6	1,69	1,87	3,31	4,60
Класс и направление движения	3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12	6,03	2,93	4,40	5,15

Для оценки способности системы выполнять поставленную задачу распознавания движущихся объектов был выработан критерий пригодности, значение которого рассчитывали при определении типа объекта (то есть его класса и направления движения) подобно коэффициенту корреляции Пирсона по формуле [9]

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i \times y_i) - \left( \sum_{i=1}^n x_i \times \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \times \left[ n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}$$

$x_i$  — значения независимой переменной (фактический номер типа объекта);  $y_i$  — значение зависимой переменной (номер объекта, полученный после распознавания его класса и направления движения нейронной сетью по признакам);  $n$  — число примеров.

Критерий пригодности для ограниченной выборки (представленной двумя классами ("человек" и "авто") и двумя вариантами поведения объекта ("нарушитель" и "беглец")) составил около 0,8 (рис. 3). Для расширенной выборки (три класса

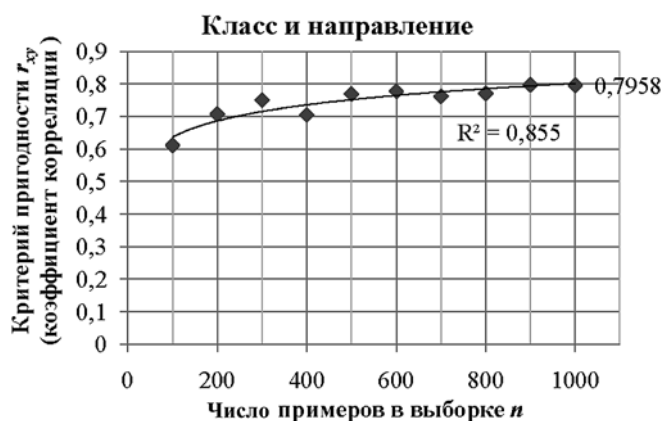


Рис. 3. Критерий пригодности системы для выполнения поставленной задачи для различного числа примеров ограниченной выборки

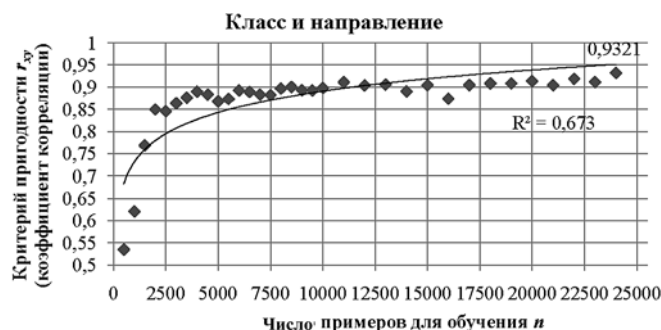


Рис. 4. Критерий пригодности системы для выполнения поставленной задачи для различного числа примеров расширенной выборки

("человек", "авто", "фауна") и три варианта поведения ("нарушитель", "беглец" и "гуляющий")) полученные результаты при оценке критериев качества работы системы имеют аналогичные тенденции к изменению и их значения достигают 0,9...0,95 с той лишь разницей, что для поддержания репрезентативности выборки число примеров существенно больше (рис. 4). Объекты сгруппированы под номерами по приоритету классов при распознавании. Ранжирование объектов по номерам помогает интерпретировать оценки критериев качества при анализе результатов распознавания.

Достоверность аппроксимации  $R^2$  (коэффициент детерминации) отображает степень соответствия ожидаемых значений для линий тренда фактическим данным. Значение достоверности аппроксимации рассчитывалось в MS Excel автоматически. В нашем случае значения достоверности аппроксимации для ограниченной и расширенной выборок составили 0,855 и 0,673 соответственно.

Для подтверждения предположения, что число задаваемых признаков может быть уменьшено без существенного понижения качества распознавания, были проведены численные эксперименты и выделены наиболее значимые признаки. Отбор значимых признаков осуществлялся методом направленного перебора (метод ветвей и границ) [10]. Этот метод позволяет отсеять неперспективные планы (наборы сочетаний признаков) и перейти от полного перебора планов к сокращенному перебору. Общая постановка такой задачи имеет следующий вид:

$f(X) \rightarrow \min, X \in P, P$  — множество всех признаков;  
 $f(X)$  — целевая функция, скалярная функция своих аргументов.

Приведем основные этапы алгоритма отбора значимых признаков.

1. Ранжирование признаков в порядке уменьшения ошибки распознавания системой параметров (масса, скорость) и типа (класс и направление) движущегося объекта, которая возникает в случае исключения одного признака из входного вектора нейронной сети.

Критерий пригодности системы, показанный на рис. 5, демонстрирует разную чувствительность системы на отсутствие отдельного признака при распознавании. Эксперименты проведены на расширенной выборке, состоящей из 20 000 примеров, используемых для обучения нейронных сетей, и 5000 примеров при тестировании. Вначале после ранжирования оставляем  $n$  признаков, при отсутствии которых ошибка определения параметров выше или равна той, что была получена при распознавании по всем признакам.



Рис. 5. Критерий пригодности системы при отсутствии одного из признаков

На каждом  $i$ -м ( $i = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ ) шаге число признаков в подмножестве уменьшается на один условно "слабый" признак и остается  $(n - i)$  признаков, из которых формируют подмножества  $P_i$ , где все признаки, кроме последнего, оставляют неизменными, а последний перебором меняют на ближайшие сокращенные признаки на  $(i - 1)$ -м шаге. В итоге оставляют тот набор признаков, при котором ошибка определяемого параметра движущегося объекта является наименьшей на  $i$ -м шаге. Если выбор наименьшей ошибки затруднен, так как ошибки оказываются примерно равными с точностью до 0,1 % для разных подборов последних признаков в наборе признаков, то считают, что это альтернативные наборы, и на следующем шаге учитывают последние признаки всех этих наборов при переборе. Затем вычисляется нижняя граница возрастания ошибки параметра на  $i$ -м шаге  $f(X_i)$  и сравнивается их сумма за  $i$  шагов с нижней границей целевой функции:

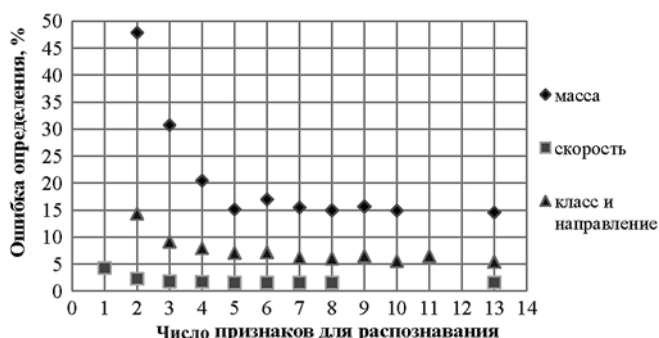
$$\sum_{k=0}^i f(X_k) \leq f(X).$$


Рис. 6. Ошибки определения параметров объекта в сравнении

2. При достижении целевой функцией заданного минимального значения для нижней границы фиксируется набор значимых признаков или альтернативные наборы.

3. Для полного анализа следующие шаги отбора признаков выполняют так же, как и раньше, но при этом находят превышение суммы для нижних границ возрастания ошибки определения параметра за  $i$  шагов над нижней границей целевой функции,

$$\text{т. е. } \sum_{k=0}^i f(X_k) - \min > 0.$$

Результаты использования данного алгоритма позволили установить, что для выполнения задачи достаточно использовать не весь набор выделенных признаков, а набор значимых признаков, которые указаны в табл. 4. Характер изменения ошибок определения параметров (массы, скорости, класса и направления) объекта и критерия пригодности от числа признаков можно видеть на рис. 6 и 7.

Результаты обработки многослойными нейронными сетями прямого распространения на выборках примеров, полученных по реальным данным, представлены в табл. 5.

По значениям ошибок определения параметров движущегося объекта в проведенных экспериментах подтверждается достаточная эффективность и приемлемая точность выполнения задачи распознавания динамических образов по МО в ИРИИС. В табл. 5 можно видеть, что класс и направление движения распознаются с ошибкой 0...0,01 %, т. е. практически безошибочно. При определении массы точность составила ~10 % по пяти признакам и ~12 % по девяти главным компонентам, а при нахождении длины пути она оказалась ~6,5 % по шести признакам и ~8 % по 19 главным компонентам. В табл. 5 полужирным шрифтом выделены наиболее удачные наборы признаков для определения массы и длины пути. Проведенные эксперименты показали преимущество способа, основанного на формировании МО по признакам, ввиду меньшего необхо-

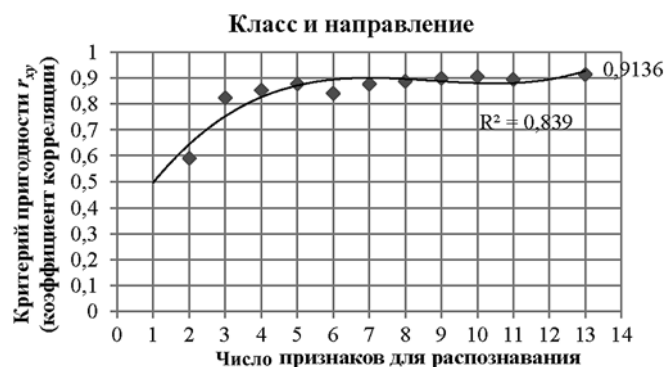


Рис. 7. Критерий пригодности системы при разном числе признаков

Результаты обработки многослойными нейронными сетями по реальным данным

Параметр движущегося объекта	Ошибка по обучающей выборке (10 000 примеров), %		Ошибка по тестовой выборке (200 примеров), %		Значимые признаки	Число главных компонент
	По признакам	По главным компонентам	По признакам	По главным компонентам		
Класс	0,04	0,01	0	0	7,14	2
Направление движения	0	0	0	0	19,20	4
Масса	11,7967 10,7624 9,9818 <b>10,2127</b> 10,1200	14,3098	12,9418 11,0035 10,3132 <b>9,7757</b> 10,6965	11,9496	5,14 3,5,15 3,5,6,15 <b>3,5,6,15,20</b> 1,5,6,11,14,15	9
Длина пути	8,4706 8,1897 7,4447 6,8433 <b>6,6221</b> 6,7787 6,7539	7,5857	8,1024 8,1161 7,7145 7,0570 <b>6,5462</b> 6,8614 6,9505	7,7334	3,15 3,5,15 3,6,15,19 3,5,6,15,19 <b>3,4,5,6,15,19</b> 3,5,6,8,10,15,20 3,5,6,8,10,12,15,20	19

димого числа признаков, чем числа главных компонент для достижения примерно одинаковых ошибок при распознавании.

### Заключение

Таким образом, в ходе проведения численных экспериментов проверена целесообразность и показана эффективность предлагаемых способов обработки данных как по сгенерированным данным, так и по реальным данным, полученным от макета РВОИС охраны периметра.

Выявлено, что для каждого определяемого параметра при распознавании существует оптимальное минимальное число признаков, при котором ошибка параметра отличается незначительно ( $\leq 1\%$ ) от ее значения, получаемого при использовании полного набора выделенных признаков. Также установлено, что критерий пригодности системы для выполнения поставленной задачи достигает 0,91 и зависит от числа признаков. Критерии пригодности между собой отличаются незначительно (в пределах  $\pm 0,02$ ) при использовании восьми признаков и более для идентификации движущегося объекта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по постановлению П218, договор № 02.G25.31.0116 от 14 августа 2014 года между Открытым акционерным обществом "Центр судоремонта "Дальзавод"*

*и Министерством образования и науки Российской Федерации.*

### Список литературы

1. **Кульчин Ю. Н.** Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. 272 с.
2. **Джексон П.** Введение в экспертные системы (Introduction to Expert Systems). 3-е изд. М.: Вильямс, 2001. 624 с.
3. **Оссовский С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
4. **Кульчин Ю. Н., Ким А. Ю.** Распознавание динамических образов распределенной информационно-измерительной системой сегментарного типа // Проблемы управления. 2006. № 5. С. 52–57.
5. **Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С, Мешалкин Л. Д.** Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
6. **Кульчин Ю. Н., Ноткин Б. С., Ким А. Ю.** Волоконно-оптическая система охраны периметра: исследование возможности применения нейронных сетей // Сб. науч. Тр. 11-й Всерос. науч.-техн. конф. "Нейроинформатика 2009". Т. 2. М.: Изд-во МИФИ, 2009. С. 259–266.
7. **Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А.** Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с.
8. **Marquardt D.** An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // SIAM Journal on Applied Mathematics. 1963. Vol. 11, N. 2. P. 431–441.
9. **Бендат Дж., Пирсол А.** Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
10. **Токарев В. Л., Набродова И. Н.** Построение модели по разнотипным данным для информационно-измерительных систем // Управление, вычислительная техника и информационные технологии. Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 1. С. 280–285.

**Yu. N. Kulchin**<sup>1, 2</sup>, Academician, Dr. Sc. (Phys.-Math),

"Director of the IACP FEB RAS, e-mail: kulchin@iacp.dvo.ru,

**A. Yu. Kim**<sup>1</sup>, Junior Researcher, e-mail: ayukim@mail.ru,

**B. S. Notkin**<sup>1, 2</sup>, Cand. of Eng. Sci., Senior Researcher, e-mail: boris\_notkin@mail.ru;

**A. B. Lyuhter**<sup>3</sup>, Cand. of Eng. Sci., Adviser to the Rector's of the VISU, e-mail: 369913\_7@gmail.com

<sup>1</sup> Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia

<sup>3</sup> Vladimir State University, 87 Gorky St., Vladimir 600000, Russia

## Signal Processing System of DFMN Segmental Type for Recognition of Dynamic Images Using Neural Networks

*Methods, techniques and algorithms for signal processing of distributed fiber-optic measuring network (DFMN) segmental type and the formation of their models using images as a set of characteristic features or principal component collections for the states of moving object are considered. We have invited to receive sample examples for training and testing of neural networks using generated software modules (sensory data generator and data conversion module). Analysis of the results of research carried out for the development of intelligent distributed information-measuring system based on DFMN segmental type for recognition of dynamic images. During the numerical experiments we checked and proved the expediency and effectiveness of the proposed methods, as on generated data so on real data obtained from the layout DFMN perimeter protection. Revealed, that for each defined parameter, there is an optimal minimum number of "features". The error of recognition is slightly different ( $\leq 1\%$ ) of its value, which is obtained using a complete set of extracted features. It is also found that the system suitability criteria for the task reaches 0,91, and depends on the number of features.*

**Keywords:** neural networks, intelligent information-measuring systems, expert systems, model images, recognition of dynamic images

### References

1. **Kulchin Yu. N.** *Distributed fiber-optic measuring system*. M.: Fizmatlit. 2001. 272 p.
2. **Jackson P.** *Introduction to Expert Systems*. 3<sup>rd</sup> ed. M.: Williams, 2001. 624 p.
3. **Ossowski S.** *Neural networks for information processing* / Translated from the Polish by I. D. Rudinsky. M.: Finance and Statistics. 2001. 344 p.
4. **Kulchin Yu. N., Kim A. Yu.** Recognition of Dynamic Images Distributed Information-Measuring System Segmental Type. *Control Problems*. 2006. N. 5. P. 52–57.
5. **Aivazyan S. A., Bukhshtaber V. M., Eniukov J. S., Meshal-kin L. D.** *Applied Statistics. Classification and reduction of dimension*. M.: Finance and Statistics. 1989. 607 p.
6. **Kulchin Yu. N., Notkin B. S., Kim A. Yu.** Fiber-optic perimeter security system: a study of the possibility of using neural networks. *Collection of scientific proceedings of the 11<sup>th</sup> All-Russia, n.-t. conf. "Neuroinformatics 2009"*. 2009. M.: MEPhI. Vol. 2. P. 259–266.
7. **Greshilov A. A., Stakun V. A., Stakun A. A.** *Mathematical methods of forecasting*. M.: Radio and communication, 1997. 112 p.
8. **Marquardt D.** An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1963. Vol. 11, N. 2. P. 431–441.
9. **Bendat J., Piersol A.** *Applications of correlation and spectral analysis*. M.: Mir, 1983. 312 p.
10. **Tokarev V. L., Nabrodova I. N.** Construction of model for polytypic data for information-measuring systems. *Management, Computer Science and Information Technology. Izvestiya TSU. Engineering*. Tula, 2013. Is. 1. P. 280–285.

---

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 09.02.2015. Подписано в печать 24.03.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ415. 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 "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ИННОВАЦИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ INOTEX 2015

С 8 по 11 июня 2015 г. в г. Тегеране (Иран) пройдет **4-я Международная выставка инноваций и технологий — INOTEX 2015.**

Выставка инноваций и технологий INOTEX 2015 проводится в четвертый раз и является логическим развитием проекта Технопарка "Пардис" по проведению Выставки передовых российских технологий Hi-Tech Russia, которая впервые была проведена в 2012 г. с участием 50 компаний, представлявших продукцию 80 российских предприятий.

В 2014 г. выставка прошла под новым названием INOTEX и собрала 60 участников, представлявших продукцию 88 компаний из 7 стран мира (России, Индии, Кореи, Турции, Китая, Германии и Великобритании), а также более 50 иранских компаний, представлявших продукцию 90 производителей из Ирана.

Выставку посетили более 6000 специалистов из 5 стран мира. Было подписано 17 соглашений о сотрудничестве.

Место проведения INOTEX 2015: Выставочный комплекс "Tehran International Fair Ground", Зал "Персидский залив".

Организатор Выставки: Технопарк Исламской Республики Иран "Пардис".

Соорганизатор с российской стороны: "НЕГУС ЭКСПО Интернэшнл".

### Основные направления Выставки:

- Информационно-коммуникационные технологии;
- Инновационные технологии и оборудование для нефтяной, газовой и нефтехимической промышленности;
- Высокотехнологичная медицина и биомедицинская инженерия;
- Промышленная автоматизация и интеллектуальные системы;
- Биотехнологии;
- Нанотехнологии;
- Возобновляемая энергетика;
- Авиационно-космические технологии;
- Медицинское и лабораторное оборудование (аксессуары);
- Инфраструктура;
- Геология и новые материалы;
- Оптика, фотоника и лазеры.

Решениями, принятыми на последнем заседании постоянной Российско-Иранской комиссии по торгово-экономическому сотрудничеству в Тегеране 8—10 сентября 2014 г., дан новый импульс в расширении межрегионального сотрудничества между провинциями Республики Иран и регионами Российской Федерации, создании благоприятных условий сотрудничества между компаниями среднего и малого бизнеса.