

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 25

2019

№ 10

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ  
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И  
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

Рисунки к статье А. В. Медведева, Д. И. Ярещенко  
«НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ Т-ПРОЦЕССОВ  
В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ»

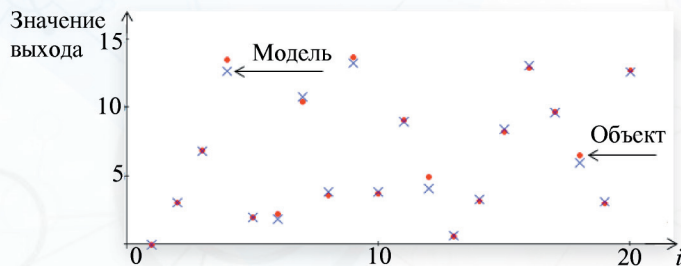


Рис. 2. Прогноз выходной переменной  $x_1$  при отсутствии помех,  $\delta_{x_1} = 0,07$

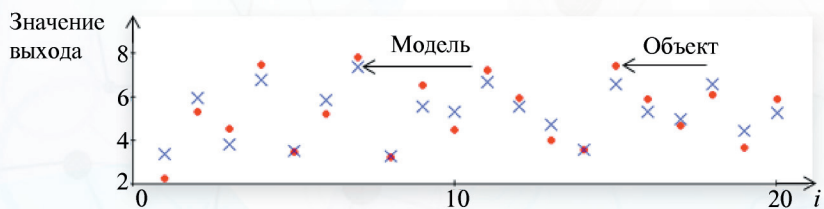


Рис. 3. Прогноз выходной переменной  $x_2$  при отсутствии помех,  $\delta_{x_2} = 0,30$

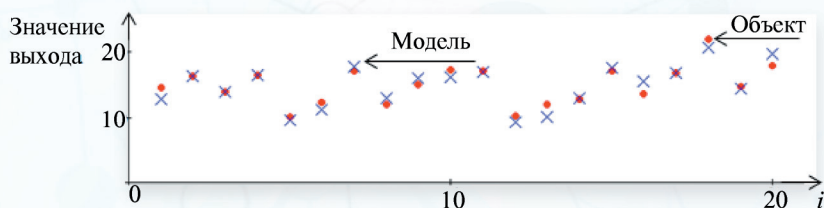


Рис. 4. Прогноз выходной переменной  $x_3$  при отсутствии помех,  $\delta_{x_3} = 0,17$

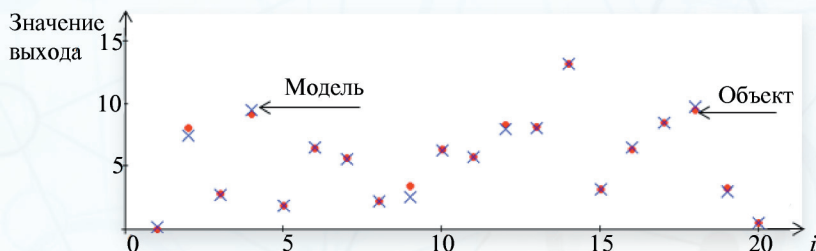


Рис. 5. Прогноз выходной переменной  $x_1$  с помехой 5%,  $\delta_{x_1} = 0,08$

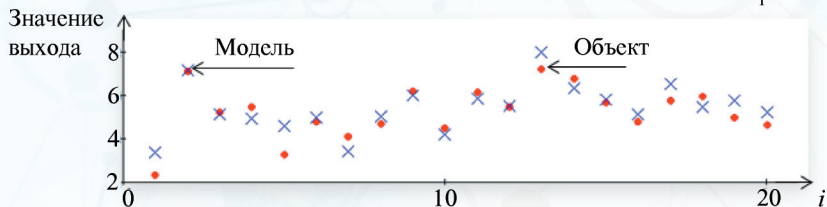


Рис. 6. Прогноз выходной переменной  $x_2$  с помехой 5%,  $\delta_{x_2} = 0,30$



Рис. 7. Прогноз выходной переменной  $x_3$  с помехой 5%,  $\delta_{x_3} = 0,19$

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 25  
2019  
№ 10

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

## СОДЕРЖАНИЕ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ

- Медведев А. В., Ярещенко Д. И. Непараметрическое моделирование Т-процессов в условиях неполной информации . . . . . 579
- Гурарий М. М. Эффективный алгоритм моделирования кольцевых генераторов методом гармонического баланса . . . . . 584
- Ульянов М. В., Фомичёв М. И. Сравнительный анализ комбинаций метода ветвей и границ с метаэвристическими алгоритмами для решения асимметричной задачи коммивояжера . . . . . 590

### ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Федорова Т. О., Соснина О. А. Оптимизация продолжительности визуализации сцен с Mental Ray . . . . . 596

### БАЗЫ ДАННЫХ

- Мезенцев Ю. А., Разумникова О. М., Тарасова И. В., Трубникова О. А. О некоторых задачах кластеризации больших данных по минимаксным и аддитивным критериям, применение в медицине и нейрофизиологии . . . . . 602

### БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ

- Салахутдинова К. И. Повышение точности идентификации программного обеспечения путем использования аддитивного критерия Фишберна . . . 609

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКОНОМИКЕ

- Авдошин С. М., Цветков Д. Д. Методика проведения ICO . . . . . 615
- Кравченко Т. К., Брускин С. Н., Гоменюк К. С., Огуречников Е. В. Разработка архитектуры требований при реализации ИТ-проекта по повышению эффективности управления складской деятельностью торговой компании сферы электронной коммерции . . . . . 629

#### Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,  
акад. РАН, д. т. н., проф.

#### Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.  
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

#### Редакционный совет:

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

#### Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.  
АНТОНОВ Б. И.  
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.  
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.  
ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.  
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.  
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.  
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.  
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.  
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.  
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.  
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.  
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.  
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.  
ЛЬВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.  
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.  
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.  
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.  
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.  
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.  
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.  
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.  
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)  
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.  
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

#### Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

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

# INFORMATION TECHNOLOGIES

# INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 25  
2019  
No. 10

**THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL**

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

## CONTENTS

### MODELING AND OPTIMIZATION

- Medvedev A. V., Yareshchenko D. I.** Nonparametric Modeling of T-Processes under Incomplete Information ..... 579
- Gourary M. M.** Effective Algorithm for Ring Oscillator Simulation Using the Harmonic Balance Method ..... 584
- Ulyanov M. V., Fomichev M. I.** Comparative Analysis of the Branch and Bound Method Combinations with Metaheuristic Algorithms for Solving the Asymmetric Traveling Salesman Problem ..... 590

### DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

- Fedorova T. O., Sosnina O. A.** Optimization Duration of Scenes Visualization with Mental Ray ..... 596

### DATABASE

- Mezentsev Yu. A., Razumnikova O. M., Tarasova I. V., Trubnikova O. A.** On some Problems of Big data Clustering by Minimax and Additive Criteria, Application in Medicine and Neurophysiology ..... 602

### INFORMATION SECURITY

- Salakhutdinova K. I.** The Improving of Program Identification Accuracy by Using the Additive Fisher Criterion ..... 609

### INFORMATION TECHNOLOGY IN THE ECONOMY

- Avdoshin S. M., Tsvetkov D. D.** Methodology for ICO Implementation ..... 615
- Kravchenko T. K., Bruskin S. N., Gomenyuk K. S., Ogurechnikov E. V.** Development of Architecture of Requirements in the Implementation of IT-Project to Improve the Efficiency of Warehouse Management of a Trading Company of Electronic Commerce Area ..... 629

#### Editor-in-Chief:

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

#### Deputy Editor-in-Chief:

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

#### Chairman:

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

#### Editorial Board Members:

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

#### Editors:

Bezmenova M. Yu.

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"

**А. В. Медведев**, д-р техн. наук, проф., e-mail: saor\_medvedev@sibsau.ru,  
Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева,  
**Д. И. Ярещенко**, старший преподаватель, e-mail: yareshenkodi@yandex.ru,  
Сибирский федеральный университет

## Непараметрическое моделирование T-процессов в условиях неполной информации

*Работа посвящена построению нового класса моделей в условиях неполной информации. Речь идет о многомерных безынерционных объектах для случая, когда компоненты вектора выходов стохастически зависимы, причем характер этой зависимости априори неизвестен. Построение модели многомерного безынерционного объекта в случае, когда векторы входов и выходов стохастически зависимы (в частности, мультиколлинеарны), приводит к необходимости решения системы неявных функций, что и является ключевым компонентом на пути рассмотрения данной задачи.*

**Ключевые слова:** идентификация, дискретно-непрерывные процессы, математическое моделирование, T-модели, T-процессы

### Введение

Идентификация многомерных стохастических процессов является довольно актуальной проблемой для многих технологических, производственных процессов дискретно-непрерывного характера. В многочисленных многомерных реальных процессах выходные переменные доступны измерению не только в различные моменты времени, но и через большие промежутки времени. Это приводит к необходимости рассмотрения динамических по своему характеру процессов как безынерционных с запаздыванием. Например, при измельчении каких-либо материалов (клинкер, уголь и др.) постоянная времени составляет 5...10 мин, а контроль выходной переменной, например тонкости измельчения, выполняется раз в два часа. В этом случае исследуемый процесс естественно представить как безынерционный с запаздыванием. Если выходные переменные объекта каким-то образом стохастически зависимы, а зависимость эта неизвестна, то подобные процессы мы и называем T-процессами. Подобные процессы требуют специального взгляда на проблему идентификации, несколько отличающегося от общепринятых. Главное здесь состоит в том,

что идентификация подобных объектов должна осуществляться не традиционным для существующей теории идентификации путем. Кратко этот путь будет намечен в настоящей статье. Обратим специальное внимание на то, что термин "процессы" ниже трактуется не как процессы вероятностной природы, о которых, например, говорится в работе [1] (такие как стационарные, гауссовские, марковские, мартингалы и др.), а процессы, реально протекающие в технических, технологических, производственных и других системах.

Последнее подчеркивает важность задачи идентификации для многих реально действующих процессов дискретно-непрерывного характера [2]. Особенностью таких процессов является то, что вектор выходных переменных  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ , состоящий из  $n$  компонент, таков, что компоненты этого вектора стохастически зависимы неизвестным заранее образом. Обозначим вектор входных компонент  $u(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t))$ . Такая постановка вопроса приводит к тому, что математическое описание объекта представляется в виде некоторой системы неявных функций вида  $F_j(u(t), x(t)) = 0, j = \overline{1, n}$ . Основная особенность настоящей задачи моделирования состоит в том, что класс зависимостей  $F(\cdot)$

неизвестен. Из-за недостатка априорной информации отсутствует параметрический класс вектор-функций  $F_j(u(t), x(t), \alpha)$ ,  $j = \overline{1, n}$ , где  $\alpha$  — вектор параметров, что не позволяет использовать методы параметрической идентификации [3, 4], поскольку класс функций с точностью до параметров не может быть заранее определен, и известные методы идентификации в данном случае не пригодны [3, 4]. В результате вышеизложенного задача идентификации сводится к задаче решения системы нелинейных уравнений

$$F_j(u(t), x(t)) = 0, j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

относительно компонент вектора  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$  при известных значениях  $u(t)$ . В этом случае целесообразно использовать методы непараметрической статистики [5, 6] или теорию непараметрических систем [7].

### 1. Т-процессы

В настоящее время повышается роль идентификации безынерционных систем с запаздыванием [8]. Еще раз заметим, что контроль некоторых, наиболее важных выходных переменных динамического объекта осуществляется через большие промежутки времени, значительно превосходящие постоянную времени объекта. В частности, для широко распространенных на практике процессов измельчения постоянная времени объекта составляет 4...5 мин, что соответствует примерно 20 мин окончанию переходного процесса, а контроль тонкости измельчения осуществляется раз в два часа, раз в смену и более. Собственно, это и приводит к необходимости рассматривать динамический объект как безынерционный с запаздыванием.

Особенностью моделирования многомерного объекта является тот факт, что исследуемый процесс описывается системой неявных стохастических уравнений:

$$F_j(u(t - \tau), x(t), \xi(t)) = 0, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $F_j(\cdot)$  — неизвестны;  $\xi(t)$  — случайное возмущение, действующее на объект;  $\tau$  — запаздывание по различным каналам многомерной системы. Поскольку по различным каналам вектор запаздывания  $\tau$  хотя и различен, но известен, в дальнейшем из-за соображений простоты  $\tau$  будет опущен.

В общем виде исследуемая многомерная система, реализующая Т-процесс, может быть представлена в виде, показанном на рис. 1. На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $u(t) = (u_1(t), \dots, u_m(t))$  —  $m$ -мерный вектор входных переменных;  $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))$  —  $n$ -мерный вектор выходных переменных. По различным каналам исследуемого процесса зависимость  $j$ -й компоненты вектора  $x$  может быть представлена в виде некоторой зависимости от тех или иных компонент вектора  $u$ :  $x^{<j>} = f_j(\bar{u}^{<j>})$ ,  $j = \overline{1, n}$ , где  $\bar{x}^{<j>}$ ,  $\bar{u}^{<j>}$  — составные векторы [4].

Каждый  $j$ -й канал зависит от нескольких компонент вектора  $u$ , например  $u^{<5>}(t) = (u_1(t), u_3(t), u_6(t))$ , где  $u^{<5>}$  означает составной вектор. При построении моделей реальных технологических и производственных процессов (комплексов) чаще всего векторы  $x$  и  $u$  используются в виде тех или иных составных векторов. Составной вектор — это вектор, составленный из некоторых компонент соответствующего вектора, в частности  $x^{<j>}(t) = (u_2(t), u_5(t), x_2(t), x_7(t), x_8(t))$ , либо другой набор. В этом случае система уравнений (2) примет вид

$$F_j(u^{<j>}(t), x^{<j>}(t)) = 0, j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где  $u^{<j>}(t)$ ,  $x^{<j>}(t)$  — составные векторы.

Заметим, однако, что вид уравнений  $F_j(\cdot)$ ,  $j = \overline{1, n}$ , продолжает оставаться неизвестным и не может интерпретироваться как модель исследуемого процесса. Наша же задача состоит именно в моделировании подобных процессов, т. е. Т-процессов.

### 2. Моделирование Т-процессов

Как было отмечено выше, процессы, выходные переменные которых имеют неизвестные стохастические связи, были названы Т-процессами, а их модели, соответственно, Т-моделями. Анализируя вышесказанное, можно увидеть, что описание процесса, показанного на рис. 1, может быть принято в виде (3). При этом особенностью моделирования подобного процесса в условиях непараметрической не-

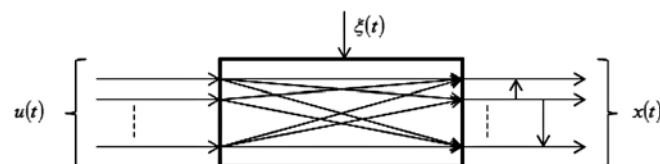


Рис. 1. Многомерный объект

определенности является тот факт, что вид функций (3)  $F_j(u^{<j>(t)}, x^{<j>(t)}) = 0, j = \overline{1, n}$ , неизвестен. Система моделей исследуемого процесса может быть представлена в следующем виде:

$$\widehat{F}_j(u^{<j>(t)}, x^{<j>(t)}, \tilde{x}_s, \tilde{u}_s) = 0, j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где  $\tilde{x}_s, \tilde{u}_s$  — временные векторы (набор данных, поступивший к  $s$ -му моменту времени), в частности  $\tilde{x}_s = (x_{11}, \dots, x_{1s}, \dots, x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2s}, \dots, x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{ns})$ , но и в этом случае  $\widehat{F}_j(\cdot), j = \overline{1, n}$ , продолжают оставаться неизвестными. В теории идентификации подобные задачи не только не рассматриваются, но и не ставятся. Обычно идут по пути выбора параметрической структуры (3), но, к сожалению, преодоление этого этапа затруднено из-за недостатка априорной информации. И требуется длительное время для определения параметрической структуры, т. е. представления модели в виде

$$F_j(u^{<j>(t)}, x^{<j>(t)}, \alpha) = 0, j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — вектор параметров. Далее следует процедура оценки параметров по элементам обучающей выборки  $u_i, x_i, i = \overline{1, s}$ , и последующего решения системы нелинейных взаимосвязанных соотношений (5). Успех построения модели в данном случае будет зависеть от качественной параметризации системы (3).

Рассмотрим задачу построения Т-моделей в условиях непараметрической неопределенности, т. е. в условиях, когда система (5) неизвестна с точностью до параметров и, таким образом, задача моделирования Т-процессов сводится к прогнозу значений выходных переменных  $x$  при известных входных  $u$ .

В дальнейшем будет широко использоваться непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям, которая имеет вид

$$x_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \prod_{k=1}^n \Phi\left(\frac{u_k - u_{ki}}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{k=1}^n \Phi\left(\frac{u_k - u_{ki}}{c_s}\right)}, \quad (6)$$

где выборка  $x_i, u_{ki}, i = \overline{1, s}, k = \overline{1, n}$ , содержит измерения входных  $u$  и выходных  $x$  переменных, а  $u_k, i = \overline{1, s}$ , — текущая переменная. Колоколообразные функции  $\Phi\left(\frac{u_k - u_{ki}}{c_s}\right)$  и параметр размытости  $c_s$  удовлетворяют следующим условиям [5]:

$$\Phi(\cdot) < \infty; \quad (7)$$

$$c_s^{-1} \int_{\Omega(u)} \Phi(c_s^{-1}(u_k - u_{ki})) du = 1; \quad (8)$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} c_s^{-1} \Phi(c_s^{-1}(u_k - u_{ki})) = \delta(u - u_i); \quad (9)$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} c_s = 0; \quad (10)$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s c_s^n = \infty. \quad (11)$$

Асимптотические свойства непараметрических оценок класса (6) достаточно подробно исследованы в работе [5]. В дальнейшем эти оценки будут использованы для моделирования Т-процессов и прогноза значений выходных переменных  $x$  при известных значениях входных переменных  $u$ . В последующих непараметрических алгоритмах индексы  $< >$  означают составные векторы,  $k$  и  $j$  — компоненты соответствующих векторов;  $n$  — размерность вектора  $u$ ;  $i$  — индекс наблюдений;  $s$  — объем выборки.

Итак, пусть на вход объекта поступают входные переменные, значения которых, конечно же, измерены. Имеем обучающую выборку  $x_i, u_i, i = \overline{1, s}$ . В этом случае оценка компонент вектора выходных переменных  $x$  при известных значениях  $u$ , как уже было отмечено выше, приводит к необходимости решать систему уравнений (4).

Задача сводится к тому, что при заданном значении вектора входных переменных  $u = u'$  необходимо решить систему (4) относительно вектора выходных переменных  $x$ . Общая схема решения такой системы сводится к следующему:

- сначала вычисляется невязка по формуле

$$\varepsilon_{ij} = \widehat{F}_j(u^{<j>(i)}, x^{<j>(i)}, \tilde{x}_s, \tilde{u}_s), j = \overline{1, n}, \quad (12)$$

где  $\widehat{F}_j(u^{<j>(i)}, x^{<j>(i)}, \tilde{x}_s, \tilde{u}_s)$  находится с использованием непараметрической оценки функции регрессии Надарая—Ватсона [5]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j(i) &= \varphi_{\varepsilon_j}(u^{<j>}, x_j(i)) = \\ &= x_j(i) - \frac{\sum_{i=1}^s x_j[i] \prod_{k=1}^{<n>} \Phi\left(\frac{u'_k - u_k[i]}{c_{su_k}}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{k=1}^{<n>} \Phi\left(\frac{u'_k - u_k[i]}{c_{su_k}}\right)}, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $j = \overline{1, n}$ ,  $< m >$  — размерность составного вектора  $u_k$ ,  $< m > \leq m$ , в дальнейшем это обозначение используется и для других переменных;

- следующий шаг состоит в оценивании условного математического ожидания:

$$x_j = M\{x_j | u^{<j>}, \varepsilon = 0\}, j = \overline{1, n}. \quad (14)$$

В качестве оценки (13) примем непараметрическую оценку регрессии [5]:

$$\hat{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^s x_j[i] \prod_{k_1=1}^{<n>} \Phi\left(\frac{u_{k_1} - u_{k_1}[i]}{c_{su}}\right) \prod_{k_2=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{\varepsilon_{k_2}[i]}{c_{se}}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{k_1=1}^{<n>} \Phi\left(\frac{u_{k_1} - u_{k_1}[i]}{c_{su}}\right) \prod_{k_2=1}^{<m>} \Phi\left(\frac{\varepsilon_{k_2}[i]}{c_{se}}\right)}, \quad (15)$$

$$j = \overline{1, n},$$

где колоколообразные функции  $\Phi(\cdot)$  примем в виде треугольного ядра:

$$\Phi\left(\frac{u_{k_1} - u_{k_1}[i]}{c_{su}}\right) = \begin{cases} 1 - \frac{|u_{k_1} - u_{k_1}[i]|}{c_{su}}, & \frac{|u_{k_1} - u_{k_1}[i]|}{c_{su}} < 1; \\ 0, & \frac{|u_{k_1} - u_{k_1}[i]|}{c_{su}} \geq 1, \end{cases}$$

а

$$\Phi\left(\frac{\varepsilon_{k_2}[i]}{c_{se}}\right) = \begin{cases} 1 - \frac{|\varepsilon_{k_2}[i]|}{c_{se}}, & \frac{|\varepsilon_{k_2}[i]|}{c_{se}} < 1; \\ 0, & \frac{|\varepsilon_{k_2}[i]|}{c_{se}} \geq 1. \end{cases}$$

Осуществляя эту процедуру, получаем значения выходных переменных  $x$  при входных воздействиях на объект  $u = u'$  (а в этом и состоит основное назначение искомой модели), которые в дальнейшем могут быть использованы в различных системах управления, в том числе организационных [9].

Точность моделирования оцениваем по следующей формуле:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^s |x_i - x_s(u_i)|}{\sum_{i=1}^s |x_i - \hat{x}|}, \quad (16)$$

где  $x_i$  — наблюдения на объекте;  $x_s(u_i)$  — прогноз выхода объекта;  $\hat{x}$  — среднее значение по каждой компоненте вектора  $x$ .

### 3. Вычислительный эксперимент

Для вычислительного эксперимента был взят объект с пятью входными переменными

$u(t) = (u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t), u_5(t))$ , принимающими случайные значения в интервале  $u(t) \in [0, 3]$ , и тремя выходными переменными  $x(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t))$ , принимающими значения в интервалах:  $x_1(t) \in [-2; 11]$ ,  $x_2(t) \in [-1; 8]$ ,  $x_3(t) \in [-1; 8]$ . Для данного объекта сформируем выборку входных и выходных переменных исходя из системы уравнений:

$$\begin{cases} x_1(t) - 2u_1(t) + 1,5\sqrt{u_2(t)} - u_5^2(t) - 0,3x_3(t) = 0; \\ x_2(t) - 1,5u_4(t) - 0,3\sqrt{u_5(t)} - 0,6 - 0,3x_1(t) = 0; \\ x_3(t) - 2u_2(t) + 0,9\sqrt{u_3(t)} - 4u_5(t) - 6,6 + \\ + 0,5x_1(t) - 0,6x_2(t) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Еще раз обратим внимание на то, что система уравнений (17) имитирует объект, который исследователю неизвестен. В результате получим выборку измерений  $\tilde{u}_s, \tilde{x}_s$ , где  $\tilde{u}_s, \tilde{x}_s$  — временные векторы. Процесс, описываемый системой (17), необходим только для получения обучающих выборок, другой информации об исследуемом процессе нет. Имея дело с реальным объектом, обучающую выборку можно формировать в результате измерений, осуществляющихся имеющимися средствами контроля. В случае стохастической зависимости между выходными переменными процесс естественно описать, например, следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \hat{F}_{x_1}(x_1(t), x_3(t), u_1(t), u_2(t), u_5(t)) = 0; \\ \hat{F}_{x_2}(x_1(t), x_2(t), u_4(t), u_5(t)) = 0; \\ \hat{F}_{x_3}(x_1(t), x_2(t), x_3(t), u_2(t), u_3(t), u_5(t)) = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Система уравнений (17) являет собой соотношения, которые, в отличие от системы (18), неизвестны из-за недостатка априорных данных.

После того как мы получили выборку наблюдений, можно приступить к исследуемой задаче — нахождению прогноза значений выходных переменных  $x$  при известных входных  $u$ . Для начала вычисляются невязки (13) по методике, описанной выше. Представим невязки в виде системы:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(i) = \hat{F}_1(x_1^i(t), x_3^i(t), u_1^i(t), u_2^i(t), u_5^i(t)); \\ \varepsilon_2(i) = \hat{F}_2(x_1^i(t), x_2^i(t), u_4^i(t), u_5^i(t)); \\ \varepsilon_3(i) = \hat{F}_3(x_1^i(t), x_2^i(t), x_3^i(t), u_2^i(t), u_3^i(t), u_5^i(t)). \end{cases} \quad (19)$$

где  $\varepsilon_j, j = \overline{1, 3}$ , — невязки, соответствующие компоненты вектора выхода которых не могут быть определены из соответствующих параметрических уравнений.



Прогноз выходных переменных  $x$  вычисляется в результате решения системы (18) согласно формулам (13)—(15) для каждой компоненты выхода объекта  $\hat{x}_1(t)$ ,  $\hat{x}_2(t)$  и  $\hat{x}_3(t)$ . Еще раз обратим внимание на то, что система (17) не была известной, и необходима лишь для формирования обучающей выборки.

Сначала приведем результаты вычислительного эксперимента без помех. В этом случае в алгоритмах (13) и (15) используются элементы обучающей выборки  $\tilde{y}_s, \tilde{x}_s$ , а для экзамена на вход объекта подаются значения входных переменных  $u_k$  из обучающей выборки. Можно было бы отдельно сгенерировать выборки  $u(t)$ ,  $x(t)$ , специально предназначенные для проведения экзамена, т. е. не входящие в обучающую выборку, которую в реальных задачах предварительно целесообразно нормировать и центрировать, чтобы в дальнейшем использовать скалярный параметр размытости, или провести экзамен в скользящем режиме. Настраиваемым параметром будет параметр размытости  $c_s$ , который в данном случае возьмем равным 0,4 (значение было определено в результате многочисленных экспериментов в целях уменьшения квадратичной ошибки между выходом модели и объекта), параметр размытости примем одинаковым при подсчете в формулах (13) и (15), объем выборки  $s = 500$ . Приведем графики для выходов объекта  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  и  $x_3(t)$  (рис. 2—4, см. вторую сторону обложки).

На рис. 2—4 "точкой" обозначены значения выхода переменных, а "крестиком" — значения выхода модели. На данных рисунках продемонстрировано сравнение истинных значений тестовой выборки компонент вектора выхода и их прогнозных значений, полученных с помощью алгоритма (13)—(15) (для удобства представления результатов на рисунках были приведены первые 20 прогнозов вектора  $x$  при заданных значениях соответствующих входных переменных).

Приведем результаты еще одного вычислительного эксперимента, при этом помеха  $\xi(t)$  накладывается на значения компонент вектора  $x$  выхода объекта. Условия эксперимента: объем выборки  $s = 500$ , помеха, действующая на компоненты вектора выхода объекта,  $\xi(t) = 5\%$ , параметр размытости  $c_s = 0,4$  (рис. 5—7, см. вторую сторону обложки).

На рис. 5—7 "точкой" обозначены значения выхода переменных, а "крестиком" значения выхода модели. Таким образом, проведенные вычислительные эксперименты подтвердили эффективность предложенных Т-моделей, ко-

торые представляют собой не общепринятые в теории идентификации моделей, а некоторую методику (цепочку алгоритмов) прогноза выходных переменных объекта при известных входных переменных  $u = u'$ .

## Заключение

В настоящей работе была рассмотрена задача идентификации безынерционных многомерных объектов с запаздыванием при неизвестных стохастических связях компонент вектора выхода. Здесь возникает ряд особенностей, которые состоят в том, что задача идентификации рассматривается в условиях непараметрической неопределенности и, как следствие, не может быть представлена с точностью до набора параметров. На основании имеющихся априорных гипотез записывается система уравнений, описывающих процесс с помощью составных векторов  $x$  и  $u$ , но функции  $F(\cdot)$  продолжают оставаться неизвестными. В статье рассмотрена методика расчета выходных переменных объекта при известных входных, что позволяет их использовать в компьютерных системах различного назначения.

Проведенные вычислительные эксперименты показали достаточно высокую эффективность Т-моделирования. При этом исследовали не только вопросы, связанные с введением помех разного уровня, различных объемов обучающих выборок, но и объектов различных размерностей.

## Список литературы

1. Дуб Дж. Л. Вероятностные процессы. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. 605 с.
2. Медведев А. В. Основы теории адаптивных систем. Красноярск: изд. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та. 2015. 526 с.
3. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / Пер. с англ. В. А. Лотоцкого, А. С. Манделя. М.: Мир, 1975. 7 с.
4. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 320 с.
5. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. Тбилиси: Изд-во Тбилисского ун-та, 1983. 194 с.
6. Васильев В. А., Добровидов А. В., Кошкин Г. М. Непараметрическое оценивание функционалов от распределений стационарных последовательностей. М.: Наука, 2004. 508 с.
7. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление 1 // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 4—9.
8. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск: Наука, 1983.
9. Медведев А. В., Ярещенко Д. И. О моделировании процесса приобретения знаний студентами в университете // Высшее образование сегодня. 2017. Вып. 1. С. 7—10.

**A. V. Medvedev**, Professor, e-mail: saor\_medvedev@sibsau.ru,  
Siberian State University of Science and Technology named after academician M. F. Reshetnev,  
**D. I. Yareshchenko**, Teacher Lecton, e-mail: yareshenkodi@yandex.ru,  
Siberian Federal University

## Nonparametric Modeling of T-Processes under Incomplete Information

*This work is devoted to building a new class of models in the context of incomplete information. We are talking about multidimensional inertialess objects for the case when the components of the output vector are stochastically dependent, and the nature of this dependence is a priori unknown. Building a model of a multidimensional inertia-free object in the case when the vectors of inputs and outputs are stochastically dependent (in particular, multicollinear), necessitates solving a system of implicit functions, which is a key component in the way of considering this problem.*

**Keywords:** identification, discrete-continuous processes, mathematical modeling, T-models, T-processes

DOI: 10.17587/it.25.579-584

### References

1. **Dub Dzh. L.** Probabilistic process, Moscow, Inostrannoj literary Publ., 1956, 605 p. (in Russian).
2. **Medvedev A. V.** Fundamentals of adaptive systems theory, Krasnoyarsk, Sibirskij gosudarstvennyj aehrokosmicheskij universitet, 2015, 526 p. (in Russian).
3. **Ehjkhoff P.** Basics of identification of control systems, Moscow, Mir Publ., 1975, 7 p. (in Russian).
4. **Cypkin Ya. Z.** Fundamentals of information theory of identification, Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p. (in Russian).
5. **Nadaraya Eh. A.** Nonparametric estimation of probability density and regression curve, Tbilisi, Tbilisskij universitet Publ., 1983, 194 p. (in Russian).
6. **Vasil'ev V. A., Dobrovidov A. V., Koshkin G. M.** Nonparametric estimation of functionals of stationary sequences distributions, Moscow, Nauka Publ., 2004, 508 p. (in Russian).
7. **Medvedev A. V.** The theory of non-parametric systems, Krasnoyarsk, *Vestnik SibGAU*, 2010, no. 4 (30), pp. 4–9 (in Russian).
8. **Medvedev A. V.** Nonparametric adaptation systems, Novosibirsk, Nauka Publ., 1983 (in Russian).
9. **Medvedev A. V., Yareshchenko D. I.** About modeling of process of acquisition of knowledge by students at University, Moscow, *Vysshee Obrazovanie Segodnya*, 2017, no. 1, pp. 7–10 (in Russian).

УДК 004.942 + 519.624.3 + 621.373.132

DOI: 10.17587/it.25.584-590

**М. М. Гурарий**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: gourary@yandex.ru,  
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

## Эффективный алгоритм моделирования кольцевых генераторов методом гармонического баланса

*Моделирование кольцевых генераторов (КГ) в частотной области встречает трудности, связанные с несходимостью процесса решения. Показано, что причиной несходимости является существование нескольких решений системы уравнений гармонического баланса для КГ. Предложено включение в процесс моделирования предварительного этапа, учитывающего только первую гармонику решения, что не только кардинально повысило надежность сходимости, но и обеспечило ускорение расчетов.*

**Ключевые слова:** автоматизация проектирования, схемотехническое моделирование, кольцевой генератор, гармонический баланс, продолжение по параметру, итерационные методы

### Введение

Автогенераторы являются важными компонентами, встречающимися практически в любой электронной системе для формирования

периодических сигналов. Разработка современных автогенераторов требует проведения анализа поведения нелинейной схемы в периодическом режиме, для чего может использоваться моделирование методом гармонического ба-

ланса (ГБ) [1]. Однако для автономных колебательных процессов прямое применение метода ГБ невозможно из-за неопределенности фазы колебаний и существования вырожденного решения. Для преодоления этих ограничений в работе [2] было предложено решать уравнения ГБ методом продолжения по параметру. Этот подход был усовершенствован в работах [3, 4], что позволило обеспечить сходимость процесса продолжения для подавляющего большинства генераторных схем.

Однако применение этих методов к моделированию кольцевых генераторов (КГ) показало [5] резкое усложнение процесса продолжения, приводящее к его прерыванию из-за несходимости шаговых уравнений. Поэтому в работе [5] было предложено заменить при моделировании полную схему КГ на эквивалентную однокаскадную схему с дополнительной задержкой. Но такая замена возможна только для КГ с идентичными ячейками, и, кроме того, она не обеспечивает получение решения для КГ с большим числом каскадов.

Целью данной статьи является исследование причин несходимости метода продолжения для КГ и разработка алгоритма, обеспечивающего эффективное моделирование как полной, так и однокаскадной схемы КГ.

## 1. Предварительные сведения

Метод ГБ для автономной схемы в периодическом режиме формирует и решает методом Ньютона систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов Фурье узловых напряжений схемы [1]:

$$H(X) = I(X) + j\omega KQ(X) + U = 0, \quad (1)$$

где представлены комплексные векторы узловых гармоник напряжений ( $X$ ), внешних воздействий ( $U$ ), токов ( $I(X)$ ), зарядов ( $Q(X)$ ) и системных невязок ( $H(X)$ ). Компоненты векторов определяются двумя индексами — номерами узла ( $k$ ) и гармоники ( $l$ ), например  $X_{kl}$ .  $K$  — это блочно-диагональная матрица индексов гармоник, а  $\omega$  — частота колебаний.

Для автогенератора отсутствуют внешние воздействия ( $U = 0$ ), частота является дополнительной неизвестной, а совместность системы уравнений обеспечивается добавлением к системе (1) уравнения фиксации фазы первой гармоники одной из переменных:

$$\text{Im}(X_{1,r}) = 0. \quad (2)$$

Стандартное задание начального значения для итераций Ньютона не позволяет найти решение системы (1), (2) из-за того, что существующая в схеме генератора неустойчивая рабочая точка становится точкой сходимости итераций. Для поиска подходящего начального значения в работе [2] был предложен вариант метода продолжения, основанный на подключении к схеме фиктивного источника сигнала — зонда, который является соединением источника напряжения и фильтра и образует идеальный генератор напряжения для первой гармоники и разрыв цепи для остальных гармоник. Задавая частоту генератора и меняя амплитуду зонда, можно определить начальные значения гармоник для итераций Ньютона по точке минимума зависимости тока зонда (отклика схемы) от его амплитуды. Такой метод не всегда приводит к получению решения из-за того, что локальный минимум кривой отклика либо не существует, либо он не принадлежит области сходимости итераций (рис. 1, *a*).

Для устранения этого недостатка в работах [3, 4] предлагается при выполнении процесса продолжения фиксировать не частоту зонда, а фазу отклика, принимая ее равной нулю (относительно сигнала зонда). Это эквивалентно фиксации мнимой части отклика схемы на уровне 0. Такой тип процесса продолжения назван "зонд с подстройкой частоты" (ПЧ-зонд), так как его применение эквивалентно использованию зонда с частотой, меняющейся в зависимости от амплитуды таким образом, чтобы обеспечивалась нулевая фаза отклика схемы. Математически это записывается как

$$\text{Re}(X_{1,r}) = V_{probe}; \quad \text{Re}(U_{1,r}) = I_{probe}. \quad (3)$$

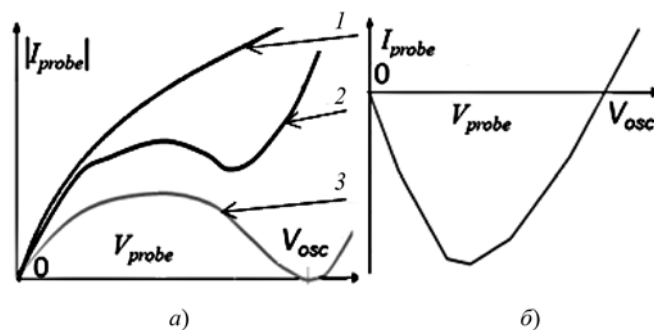


Рис. 1. Кривые отклика:

*a* — зонд с фиксированной частотой (1 — при равенстве частоты генерации частоте зонда, 2 — при отклонении частот, достаточно малом для существования локального минимума, 3 — при отклонении частот настолько значительном, что локальный минимум отсутствует); *b* — зонд с подстройкой частоты, решение системы соответствует точке  $V_{osc}$

Система (1)–(3) в каждой точке продолжения по амплитуде зонда ( $V_{probe}$ ) определяет текущее состояние автогенератора ( $X$ ), его частоту ( $\omega$ ) и отклик ( $I_{probe}$ ). Процесс продолжения завершается при  $I_{probe} = 0$  (рис. 1, б), а начальное значение частоты определяется малосигнальными условиями генерации колебаний в неустойчивой рабочей точке по действительной части входного импеданса при нулевой мнимой части:

$$\text{Im}(Z(\omega_0)) = 0; \text{Re}(Z(\omega_0)) < 0. \quad (4)$$

## 2. Проблемы моделирования КГ методом продолжения

Анализ публикаций и вычислительные эксперименты показали наличие трудностей при моделировании КГ. Кривые продолжения имеют простой вид (рис. 1, б) для 3- и 5-каскадных КГ. Но начиная с 7-каскадного КГ наблюдается очень сложный процесс продолжения (рис. 2, а) без сходимости после нескольких тысяч шагов. Анализ входного импеданса в рабочей точке показал, что существует дополнительное значение частоты, удовлетворяющее условию (4). Моделирование с этой начальной частотой успешно выполняется, обеспечивая простую кривую продолжения (рис. 2, б). Однако найденное решение как по форме, так и по частоте (синусоида 2,33 ГГц) существенно отличается от основного колебания (импульсы 570,4 МГц). Таким образом, моделирование определяет другое решение для схемы КГ. Отметим, что нет дополнительных решений для 3- и 5-каскадных КГ.

Для решения проблемы сходимости в работе [5] предложен подход к моделированию КГ с  $n$  идентичными каскадами (рис. 3, а) с помощью эквивалентной однокаскадной схемы (рис. 3, б), где задержка одного каскада определена фазой

$$\theta = \pi(n + 1)/n. \quad (5)$$

Для однокаскадной схемы соотношение  $k$ -й входной и  $k$ -й выходной гармоник сигналов инвертора в системе (1) задается в виде уравнений

$$X_{k,inp} = X_{k,inp} \exp(jk\theta). \quad (6)$$

В рамках подхода вместо решения системы (1) для полной схемы

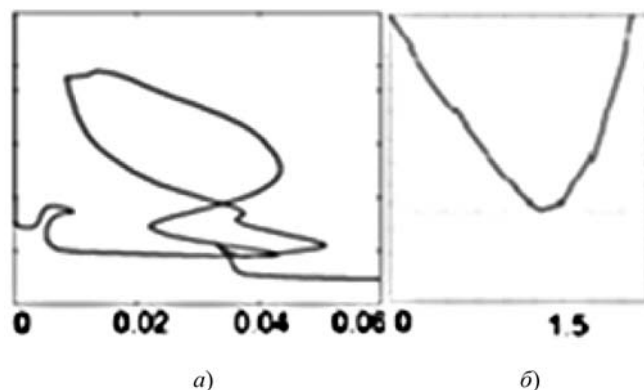


Рис. 2. Отклик схемы 7-каскадного КГ в алгоритме с подстройкой частоты:

а — основное решение (сложная траектория, нет сходимости); б — второе решение (нормальная сходимость)

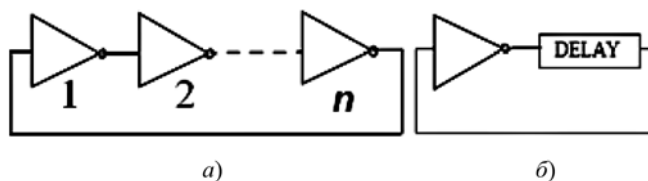


Рис. 3. Полная схема  $n$ -каскадного КГ (а); эквивалентная однокаскадная схема с задержкой (б)

КГ предлагается решить систему только для одной ячейки совместно с условиями (6), которые соответствуют основному ( $m = 1$ ) решению КГ. Дополнительные решения с  $m > 1$  в общем случае не существуют в системе уравнений ГБ на основе (5), (6).

Вычислительные эксперименты показали существенное улучшение надежности моделирования при использовании однокаскадной схемы с помощью алгоритма продолжения. Траектории продолжения 5-, 7-каскадных КГ имеют простые формы (аналогично рис. 1, б), и для получения решения требуется небольшое число шагов. Но для числа каскадов  $n > 7$

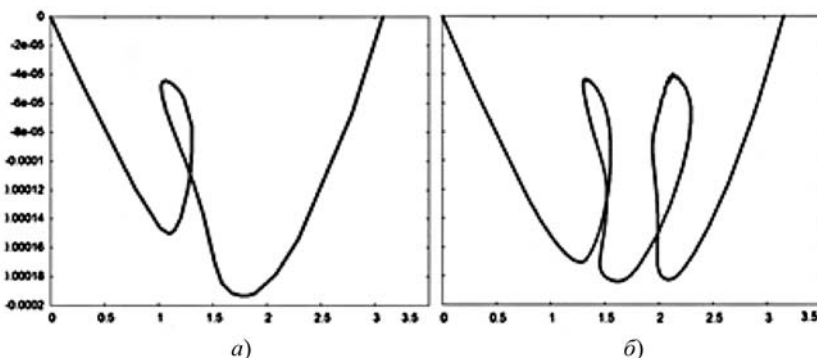


Рис. 4. Вид откликов однокаскадной модели для схем КГ размером: а — 9...15 каскадов; б — 17 каскадов

траектории содержат одну ( $n = 9...15$ ) или две ( $n = 17$ ) петли (рис. 4). В результате число шагов и затраты времени существенно увеличиваются.

### 3. Анализ причин возникновения проблем моделирования КГ

Рассмотрим причины существования нескольких решений уравнений КГ, для чего проанализируем КГ, содержащий одинаковые инверторы с постоянной задержкой  $\tau$ . Условие автоколебаний требует, чтобы сигнал на выходе цепочки из  $n$  инверторов был задержан относительно входного сигнала на любое целое число периодов  $k$ :

$$n\tau = T/2 + kT, \quad (7)$$

где член  $T/2$  соответствует прохождению входного сигнала через нечетное число инверторов. Из выражения (7) следует, что если задержка не зависит от частоты, то  $n$ -каскадный КГ имеет бесконечный ( $k = 1, 2, \dots$ ) набор периодических колебаний с частотами

$$f_m^{(n)} = m/2n\tau = mf_1^{(n)}, \quad (8)$$

где  $m = 2k + 1$ .

Соотношение (8) справедливо для идеального КГ, а в реальных КГ задержка зависит от частоты, и число возможных периодических колебаний не может быть бесконечным, так как на высокой частоте усилительные свойства инвертора снижаются, и условия самовозбуждения не выполняются. Нечетное число  $m$  будем называть индексом решения. Отметим, что в работе [6] показано, что решения с индексом  $m > 1$  неустойчивы.

Метод ГБ для генераторов сводится к решению алгебраической системы (1), (2) относительно вектора, содержащего частоту колебаний и гармоники переменных схемы  $W = [\omega, X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(i)}, \dots]$ , где  $X^{(i)}$  — вектор из  $i$ -х гармоник всех переменных схемы. Отметим, что периодическое состояние системы, определенное вектором  $W$ , также может быть определено векторами, соответствующими кратным периодам  $W$ , т. е.

$$\begin{aligned} W' &= [\omega/2, 0, X^{(1)}, 0, X^{(2)}, \dots, 0, X^{(i)}, \dots]; \\ W'' &= [\omega/3, 0, 0, X^{(1)}, 0, 0, X^{(2)}, \dots, 0, 0, X^{(i)}, \dots]. \end{aligned} \quad (9)$$

Вектор  $W$  назовем базовым вектором решения, а векторы вида (9) — его образами. Гармо-

ники образа решения, представляющие гармоники базового вектора ( $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(i)}, \dots$ ), назовем существенными гармониками, а все остальные (с нулевыми значениями) — фиктивными гармониками. Из соотношений (9) видно, что номера существенных гармоник  $l$ -го образа кратны  $l$ .

Таким образом, для каждого периодического состояния генератора существует бесконечное множество решений автономной системы ГБ. Конечно, это утверждение строго справедливо, если в системе (1) учитывается неограниченное множество гармоник сигналов. Усеченный по числу гармоник образ точного решения не является точным решением усеченной системы ГБ из-за пренебрежения некоторыми существенными гармониками. Можно предположить, что в любом случае образы образуют локальный минимум нормы невязки в пространстве переменных системы ГБ и, следовательно, создают дополнительные точки притяжения для траекторий продолжения. Также естественно предположить, что влияние образа зависит от отклонения его частоты от частоты искомого решения.

Поэтому можно предложить следующее объяснение причин несходимости метода продолжения для КГ. В случае единственности базового решения его собственные образы не влияют на сходимость метода, потому что их частоты существенно меньше базовой частоты. Однако, если существуют дополнительные решения (как в случае 7-каскадного КГ), то один из их образов может усложнить процесс продолжения, если его частота близка к частоте искомого решения. Это предположение применимо к полной схеме КГ (1), (2), но оно не объясняет усложнение траекторий (рис. 4) для однокаскадной схемы (5), (6). Объяснение может быть дано на основе следующего утверждения.

**Теорема.** Если полная схема КГ имеет дополнительное решение с индексом  $m$ , и соотношение частот решений равно соотношению для идеального КГ (8), то это решение существует также и в однокаскадной модели (5), (6).

*Доказательство* теоремы приведем в виде последовательности утверждений.

1. Решение для КГ с  $m > 1$  можно найти с помощью однокаскадной модели (6), заменив (5) более общим выражением, полученным из (7):

$$\theta_m = \pi(n + m)/n, \quad (10)$$

и подставив в выражение (6) значение  $\theta = \theta_m$ . Отметим, что (9) справедливо и для основного решения ( $m = 1$ ).

2. Из условия теоремы следует, что частоты гармоник дополнительного решения с номерами  $k$  равны частотам гармоник основного решения с номерами  $km$ . Подставив эти номера в показатель экспоненты в выражении (6), получим после элементарных преобразований с учетом (10)

$$km\theta = k\theta_m + 2\pi k(m-1)/2. \quad (11)$$

3. Вторым член в выражении (10) кратен  $2\pi$  в силу нечетности  $m$ , поэтому его можно отбросить в мнимом показателе экспоненты в (6). При  $\theta = \theta_m$  дополнительное решение удовлетворяет условиям (6), из соотношения (11) следует, что оно удовлетворяет условиям (6) и при  $\theta = \theta_1$ , т. е. и для однокаскадной модели основного уравнения. Теорема доказана.

Наличие в однокаскадной модели дополнительного решения с частотой  $mf_1$  приводит к тому, что частота  $m$ -го образа этого решения ( $f_1$ ) совпадает с частотой основного решения, вызывая трудности в процессе продолжения.

#### 4. Тестирование гипотезы на основе вычислительных экспериментов

Для проверки выдвинутых предположений было проведено моделирование КГ с 3...17 каскадами методом продолжения на основе систем ГБ полной схемы и однокаскадной модели как для основных, так и для дополнительных решений. Полученные значения частот основного и дополнительных решений, а также их соотношения представлены в таблице.

Из таблицы видно, что КГ с тремя и пятью каскадами не имеют дополнительных решений, что объясняет отсутствие проблем при моделировании. Представленные выше соображения позволяют объяснить поведение процесса продолжения для 7-каскадного КГ. Частота основного решения 570 МГц близка к четвертому образу второго решения с частотой  $2,33 \text{ ГГц}/4 = 582,5 \text{ МГц}$ , что приводит к неслитности (см. рис. 1, а). В то же время частота второго решения с индексом 3 намного выше, чем частота любого образа первого решения ( $2,33 \gg 0,58/k$ ), поэтому никаких проблем при моделировании не возникает (см. рис. 1, б).

В идеальном КГ частота любого дополнительного решения (6) всегда кратна основной частоте и, тем самым, равна частоте образа основного решения. Учитывая, что реальный КГ приближается к идеальному с увеличением

Частоты (ГГц) основного и дополнительных решений КГ

Число каскадов КГ	Основное решение	Частоты дополнительных решений и их соотношения с частотой основного решения						
		$f_1$	$f_3$	$f_3/f_1$	$f_5$	$f_5/f_1$	$f_7$	$f_7/f_1$
3	1,47							
5	0,80							
7	0,57	2,33	4,09					
9	0,44	1,47	3,32					
11	0,36	1,13	3,13	2,92	8,06			
13	0,30	0,94	3,05	1,86	6,07			
15	0,26	0,80	3,02	1,47	5,54			
17	0,23	0,71	3,01	1,24	5,30	2,13	9,06	

числа каскадов (см. таблицу), можно было ожидать плохой сходимости для основного решения КГ с большим числом ступеней. Это подтвердилось неслитностью процессов продолжения при моделировании полных моделей КГ с 9...17 каскадами. Отметим, что для 17-каскадного КГ соотношение частот, близкое к целочисленному, имеется для  $m = 3$  и  $m = 7$ .

Приближение к идеальному КГ при 9...17 каскадах объясняет и сложности в процессе продолжения на рис. 4, так как из таблицы видно, что при  $n > 7$  условия Теоремы близки к выполнению.

В отличие от этих случаев близость соотношения частот к целочисленному значению для 7-каскадного КГ ( $f_3^{(7)} \approx 4f_1^{(7)}$ ) вызывает проблемы лишь при моделировании полной схемы (см. рис. 2, а), но никак не сказывается на однокаскадной модели в силу удаленности соотношения частот от условия Теоремы ( $f_3^{(7)} = 3f_1^{(7)}$ ).

#### 5. Модификация метода продолжения

Из представленного анализа можно заключить, что для улучшения сходимости метода продолжения для КГ необходимо снизить влияние образов дополнительных решений на процесс моделирования. Ранее отмечалось, что усеченный набор гармоник образа решения не является решением усеченной системы ГБ, но определяет локальный минимум нормы невязки, усложняя процесс продолжения. Можно ожидать, что этот эффект уменьшится со снижением числа учитываемых гармоник, особенно при числе гармоник меньшем, чем индекс влияющего образа. Например, если в решении учитываются только три гармоники, то его образы

(9) представляются как  $W = [\omega, X^{(1)}, X^{(2)}, X^{(3)}]$ ,  $W' = [\omega/2, 0, X^{(1)}, 0]$ ,  $W'' = [\omega/3, 0, 0, X^{(1)}]$ , а в случае только одной гармоники —  $W = [\omega, X^{(1)}]$ ,  $W' = [\omega/2, 0]$ ,  $W'' = [\omega/3, 0]$ .

В последнем случае усеченные векторы решений вообще не содержат эффективных гармоник и не должны влиять на процесс моделирования. Это предположение подтверждается вычислительными экспериментами с малым числом гармоник, которые показывают, что при моделировании даже с одной гармоникой найденная частота колебаний близка к ее истинному значению.

Полученные результаты позволили предложить следующую модификацию алгоритма продолжения для КГ.

1. Выполнение процесса продолжения с одной гармоникой.

2. Задание исходного приближения для итераций Ньютона в виде полученного усеченного решения, дополненного нулями до требуемого числа гармоник.

3. Выполнение итераций Ньютона для автономной системы ГБ с необходимым числом гармоник.

Модификация алгоритма позволила проводить моделирование кольцевых генераторов до 17 каскадов без заметных осложнений. При этом также было получено существенное сокращение вычислительных затрат. Таким образом, предложенная модификация алгоритма продолжения с подстройкой частоты обеспечивает эффективное моделирование КГ с умеренным числом каскадов.

## Заключение

В статье представлен анализ проблем сходимости, возникающих при моделировании КГ методом ГБ. Теоретические исследования и численные эксперименты подтвердили, что трудности сходимости можно объяснить существованием дополнительных фиктивных периодических решений в КГ. Показано, что эффект влияния фиктивных решений проявляется как в полных схемах КГ, так и в их однокаскадных моделях. Проведенный анализ позволил предложить модификацию алгоритма продолжения с подстройкой частоты, обеспечивающую успешное проведение моделирования.

## Список литературы

1. Русаков С. Г. Моделирование нелинейных радиочастотных схем в системах автоматизации схемотехнического проектирования // Автоматизация проектирования, 1997, № 2.
2. Duan X., Mayaram K. An Efficient and Robust Method for Ring-Oscillator Simulation Using the Harmonic-Balance Method // IEEE Trans. Computer-Aided Design, vol. 24, N. 8, pp. 1225–1233, 2005.
3. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli K. K., Mulvaney B. J. Simulation of high-Q oscillators // IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design. Nov. 1998. P. 162–169.
4. Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli K. K., Mulvaney B. J. A robust and efficient oscillator analysis technique using harmonic balance // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Jan. 2000. Vol. 181. P. 451–466.
5. Docking S., Sachdev M. An Analytical Equation for the Oscillation Frequency of High-Frequency Ring Oscillators // IEEE Journal of Solid-State Circuits. February 2003. Vol. 39, N. 2.
6. Selting P., Zheng Q. Numerical stability analysis of oscillating integrated circuits // ELSEVIER J. of Computational and Applied Mathematics. 1997. Vol. 82. P. 367–378.

M. M. Gourary, Senior Research Associate, gourary@ippm.ru,  
Institute for Design Problems in Microelectronics RAS

## Effective Algorithm for Ring Oscillator Simulation Using the Harmonic Balance Method

*Ring oscillators are a well-studied class of circuits due to their wide application. However, modeling their characteristics in the frequency domain encounters difficulties associated with the poor convergence of the numerical continuation process for the harmonic balance equations of such schemes. The paper presents an analysis of the features of the system of harmonic balance equations for ring oscillators, and it is shown that the existence of several solutions of this system is the source of difficulties. It is also shown that the problem persists within the framework of the approach proposed in the literature based on the simulation of an equivalent single-stage circuit representing ring oscillators with identical cascades. To solve the problem, the inclusion of a preliminary stage in the simulation that takes into account only one harmonic of the solution. The new approach to ring oscillator simulation not only essentially improves the reliability of convergence, but also reduces computational efforts of the steady-state simulation. Numerical experiments presented in the paper confirm the obtained theoretical conclusions.*

**Keywords:** design automation, circuit simulation, ring oscillator, harmonic balance, parameter continuation, iterative methods

## References

1. **Rusakov S. G.** Modelirovanie nelinejnyh radiochastotnyh shem v sistemah avtomatizacii shemotehnicheskogo proektirovanija (Simulation of nonlinear radio frequency circuits in circuit design automation systems), *Avtomatizacija Proektirovanija*, 1997, no. 2.
2. **Duan X., Mayaram K.** An Efficient and Robust Method for Ring-Oscillator Simulation Using the Harmonic-Balance Method, *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, 2005, vol. 24, no. 8, pp. 1225–1233.
3. **Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli K. K., Mulvaney B. J.** Simulation of high-Q oscillators, *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*, Nov. 1998, pp. 162–169.
4. **Gourary M. M., Rusakov S. G., Ulyanov S. L., Zharov M. M., Gullapalli, K. K., Mulvaney B. J.** A robust and efficient oscillator analysis technique using harmonic balance, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Jan. 2000, vol. 181, pp. 451–466.
5. **Docking S., Sachdev M.** An Analytical Equation for the Oscillation Frequency of High-Frequency Ring Oscillators, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, February 2003, vol. 39, N. 2.
6. **Selting P., Zheng Q.** Numerical stability analysis of oscillating integrated circuits, *ELSEVIER J. of Computational and Applied Mathematics*, 1997, vol. 82, pp. 367–378.

УДК 519.854.2

DOI: 10.17587/it.25.590-595

**М. В. Ульянов**, вед. науч. сотр., проф., д-р техн. наук, проф., e-mail: muljanov@mail.ru,  
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
**М. И. Фомичёв**, аспирант, преподаватель, e-mail: michan94@yandex.ru,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,  
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

## Сравнительный анализ комбинаций метода ветвей и границ с метаэвристическими алгоритмами для решения асимметричной задачи коммивояжера<sup>1</sup>

*Алгоритм, реализующий метод ветвей и границ, для решения задачи коммивояжера — один из востребованных точных алгоритмов ее решения. Метаэвристические алгоритмы решения этой задачи не гарантируют получения точного решения, но работают "быстро". Для сокращения числа вершин порожденного дерева решений в методе ветвей и границ можно использовать решение, полученное метаэвристическим алгоритмом. За счет выбора метаэвристического алгоритма и его комбинации с методом ветвей и границ можно получить выигрыш во времени получения точного решения. Такой выбор необходимо подтвердить экспериментальными данными о временной эффективности программной реализации такого комбинированного алгоритма. В данной статье рассматриваются некоторые метаэвристические алгоритмы и комбинация таких алгоритмов с классической реализацией метода ветвей и границ для решения асимметричной задачи коммивояжера. Приводятся данные экспериментального исследования среднего времени получения точного решения для диапазона размерности задачи от 30 до 45 и даются рекомендации по выбору метаэвристического алгоритма.*

**Ключевые слова:** задача коммивояжера, метод ветвей и границ, предвычисленный тур, сложность индивидуальной задачи, комбинированные алгоритмы, метаэвристические алгоритмы

### Введение

В современном мире промедление в секунду или даже долю секунды может стоить миллионы рублей. Заинтересованному лицу важно получить точный ответ на вопрос в кратчайшие сроки. Но, к сожалению, даже при нынешних вычислительных мощностях многие задачи не могут быть решены точно за приемлемое время.

Задача коммивояжера является одной из таких задач. Целый ряд практических постановок в области бизнеса и логистики сводится к классической задаче коммивояжера. Она заключается в поиске гамильтонова цикла с минимальной стоимостью в полном асимметричном графе. Одним из самых известных точных алгоритмов решения задачи коммивояжера является алгоритм метода ветвей и границ, предложенный Дж. Литл, К. Мурти, Д. Суини и К. Кэрл в 1963 г. [1]. Однако данный алгоритм имеет экспоненциальную временную сложность по размерности задачи (числу вершин

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-07-00656.



в графе), и, как результат, ряд прикладных задач большой размерности не может быть точно решен этим методом за время, приемлемое для лица, принимающего решение.

Вместе с тем существует ряд алгоритмов, которые не гарантируют нахождение оптимального решения, но позволяют находить достаточно "хорошие" решения за приемлемое с практической точки зрения время. Такие алгоритмы принято называть "метаэвристическими алгоритмами". В данной статье представлено сравнение типичных представителей различных категорий метаэвристических алгоритмов. Кроме того, наличие метаэвристических алгоритмов решения задачи коммивояжера не означает отказа от возможности получения точных решений этой задачи. Различные идеи, например, использование дополнительной памяти [2], позволяют сократить время решения задачи, но этого явно недостаточно. В данной статье исследуется подход, при котором для сокращения времени решения задачи коммивояжера предлагается сократить поисковое дерево решений с помощью тура коммивояжера (назовем этот тур предвычисленным), полученного до начала работы метода ветвей и границ некоторым метаэвристическим алгоритмом. Отметим, что есть смысл использовать только такой метаэвристический алгоритм, который обеспечит не только существенное сокращение поискового дерева решений, а следовательно, и сокращение времени работы метода ветвей и границ, но и сокращение суммарного времени решения, включающего в себя и время выполнения программной реализации самого метаэвристического алгоритма.

### **Задача коммивояжера. Терминология и обозначения**

Для однозначности понимания изложения приведем используемую далее терминологию и обозначения, связанные с задачей коммивояжера. *Асимметричная задача коммивояжера* — это задача нахождения гамильтонова цикла минимального веса в полном взвешенном ориентированном графе без собственных петель.

Полный взвешенный ориентированный граф с  $n$  вершинами задается взвешенной матрицей смежности  $A$  размерности  $n$ , элементы которой определяют веса дуг между вершинами полного графа. Собственные петли запрещаются специальными значениями на главной диагонали матрицы.

В данной работе будет использоваться терминология, принятая для задачи коммивояжера. Гамильтонов цикл в полном графе называется *туром*, тогда задача коммивояжера заключается в нахождении тура минимального веса. Матрица смежности  $A$  называется *матрицей стоимостей*, поскольку в содержательной постановке задачи коммивояжера веса дуг интерпретируются как стоимости проезда между городами. Число вершин графа  $n$ , определяющее размерность матрицы стоимостей, называется *размерностью задачи коммивояжера*. В статье далее рассматривается асимметричная задача коммивояжера, которая представляет собой наиболее общую и вычислительно трудную постановку задачи.

Очевидно, что начальная вершина тура может быть выбрана произвольно. Таким образом, множество всех возможных туров определяется всеми возможными перестановками остальных вершин и имеет мощность  $(n - 1)!$ .

Под термином *индивидуальная задача* будем понимать конкретный экземпляр задачи коммивояжера — это задача, заданная конкретной матрицей стоимостей  $A$  размерности  $n$ .

Одним из точных алгоритмов решения задачи коммивояжера является классический алгоритм [1], реализующий метод ветвей и границ. Идея метода ветвей и границ состоит в том, чтобы разделить текущее множество туров на два множества: одно, которое, весьма вероятно, содержит оптимальный тур, и другое, которое, вероятно, этого тура не содержит.

Опираясь на работу Д. Э. Кнута [3], под *сложностью* индивидуальной задачи коммивояжера, заданной матрицей  $A$ , будем понимать  $s(A)$  — число порожденных алгоритмом ветвей и границ вершин поискового дерева решений. Исследование сложности индивидуальной задачи коммивояжера позволяет абстрагироваться от конкретной реализации алгоритма метода ветвей и границ и программно-аппаратных особенностей компьютера, на котором экспериментально исследуются задача коммивояжера и алгоритмы ее решения.

### **Постановка задачи**

В классическом методе ветвей и границ для решения задачи коммивояжера предполагается, что невозможно начать отсекаать поддеревья поискового дерева решений до тех пор, пока мы не найдем какой-либо тур. Ввиду особенности задачи дерево решений может серьезно

разрастись, пока первый тур не будет найден. Использование предвычисленного (метаэвристическим алгоритмом) тура (известного до начала работы метода ветвей и границ) может сократить размеры дерева решений, т. е. сложность индивидуальной задачи. Такой комбинированный подход может при хороших значениях предвычисленного тура:

- уменьшить время расчета оптимального тура, потому что отсекается необходимость создавать неперспективные узлы дерева решений и посещать их;
- уменьшить объем выделенной памяти, поскольку пропадает необходимость хранить неперспективные узлы дерева.

Таким образом, данный подход направлен на сокращение и времени расчета и объема требуемой памяти. Однако при его реализации возникают несколько вопросов. Очевидно, что чем ближе стоимость предвычисленного тура к точному решению, тем меньше времени потребуется для нахождения оптимального решения. Вместе с тем, предвычисленный тур должен быть найден достаточно быстро. Это значит, что время, затраченное на работу классического метода ветвей и границ, по крайней мере, должно быть не больше, чем суммарное время работы метаэвристического алгоритма и алгоритма метода ветвей и границ с предвычисленным туром. Другими словами, использование предвычисленного тура должно быть оправданным и рациональным.

На основе этих рассуждений сформулируем постановку задачи экспериментального исследования: определить, оправдано ли использование различных метаэвристических алгоритмов для расчета предвычисленного тура.

### **Эвристические алгоритмы получения предвычисленного тура**

Эвристические алгоритмы — это алгоритмы, которые не гарантируют нахождение точного решения, однако решения, найденные этими алгоритмами, в определенной мере близки к оптимальным и при этом работают за "приемлемое" время [15]. В отличие от точных алгоритмов эвристические алгоритмы обычно достаточно просты в реализации и работают быстрее. Все множество эвристических алгоритмов можно разделить на три типа:

- жадные [4];
- роевые [5—7];
- улучшающие решения [8, 9].

Кроме того, существует множество различных алгоритмов, которые предназначены для решения частных случаев задачи (например, для решения метрической задачи коммивояжера [10]).

Жадный алгоритм является одним из самых простых в реализации и понимании принципа работы. Он основывается на выборе самого дешевого перехода между городами последовательно для каждого города, начиная с первого и заканчивая  $n$ -м, запрещая возможные подциклы. Нет никаких сомнений, что этот алгоритм не гарантирует точное решение задачи коммивояжера, более того, тур, полученный с помощью жадного алгоритма, может быть очень далек от оптимального. В то же время он работает достаточно быстро ( $O(n^2)$  в худшем случае).

Классическим представителем роевых алгоритмов является муравьиный алгоритм. Муравьиный алгоритм для задачи коммивояжера был предложен коллективом авторов во главе с Марко Дориго в 1991 г. [5]. Он заключается в эмуляции поведения муравьиной колонии. Его точность зависит от следующих параметров:

- время жизни колонии;
- число муравьев;
- начальное расположение муравьев;
- начальное количество феромона;
- объем выделенного феромона;
- коэффициент испарения;
- число элитных муравьев.

С детальным описанием алгоритма можно ознакомиться в работе [11], общая схема работы представлена ниже:

1. Ввод матрицы расстояний  $D$ .
2. Инициализация параметров алгоритма —  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $e$ ,  $Q$ .
3. Инициализация ребер — присвоение видимости  $\eta_{ij}$  и начальной концентрации феромона.
4. Размещение муравьев в случайно выбранные города без совпадений.
5. Выбор начального кратчайшего маршрута.
6. Цикл по времени жизни колонии  $t = 1, t_{\max}$ .

Что касается алгоритмов, улучшающих решения, то в 1973 г. Ш. Лин и Б. Керниган представили эффективный эвристический алгоритм для задачи коммивояжера (алгоритм Лина—Кернигана) [12]. Он основан на идее итерационного улучшения случайно полученного тура. Как показали экспериментальные результаты, этот алгоритм достаточно часто находит даже глобально оптимальные решения. В то же время сложность алгоритма составляет приблизительно  $O(n^{2,2})$  [12].

Позднее, в 2000 г. К. Хелсгаун предложил модифицированную реализацию упомянутого алгоритма (алгоритм Лина—Кернигана—Хелсгауна) [13]. Этот алгоритм достаточно часто находит оптимальное решение за приемлемое время даже для задач большой размерности.

Рассмотренные алгоритмы спроектированы для решения симметричной задачи коммивояжера. Однако с использованием метода трансформации, предложенного в работе [14], любая несимметричная задача коммивояжера (размерности  $n$ ) может быть преобразована в симметричную задачу коммивояжера (размерности  $2n$ ). К сожалению, эта трансформация также влияет на время решения несимметричной задачи коммивояжера алгоритмом Лина—Кернигана—Хелсгауна.

Основная идея алгоритма Лина—Кернигана—Хелсгауна заключается в том, чтобы найти некоторое допустимое решение, после чего выделить два множества дуг, таких что если все дуги первого множества удалить из найденного тура и заменить их дугами из второго множества, то результатом будет тур, который лучше (дешевле) предыдущего. Процесс переноса дуг повторяется до тех пор, пока не станет невозможно сформировать такие два множества дуг. Все ограничения на множества дуг и особенности их выбора подробно описаны в работе [13].

Эффективность алгоритма Лина—Кернигана—Хелсгауна достигается, в первую очередь, за счет эффективной стратегии поиска множеств дуг, описанных выше. Поиск построен на основе ограничения перемещений, которые определяются множеством возможных кандидатов [13].

Автором работы [15] предпринята попытка разработать алгоритм, который будет находить оптимальные или очень близкие к оптимальным решения достаточно быстро. Однако при этом не уделено внимание вопросу сложности реализации, в результате чего последняя программная реализация, представленная автором, занимает порядка 10 000 строк исходного кода [15].

### Экспериментальный анализ

Эксперименты проводили на стационарном компьютере со следующими характеристиками:

- процессор: Intel i7 3770K 3800 MHz;
- оперативная память: Kingston KHX1600C9D3P1 16 Гбайт;

- материнская плата: ASRock Fatal1ty Z370 Gaming K6;
- операционная система: GIGABYTE GA-Z77X-D3H.

Для минимизации шумов операционной системы фоновые процессы, которые не нужны для исследования, были отключены, а также отсутствовал графический пользовательский интерфейс, а управление операционной системой осуществлялось посредством командной строки.

Алгоритмы реализованы на языке C++ и скомпилированы в исполняемый файл с помощью компилятора: gcc 4.8.5 20150623.

Для экспериментального анализа были сгенерированы несимметричные задачи коммивояжера для размерностей от 30 до 45. Объем выборки для каждой размерности составил 100 000 индивидуальных задач. Веса дуг асимметричных матриц сгенерированы равномерным случайным генератором случайных чисел в диапазоне [1, 106).

В таблице представлено усредненное по экспериментальной выборке время работы алгоритмов в микросекундах. В таблице приняты следующие обозначения:

- $ARS$  — классический алгоритм, реализующий метод ветвей и границ;
- $ARS_{greedy}$  — алгоритм, реализующий метод ветвей и границ с расчетом предвычисленного тура с помощью жадного алгоритма;
- $ARS_{ant_k}$  — алгоритм, реализующий метод ветвей и границ с расчетом предвычисленного тура с помощью муравьиного алгоритма, параметр  $k$  — время жизни колонии, были исследованы три варианта со временем жизни колонии  $2n$ ,  $n$ ,  $n/2$ , где  $n$  — размерность задачи;
- $ARS_{LKH}$  — алгоритм, реализующий метод ветвей и границ с расчетом предвычисленного тура с помощью алгоритма Лина—Кернигана—Хелсгауна.

На основе полученных экспериментальных результатов можно прийти к заключению, что предвычисленный тур, полученный с помощью жадного алгоритма, не оказывает существенного влияния на время работы классического алгоритма. Использование муравьиного алгоритма в качестве алгоритма для расчета предвычисленного тура является нерациональным выбором для всех исследованных размерностей задачи. С ростом размера задачи алгоритм Лина—Кернигана—Хелсгауна демонстрирует увеличение влияния предвычисленного тура на сокращение сум-

### Результаты экспериментов

$n$	$\bar{T}_{ARS}(n)$	$\bar{T}_{ARS_{greedy}}(n)$	$\bar{T}_{ARS_{ant\_2n}}(n)$	$\bar{T}_{ARS_{ant\_n}}(n)$	$\bar{T}_{ARS_{ant\_n/2}}(n)$	$\bar{T}_{ARS_{LKH}}(n)$
30	36 064	35 991	103 126	69 154	52 666	47 132
31	46 189	45 997	122 431	83 832	64 393	57 493
32	58 595	58 421	145 123	101 319	79 980	71 539
33	75 763	75 637	173 840	124 189	99 335	89 269
34	95 272	95 074	205 753	150 077	122 596	109 342
35	122 840	122 526	246 564	184 048	152 449	137 296
36	160 253	159 982	298 927	228 747	194 414	174 565
37	200 241	199 928	356 744	276 314	237 227	214 465
38	268 470	286 486	448 657	353 119	310 908	281 061
39	331 927	331 922	532 891	425 789	377 933	345 382
40	426 732	426 760	650 774	530 512	478 796	437 931
41	549 072	548 974	797 805	663 296	604 769	556 979
42	682 981	682 063	958 466	807 605	745 104	687 072
43	862 458	861 599	1 144 220	995 092	928 952	859 534
44	1 050 941	1 049 858	1 356 959	1 200 666	1 124 756	1 040 319
45	1 398 876	1 398 777	1 733 965	1 560 646	1 478 504	1 355 826

марного времени точного решения задачи коммивояжера.

### Заключение

Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

- предвычисленные туры, полученные с помощью жадного алгоритма и муравьиного эвристического алгоритма, не представляют в рамках изучаемой задачи практической ценности, поскольку суммарное время работы метода ветвей и границ и таких эвристических алгоритмов больше, чем время работы "чистого" метода ветвей и границ;
- по полученным экспериментальным данным, начиная с  $n = 43$ , комбинация алгоритма метода ветвей и границ с алгоритмом Лина—Кернигана—Хелсгауна работает быстрее, чем классический алгоритм метода ветвей и границ для асимметричной задачи коммивояжера, по крайней мере, по оценке в среднем.

Авторы видят дальнейшее развитие исследования в более детальном анализе распределения значений времени работ программных реализаций исследованных алгоритмов.

### Список литературы

1. Little J. D. C., Murty K. G., Sweeney D. W., Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem // Operations Research. 1963. Vol. 11. P. 972—989.
2. Ulyanov M. V., Fomichev M. I. Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesman problem // Business Informatics. 2015. № 4(34). P. 38—46.
3. Knuth D. E. Estimating the efficiency of backtracking programs // Mathematics of Computing. 1975. Vol. 29. P. 121—136.
4. Applegate D. L., Bixby R. E., Chvatal V., Cook W. J. The traveling salesman problem: A computational study. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2006.
5. Coloni A., Dorigo M., Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies // Proceedings of the First European Conference on Artificial Life (ECAL 91). Paris, France, 11—13 December 1991. P. 134—142.
6. Dorigo M., Gambardella L. M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem // IEEE Transactions of Evolutionary Computation. 1997. Vol. 1, N. 1. P. 53—66.
7. Bonavear E., Dorigo M. Swarm intelligence: From natural to artificial systems. Oxford, UK: Oxford University Press, 1999.
8. Gamboa D., Rego C., Glover F. Data structures and ejection chains for solving large scale traveling salesman problems // European Journal of Operational Research. 2005. Vol. 160, N. 1. P. 154—171.
9. Kaplan H., Lewenstein M., Shafrir N., Sviridenko M. Approximation algorithms for asymmetric TSP by decomposing directed regular multigraphs // Journal of the ACM. 2005. Vol. 52, N. 4. P. 602—626.
10. Mömke T., Svensson O. Removing and adding edges for the traveling salesman problem // Journal of the ACM. 2016. Vol. 63, N. 1. P. 315—336.

11. **Stutzle T., Hoos H. H.** MAX-MIN ant system // *Future Generation Computer Systems*. 2000. N. 16. P. 889–914.

12. **Lin S., Kernighan B. W.** An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem // *Operations Research*. 1973. Vol. 21, N. 2. P. 498–516.

13. **Helsgaun K.** An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic // *European Journal of Operational Research*. 2000. Vol. 126, N. 1. P. 106–130.

14. **Jonker R., Volgenant T.** Transforming asymmetric into symmetric traveling salesman problems // *Operations Research Letters*. 1983. N. 2. P. 161–163.

15. **Helsgaun K.** An extension of the Lin–Kernighan–Helsgaun TSP solver for constrained traveling salesman and vehicle routing problems // *Technical Report*. Roskilde: Roskilde University, 2017.

**M. V. Ulyanov**, Leading Researcher, Professor, e-mail: muljanov@mail.ru,  
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences,  
M. V. Lomonosov Moscow State University,

**M. I. Fomichev**, Doctoral Student, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev,  
Lecturer of Faculty of Computer Science, School of Software Engineering National Research University  
Higher School of Economics, e-mail: michan94@yandex.ru

## Comparative Analysis of the Branch and Bound Method Combinations with Metaheuristic Algorithms for Solving the Asymmetric Traveling Salesman Problem

*The algorithm that implements the Branch and Bound method for solving the Traveling Salesman Problem is one of the common exact algorithms for solving it. Metaheuristic algorithms for solving this problem do not guarantee obtaining an exact solution, however they work "quickly". In order to reduce the nodes number of the generated decision tree in the Branch and Bound method, you can use the solution obtained by the metaheuristic algorithm. By choosing a metaheuristic algorithm and its combination with the Branch and Bound method, it is possible to gain time for obtaining an exact solution. Such a choice must be confirmed by experimental data on the time efficiency of the software implementation of such a combined algorithm. This article discusses some metaheuristic algorithms and a combination of such algorithms with the classical implementation of the Branch and Bound method for solving the asymmetric Traveling Salesman Problem. The data of an experimental study of the average time of obtaining an exact solution for the range of the dimension of the problem from 30 to 45 are given, and recommendations are given on the choice of a metaheuristic algorithm.*

**Keywords:** asymmetric Traveling Salesman Problem, branch and bound method, precomputed tour, complexity of the individual problem, combined algorithm, metaheuristic algorithm

DOI: 10.17587/it.25.590-595

### References

1. **Little J. D. C., Murty K. G., Sweeney D. W., Karel C.** An algorithm for the traveling salesman problem, *Operations Research*, 1963, vol. 11, pp. 972–989.

2. **Ulyanov M. V., Fomichev M. I.** Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesmen problem, *Business Informatics*, 2015, no. 4(34), pp. 38–46.

3. **Knuth D. E.** Estimating the efficiency of backtracking programs, *Mathematics of Computing*, 1975, vol. 29, pp. 121–136.

4. **Applegate D. L., Bixby R. E., Chvatal V., Cook W. J.** The traveling salesman problem: A computational study, Princeton, NJ, Princeton University Press, 2006.

5. **Colomi A., Dorigo M., Maniezzo V.** Distributed optimization by ant colonies, *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life (ECAL 91)*, Paris, France, 11–13 December 1991, pp. 134–142.

6. **Dorigo M., Gambardella L. M.** Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem, *IEEE Transactions of Evolutionary Computation*, 1997, vol. 1, no. 1, pp. 53–66.

7. **Bonavear E., Dorigo M.** *Swarm intelligence: From natural to artificial systems*, Oxford, UK, Oxford University Press, 1999.

8. **Gamboa D., Rego C., Glover F.** Data structures and ejection chains for solving large scale traveling salesman problems, *European Journal of Operational Research*, 2005, vol. 160, no. 1, pp. 154–171.

9. **Kaplan H., Lewenstein M., Shafir N., Sviridenko M.** Approximation algorithms for asymmetric TSP by decomposing directed regular multigraphs, *Journal of the ACM*, 2005, vol. 52, no. 4, pp. 602–626.

10. **Mömke T., Svensson O.** Removing and adding edges for the traveling salesman problem, *Journal of the ACM*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 315–336.

11. **Stutzle T., Hoos H. H.** MAX-MIN ant system, *Future Generation Computer Systems*, 2000, no. 16, pp. 889–914.

12. **Lin S., Kernighan B. W.** An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem, *Operations Research*, 1973, vol. 21, no. 2, pp. 498–516.

13. **Helsgaun K.** An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic, *European Journal of Operational Research*, 2000, vol. 126, no. 1, pp. 106–130.

14. **Jonker R., Volgenant T.** Transforming asymmetric into symmetric traveling salesman problems, *Operations Research Letters*, 1983, no. 2, pp. 161–163.

15. **Helsgaun K.** An extension of the Lin–Kernighan–Helsgaun TSP solver for constrained traveling salesman and vehicle routing problems. *Technical Report*, Roskilde, Roskilde University, 2017.

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

## DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS AND IMAGES

УДК 004.92

DOI: 10.17587/it.25.596-601

**Т. О. Федорова**, студент, e-mail: fedorovatiana@yandex.ru,  
**О. А. Соснина**, канд. техн. наук, доц., e-mail: o.a.sosnina@mail.ru,  
Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

### Оптимизация продолжительности визуализации сцен с Mental Ray

*Рассматриваются способы оптимизации продолжительности визуализации сцен с использованием визуализатора Mental Ray. Проведен анализ особенностей Mental Ray, выявлены настройки, оказывающие наибольшее влияние на длительность визуализации. Выявлены особенности разработки виртуальной модели в целях сокращения продолжительности визуализации. Проведены эксперименты с настройками визуализации, влияющими в большей степени на продолжительность визуализации и фотореалистичность изображения.*

**Ключевые слова:** оптимизация продолжительности визуализации, оптимальные настройки Mental Ray, особенности Mental Ray, оптимизация модели на начальных этапах моделирования

#### Введение

При стремлении достичь фотореалистичности создаваемого изображения в программах виртуального моделирования продолжительность визуализации может увеличиваться до неприемлемого значения. Вследствие этого перед пользователями встает вопрос об оптимизации продолжительности визуализации сцен. Данная проблема актуальна, поскольку вычислительные мощности современных компьютеров ограничены, а стремление к совершенству создаваемого изображения безгранично.

Целью данного исследования является нахождение способов оптимизации сцены и ее настроек для оптимальной скорости рендера с наименьшими потерями с точки зрения фотореалистичности получаемого изображения.

Продолжительность визуализации и особенности создания сцены зависят от конкретного визуализатора и программного продукта для 3D-моделирования. В данном исследовании будет идти речь об использовании программы 3ds MAX в комбинации с визуализатором Mental Ray.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

1) рассмотреть особенности визуализатора Mental Ray. На базе результатов решения данной задачи проводятся дальнейшие эксперименты по оптимизации настроек рендера;

2) выявить особенности разработки виртуальной модели в целях сокращения продолжительности визуализации. Результаты решения данной задачи позволяют оптимизировать модель без ухудшения фотореалистичности итогового изображения;

3) определить экспериментальным путем настройки визуализатора, которые в комплексе позволяют сократить длительность визуализации при приемлемом для конкретных задач уровне фотореалистичности изображения. В ходе решения данной задачи проводится ряд тестовых визуализаций, позволяющих сравнить выигрыш в продолжительности визуализации при изменении определенных настроек визуализатора. Эксперименты проводились на базе сцены с виртуальными архитектурными объектами.

#### 1. Особенности визуализатора Mental Ray

Выбранная система рендеринга оказывает значительное влияние на качество и продолжительность результирующей визуализации. Визуализатор влияет на общий внешний вид сцены, на свет, на материалы. В данном исследовании в качестве визуализатора рассматривается Mental Ray.

У данной системы рендеринга есть набор собственных текстур и источников света, а также имитация атмосферы. Есть возможность на-

стройки рассеянного и отражаемого света. Рендеринг осуществляется дольше, чем в Scanline (стандартном визуализаторе), так как у Mental Ray есть свои особенности расчета итоговой сцены. На продолжительность визуализации в Mental Ray оказывают влияние следующие факторы:

- суммарное число полигонов объектов в сцене;
- степень использования полупрозрачных, отражающих, глянцевых и рельефных текстур;
- используемые источники света (их число и качество);
- размеры создаваемого кадра;
- параметры системы рендеринга [1].

Визуализаторы в процессе визуализации ведут себя по-разному, поэтому принято их делить на предвзятые и непредвзятые. Отличие их состоит в том, что предвзятый метод (например, Mental Ray, V-Ray) позволяет указать допущения, которые визуализатор может делать в процессе вычисления пикселей, а непредвзятый (например, Maxwell, Iray) не предусматривает определение допущений [2].

Global Illumination — инструмент, моделирующий глобальное освещение. Он содержит настройки, отвечающие за принцип расчета освещения, который учитывает вторичные отскоки. Для такого расчета в системе визуализации есть множество настроек параметров, которые позволяют выбрать формулу, которая бы оптимально подходила для вычисления усредненных значений освещенности. Такое число настроек является следствием отсутствия единой стандартной формулы, которая смогла бы описать все возможные физические эффекты (первичное и вторичное освещение, каустику, отражения и т. д.).

Global Illumination учитывает все особенности освещения, такие как падение лучей, отражение, преломление объектами света. Ray Tracing выполняет трассировку лучей, Radiosity моделирует диффузное отражение (перенос излучения). Комбинация Direct Illumination и Indirect Illumination формирует результирующее освещение: Direct Illumination — прямое освещение — от источника света; Indirect Illumination — не прямое освещение после одного или нескольких отражений от других поверхностей. Инструменты Photon Map (фотонная карта) и Final Gather (окончательный сбор) также используются в Global Illumination. Принципиальное отличие данных методов состоит в том, что лучи, которые используются для Final Gather, испускаются от самого объекта визуализации, а не от источников света или камеры. Данный метод превосходит метод Photon Map по производительности и качеству получаемой визуализации.

Отражения и преломления в системе визуализации Mental Ray имитируются на базе Ray Tracing. Лучи испускаются из источников света, затем отскакивают от объектов (соответственно физическим законам) и в результате попадают в объектив камеры. Весь их путь записывается в файл. Параметр Trace Depth (глубина трассировки) контролирует скорость расчета отражений и теней. Он ограничивает число отражений, преломлений светового потока. Такой принцип работы визуализатора является причиной появления на итоговой визуализации шумов, пятен и артефактов. Это происходит вследствие ограниченности вычислительных ресурсов, невозможности испускать бесконечное число фотонов. Для решения данной проблемы применяются специальные формулы для усреднения значения освещенности между точками, куда были пущены несколько лучей, указанные пользователем в настройках.

Стандартный визуализатор выводит в окно результат работы в виде строк пикселей сверху вниз, а Mental Ray визуализирует кадр прямоугольными блоками пикселей (buckets — сегменты). Порядок визуализации сегментов изображения может различаться. По умолчанию система визуализации выбирает порядок обработки, минимизирующий при переходе к следующему сегменту затраты оперативной памяти [3].

Особенности Mental Ray:

- позволяет использовать любые типы материалов, но предпочтительнее использовать специализированные материалы (Arch&Design). Данный материал оптимизирован под Mental Ray, поэтому позволяет достичь лучшего качества визуализации поверхностей и более высокой скорости обработки;
- критически важно использование реальных физических размеров объектов. Моделирование физически корректного освещения сцены невозможно при несоблюдении данного условия, поскольку сила света затухает пропорционально квадрату расстояния между источником света и освещаемой поверхностью;
- в архитектурных визуализациях при имитации искусственного освещения предпочтительнее использовать Photometric Lights (фотометрические источники света). Для имитации прямого солнечного и рассеянного дневного света предпочтительно использовать mrSun и mrSky;
- рекомендуется использовать Ray Traced Shadow в настройках расчета падающих теней. Он гарантирует быстрые вычисления при малых затратах оперативной памяти;

- рекомендуется применять режим *mr Photographic Exposure Control* (фотографический контроль экспозиции). При использовании в корректно смоделированной сцене позволяет точно воспроизводить настройки реальных съемочных камер.

Таким образом, на результирующую скорость визуализации значительное влияние оказывают: настройки *Global Illumination* (необходимо обратить внимание на *Trace Depth*), общее число полигонов в сцене, число и качество источников света. Рекомендуется внимательно относиться к используемым в сцене материалам, использовать *Ray Traced Shadow* (в настройках падающих теней) и *mr Photographic Exposure Control*.

## 2. Особенности разработки виртуальной модели в целях сокращения продолжительности визуализации

Чтобы сократить время визуализации, необходимо на протяжении всей работы с моделью придерживаться ряда правил, представленных ниже.

1. При копировании объектов, которые не будут в дальнейшем редактироваться, следует использовать метод *Instance*.

При использовании метода *Copy* в *3ds max* создается точно такой же объект, а следовательно, увеличивается число полигонов и вес сцены. *Instance*, в отличие от *Copy*, не копирует объект полностью, а лишь хранит информацию, что в сцене располагается копия объекта.

2. Необходимо контролировать число полигонов.

Данный пункт включает в себя следующие рекомендации:

- отказаться от моделирования незначительных деталей, которые не входят в круг задач, стоящих перед итоговой визуализацией моделируемой сцены;
- использовать операции, сильно усложняющие полигональную сетку (такие как *TurboSmooth* и *MeshSmooth*), только в тех случаях, когда это действительно необходимо для решения задачи;
- вывести статистику числа полигонов во *Viewport* и контролировать их рост;
- перед рендером отсортировать объекты по числу полигонов и проверить первые позиции данного списка (оправдано ли использование такого огромного числа полигонов для конкретного объекта).

3. Необходимо проводить оптимизацию объектов сцены.

Для уменьшения числа полигонов можно использовать следующие модификаторы (лучше применять на отдаленных и высокополигональных объектах):

- *Optimize* упрощает геометрию и ускоряет рендеринг при сохранении приемлемого качества изображения за счет уменьшения числа граней и вершин в объекте;
- *MultiRes* снижает расход оперативной памяти при визуализации, уменьшая число вершин и полигонов. *MultiRes* в отличие от *Optimize* обеспечивает более быструю работу и указывает процент снижения и число вершин;
- *ProOptimizer* сохраняет внешний вид объекта (материал и карты) при уменьшении числа вершин (а также числа граней) в объекте.

4. Оптимизация материалов:

- предпочтительнее использовать текстуры в формате *JPEG*. Такие форматы, как *TIFF* и *PNG*, потребляют значительно больше памяти, и, как следствие, снижают общую производительность;
- оптимизировать разрешение текстуры в соответствии с решаемыми задачами (не использовать текстуры в большом разрешении без необходимости). Если в сцене все же присутствуют такие текстуры, то можно воспользоваться настройками вкладки *Common* группы параметров *Bitmap Performance and Memory Options*, что увеличит производительность и уменьшит нагрузку на оперативную память;
- избегать использования файлов *PSD*, так как при обработке рендера требуется больше ОЗУ (данная проблема ощутимо видна при визуализации с *Mental Ray*);
- использовать карту *Displacement* (смещение) только в том случае, если с помощью *Bump* не получается достичь необходимого результата. *Displacement* значительно увеличивает время рендеринга.

5. Удаление скрытой геометрии.

Если из-за скрытой геометрии файл приобретает значительный размер, то перед рендером следует удалить ее (или перед удалением сохранить в отдельный файл, чтобы потом добавить эти объекты позже) [4].

6. Объект со сложной геометрией (например, кованое ограждение) можно заменить текстурой.

Таким образом, для обеспечения условий для оптимального времени визуализации необходимо при копировании объектов по воз-



возможности использовать Instance, контролировать число полигонов, проводить оптимизацию объектов сцены и материалов, при необходимости удалять скрытую геометрию, заменять объекты со сложной геометрией текстурами (там, где это возможно). Данные операции помогут сократить число объектов (как следствие, уменьшить размер файла сцены), полигонов и оптимизировать карты текстур (как следствие, будет требоваться меньше ОЗУ). Размер файла (для большого файла требуется больше ресурсов оперативной памяти), число полигонов, используемые карты для текстур оказывают значительное влияние на продолжительность визуализации.

### 3. Оптимизация настроек визуализации

Был проведен анализ целевого назначения всех настроек визуализатора Mental Ray с использованием материалов сайта [knowledge.autodesk.com](http://knowledge.autodesk.com) и других интернет-ресурсов. В результате были выявлены настройки, которые могут оказать ощутимое влияние на время рендера.

Тесты проводили на компьютере со следующими характеристиками:

- операционная система Windows 10 (64-разрядная);
- процессор Intel Core i7-8700 CPU 3.20 GHz 3.19 GHz 12 ядер;
- оперативная память 16 Гбайт;
- видеокарта NVIDIA GeForce GTX 1060 3GB;
- дисковая система SSD-диск для системы и программ + отдельный диск для проектов и данных.

Сцена, на которой проводили тестовые визуализации, представляет собой виртуальную модель дворца Берли-хаус, построенную в соответствии с особенностями разработки, описанными в данной статье. Из источников света в сцене присутствует система освещения Daylight. Для создания растительности использовали плагин Forest Pack.

Изначально все настройки рендера соответствуют параметрам по умолчанию, за исключением нескольких из них.

1. Включен метод Photon Mapping. К его преимуществам относится: расчет Global Illumination, хорошее соотношение качество/скорость.

2. Выбран mr Photographic Exposure Control, так как он дает наилучшие результаты при рендеринге с Mental Ray.

От Output Size (размера) итогового изображения значительно зависит время рендеринга

(для примера: рендер с Output Size = 1080 × 1920 занял 11 мин 52 с, рендер с Output Size = 480 × 854 занял 3 мин 12 с, что в процентном соотношении соответствует уменьшению времени на 81 %) для тестовых визуализаций выбран размер 720 × 1280 (5 мин 56 с).

Результат визуализации сцены с данными настройками представлен на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Далее проводили тестовые визуализации, и итоговый результат оценивали по двум параметрам: длительность визуализации и качество итоговой визуализации (см. таблицу).

Оценку проводили по шкале от 1 до 5. Значения менее 3 считаются неудовлетворительными. За эталон, соответствующий 5 по всем критериям, принимается визуализация на рис. 1.

Критерии оценки качества использовались следующие:

1) отсутствие шума (5 — шум отсутствует, 1 — уровень шума наивысший);

2) качество отражения/преломления (5 — наилучшее, 1 — наихудшее);

3) качество теней (5 — наилучшее, 1 — наихудшее).

Изменение данных параметров (длительность визуализации и качество итоговой визуализации) ускоряет визуализацию, но влияет на фотореалистичность итогового изображения. Каждый параметр отвечает за свои определенные функции, которые описаны ниже:

1) параметр Quality устанавливает качество рендеринга. Более низкие значения отображаются быстрее, но дают более зернистые изображения. Более высокие значения дают более гладкие изображения, но занимают больше времени;

2) группа параметров Reflections/Refractions (Отражения/Преломления) отвечает за настройку параметров трассировки лучей. Глубина трассировки контролирует число отражений или преломления светового луча;

3) Soft Shadows Precision задает качество проработки мягких теней от фотометрических и Mental Ray источников света;

4) Glossy Reflections Precision регулирует качество проработки отражений на материалах Arch&Design;

5) Glossy Refractions Precision определяет качество проработки прохождения преломленного света в специализированных материалах (Arch&Design);

6) Shadow Mode настраивает тип используемых теней. Transparent (More Accurate) — тени прозрачны и точны, но визуализация займет

### Результаты проведенных тестов

Вкладка	Свиток	Группа параметров	Параметры	Значение по умолчанию	№ теста	Новое значение	Время	Качество		
Renderer	Sampling Quality	Samples per Pixel	Quality	0,25	1.1	0,1	2 мин 50 с	На изображении появились артефакты (зашумленность), заметные невооруженным глазом Отсутствие шума = 2		
					1.2	0,18	4 мин 24 с	Отсутствие шума = 3		
					1.3	0,22	5 мин 14 с	Отсутствие шума = 4		
	Rendering Algorithms	Reflections / Refractions	1) Max Trace Depth 2) Max. Reflections 3) Max. Refractions	1) 6 2) 4 3) 6	2.1	1) 1 2) 1 3) 1	5 мин 44 с	Качество отражения / преломления = 3		
	Global Tuning Parameters	—	Soft Shadows Precision	1	3.1	0,25	3 мин 30 с	Качество теней = 4		
3.2					0,125	2 мин 51 с	Качество теней = 3			
3.3					1) 0,1 2) 0,1	5 мин 46 с	Видимые изменения отсутствуют			
Global Illumination	Skylights & Environment Lighting (IBL)	Skylight Mode	Shadow Mode	Transparent (More Accurate)	4.1	Opaque (Faster)	4 мин 8 с	Видимые изменения отсутствуют		
					Shadow Quality	0,5	4.2	0,25	3 мин 28 с	Видимые изменения отсутствуют
							4.3	0,12	2 мин 51 с	Отсутствие шума = 3
	Caustics & Photon Mapping (GI)	Photon Mapping (GI)	Maximum Num. Photons per Sample	500	5.1	250	5 мин 46 с	Видимые изменения отсутствуют		
					5.2	125	5 мин 43 с	Видимые изменения отсутствуют		

больше времени. Opaque (Faster) — тени непрозрачны, они менее точны, но визуализация займет меньше времени;

7) Shadow Quality устанавливает качество теней. При более низких значениях тени становятся более зернистыми. Более качественные тени занимают больше времени;

8) Maximum Num. Photons per Sample устанавливает, сколько фотонов используется для вычисления интенсивности Global Illumination. Чем больше это значение, тем менее шумным, но более размытым становится глобальное освещение. Уменьшение этого значения делает глобальное освещение более шумным, но менее размытым. Чем выше значение "Образцы", тем продолжительнее рендеринг [5].

Согласно проведенным тестам были выбраны следующие настройки:

- Quality = 0,22;
- Max Trace Depth = 1;
- Max. Reflections = 1;
- Max. Refractions = 1;
- Glossy Reflections Precision = 0,1;
- Glossy Refractions Precision = 0,1;
- Shadow Mode = Opaque (Faster);

- Shadow Quality = 0,25;
- Maximum Num. Photons per Sample = 125.

Результат визуализации сцены с измененными настройками представлен на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

В результате удалось сократить время визуализации (с 5 мин 56 с до 2 мин 30 с) на 58 %.

В данной статье приведен пример без использования дополнительных эффектов визуализации. Если в сцене будут настроены дополнительные эффекты, то скорость рендера можно будет увеличить за счет грамотной настройки их параметров, которые в данной статье не рассматриваются. Настройки, рассмотренные в данной статье, могут помочь ускорить рендеринг в любой сцене, но их вклад будет отличаться в зависимости от свойств использованных материалов, числа объектов с определенными материалами.

Таким образом, для ускорения визуализации необходимо настроить в зависимости от сцены следующие параметры: Quality (группа параметров Samples per Pixel); Max Trace Depth, Max. Reflections, Max. Refractions (группа параметров Reflections/Refractions); Soft Shadows

Precision, Glossy Reflections Precision, Glossy Refractions Precision (свиток Global Tuning Parameters); Shadow Mode, Shadow Quality (группа параметров Skylight Mode); Maximum Num. Photons per Sample (группа параметров Photon Mapping (GI)). В проведенном тесте за счет изменения данных параметров удалось сократить время визуализации на 58 %.

### Заключение

Таким образом, для оптимизации продолжительности визуализации необходимо проводить ряд действий на протяжении всего процесса работы со сценой, начиная с самых ранних этапов. Ускорить визуализацию без ухудшения фотореалистичности возможно за счет применения методов, описанных в разделе "Особенности разработки виртуальной модели в целях сокращения продолжительности визуализации". Если данных методов оказалось недостаточно, то можно применить методы из раздела "Оптимизация настроек визуализации", поэк-

периментировав с предложенными настройками, учитывая особенности смоделированной сцены. Методы из данного раздела влияют на итоговое качество визуализации, поэтому необходимо оптимизировать данные настройки в соответствии с поставленными задачами.

### Список литературы

1. Тимофеев С. М. Приемы создания интерьеров различных стилей. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 380 с.
2. Выбор оптимального движка рендеринга для ваших задач. URL: <http://www.cad.dp.ua/sovets/optima-render.php> (дата обращения: 05.03.19).
3. Петров И. Б. Учебно-методическое пособие по изучению образовательного модуля Архитектурная визуализация с использованием Autodesk 3ds Max Design и mental ray. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2012. 56 с.
4. Способ оптимизации производительности очень больших сцен 3ds Max. URL: <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/3ds-max/troubleshooting/caas/sfdarticles/sfdarticles/RUS/How-to-optimize-performance-in-very-large-3ds-Max-scenes.html> (дата обращения: 05.03.19).
5. 3ds Max Help. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/3DSMax/files/GUID-3C86B3A9-D670-4152-832E-3E1B37B89AC2-htm.html> (дата обращения: 05.03.19).

T. O. Fedorova, student, e-mail: fedorovatatianoa@yandex.ru,

O. A. Sosnina, Associate Professor, PhD in Engineering sciences, e-mail: o.a.sosnina@mail.ru,

R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation

## Optimization Duration of Scenes Visualization with Mental Ray

*The present article examines ways to optimize the duration of scene visualization with Mental Ray. 3ds MAX software was selected for research of Mental ray. The analysis of the features of Mental ray was performed. It helped to identify settings that have the greatest impact on the duration of visualization. The connection between features of the development of a virtual model and reducing the duration of visualization was identified. It has been revealed that a special optimization should be carried out at each stage of the development of the scene for achieving the best results. All settings for Mental ray were analyzed. It was concluded about the settings that can have a significant impact in the rendering time. The theoretical results were proved by test renders. Experiments were carried out with each of these settings of the visualization. As a result, the settings that have a greater effect on the duration of the visualization, and the effect on the photorealism of the resulting image were identified. The goal was achieved. The final test showed that changing of these settings can help to reduce time of visualization. Reduction of the visualization time by 58 % was achieved. The visualization time will reduce in any scene with the help of the results of this research. The degree of success will depend on the individual characteristics of the scene.*

**Keywords:** visualization duration optimization; optimal mental ray settings; features mental ray; model optimization at the initial stages of modeling

DOI: 10.17587/it.25.596-601

### References

1. Timofeev S. M. Techniques for creating interiors of various styles, SPb.: BHV-Petersburg, 2010, pp. 380 (in Russian).
2. Choosing the best visualizer for your tasks, available at: <http://www.cad.dp.ua/sovets/optima-render.php> (date of access: 05.03.19).
3. Petrov I. B. Study Guide for the study of the educational module Architectural Visualization using Autodesk 3ds Max Design and mental ray, SPb., SPbSU ITMO, 2012, pp. 56 (in Russian).

4. A way to optimize the performance of very large scenes 3ds Max, available at: <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/3ds-max/troubleshooting/caas/sfdarticles/sfdarticles/RUS/How-to-optimize-performance-in-very-large-3ds-Max-scenes.html> (date of access: 05.03.19).
5. 3ds Max Help, available at: <https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/3DSMax/files/GUID-3C86B3A9-D670-4152-832E-3E1B37B89AC2-htm.html> (date of access: 05.03.19).

**Ю. А. Мезенцев**, д-р техн. наук, проф., e-mail: mesyan@yandex.ru,  
**О. М. Разумникова**, д-р биол. наук, проф., e-mail: razoum@mail.ru,  
Новосибирский государственный технический университет,  
**И. В. Тарасова**, д-р мед. наук, вед. науч. сотр., e-mail: iriz78@mail.ru,  
**О. А. Трубникова**, д-р мед. наук, зав. лабораторией, e-mail: olgalet17@mail.ru,  
ФГБНУ НИИ комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний, г. Кемерово

## О некоторых задачах кластеризации больших данных по минимаксным и аддитивным критериям, применение в медицине и нейрофизиологии\*

*Рассматриваются NP-трудные задачи кластеризации в применении к данным нейрофизиологических исследований (показателей послеоперационной когнитивной дисфункции). Приводятся варианты постановок задач кластеризации в виде задач смешанного целочисленного программирования, в том числе с использованием непрерывной релаксации, снижающей трудоемкость решений без потери точности. Представлены результаты вычислительных экспериментов с серией реализаций поставленных задач на реальных данных, с использованием программной реализации алгоритма бинарных отсечений и ветвлений, демонстрирующие высокую эффективность разработанного инструментария.*

**Ключевые слова:** кластеризация, минимаксный критерий качества, аддитивный критерий, линейная релаксация, алгоритм бинарных отсечений и ветвлений, выявление послеоперационной когнитивной дисфункции

### Введение

Различные модификации прикладных задач кластеризации и соответствующих алгоритмов решения известны довольно давно. Этой проблематике посвящено множество работ по прикладной статистике [1], методам дискретной оптимизации [2, 3]. Большинство подобных постановок относятся к разряду труднорешаемых задач смешанного целочисленного программирования [2]. Настоящая работа посвящена решению ряда модификаций прикладной задачи кластеризации, выявлению и сравнению содержательных закономерностей разбиений различных множеств объектов на подмножества с сопоставлением таких разбиений по частотным характеристикам электрической активности мозга у пациентов до коронарного шунтирования и через 7...10 суток после операции.

\*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-29-01017.

### 1. Постановка задачи кластеризации по критерию минимума максимальной суммы расстояний между ближайшими парами объектов внутри кластера

В данной статье развивается подход, основанный на применении инструментария (моделей и методов) смешанного целочисленного линейного программирования (milp). Кластеризация осуществляется посредством решения специальных задач названного класса, которые, в терминах milp, можно интерпретировать как разновидности задачи о назначениях исходного множества объектов на множество кластеров. При интерпретации в терминах теории расписаний объекты рассматриваются в качестве заявок, а кластеры — в качестве приборов, на которые назначаются заявки. Подобная задача сформулирована в работах [4, 5]. Для каждой такой заявки и каждого прибора определены характеристики переходов от любых текущих к последующим заявкам (цена, время, коэффициент корреляции, эвклидово

расстояние, либо любой другой скаляр, который для простоты будем именовать расстоянием). Вполне очевидна связь данной задачи с задачами маршрутизации (vgr). В этом контексте последовательности переходов между объектами не фиксированы и подлежат определению. Пересечения кластеров по объектам (и объектов по кластерам) не допускаются.

Для формального представления задачи введем следующие обозначения:

$i, j = \overline{1, n}$  — номера объектов;  $l, k = \overline{1, m}$  — номера кластеров;  $c_{i,j}^k$  — расстояния между объектами  $i$  и  $j$  в кластере  $k$ . Тогда задача кластеризации состоит в определении булевых переменных  $x_{i,j}^k$  при выполнении ряда условий:

$$x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{если в кластер } k \text{ включается} \\ & \text{пара объектов } i \text{ и } j; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n x_{i,j}^k = 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad i \neq j; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j}^k = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad i \neq j; \quad (3)$$

$$\sum_{k=1, k \neq l}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j}^k + \sum_{j=1}^n x_{j,i}^l \leq 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad l = \overline{1, m}; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{j,i}^l + \sum_{k=1, k \neq l}^m \sum_{i=1}^n x_{i,j}^k \leq 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad l = \overline{1, m}; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{j,s}^k x_{i,j}^k \leq R_s^k, \quad k = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, S}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{i,j}^k x_{i,j}^k \leq \lambda, \quad k = \overline{1, m}; \quad (7)$$

$$\lambda \rightarrow \min. \quad (8)$$

Ограничения-равенства (2)—(3) с учетом (1) являются обычными условиями задачи о назначениях (любой объект может принадлежать только одному кластеру).

В совокупности (4)—(5) означают следующее. Сумма числа назначений переходов от объектов-источников для всех кластеров, кроме кластера  $l$ , к объектам-стокам кластера  $l$  меньше либо равна единице. Данные условия запрещают принадлежность объектов всем кластерам, кроме кластера  $l$ . Сумма числа назначений переходов от объектов-источников для кластера  $l$  к объектам-стокам всех кластеров, кроме кластера  $l$ , меньше либо равна единице. Это запрещает передачу объектов, назначенных кластеру  $l$ , любым другим кластерам. В этом

контексте предполагается определение последовательностей переходов от одних объектов внутри кластера к другим. Этим же обусловлено использование понятий объекта-источника и объекта-стока, которые в совокупности определяют отношения предшествования—следования между объектами, которые, в частности, используются в задачах vgr.

Задачи кластеризации могут дополняться ресурсными ограничениями вида (6). Чаще всего посредством ресурсных ограничений учитываются пропускные способности коммуникаций и грузоподъемности транспортных средств в задачах маршрутизации.

Условия (7) и (8) в совокупности реализуют минимаксный критерий, интерпретируемый как критерий быстродействия рассматриваемой параллельно-последовательной обслуживаемой системы и как критерий равномерной нагрузки на кластеры [6, 7].

## 2. Постановка задачи кластеризации по критерию минимума максимальной суммы расстояний между всеми парами объектов внутри кластера

Задачи кластеризации, не связанные с маршрутизацией, требуют несколько иного подхода к определению эффективности принадлежности (назначений) объектов кластерам.

Наиболее рациональной и чаще всего используемой мерой является сумма расстояний между всеми парами объектов внутри кластера [1]. Ее использование существенно усложняет формальную постановку задачи в сравнении с (1)—(8). Приведем формальную постановку задачи оптимальной кластеризации для этого случая.

Определим переменные  $y_i^k$  (идентифицирующие принадлежность объектов  $i, j, i, j = \overline{1, n}$ , кластеру  $k, k = \overline{1, m}$ ) при выполнении ряда условий:

$$y_i^k = \begin{cases} 1, & \text{если объект } i \text{ принадлежит} \\ & \text{кластеру } k; \\ 0 & \text{в противном случае, } i = \overline{1, n}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^m y_i^k = 1, \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Определим также зависимые переменные  $x_{i,j}^k = y_i^k y_j^k$  и линеаризующие неравенства [8]:

$$0 \leq y_i^k + y_j^k - 2x_{i,j}^k \leq 1, \quad k = \overline{1, m}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j,$$

которые при несимметричной матрице расстояний преобразуются в неравенства

$$0 \leq y_i^k + y_j^k - x_{i,j}^k - x_{j,i}^k \leq 1, \quad k = \overline{1, m} \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j, \quad (11)$$

$$x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{если кластеру } k \text{ принадлежат} \\ & \text{объекты } i, j: y_i^k = 1, y_j^k = 1; \\ 0 & \text{в противном случае,} \\ & i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \end{cases} \quad (12)$$

Добавив в задачу условия (7) и (8), реализующие минимаксный критерий:  $\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{i,j} x_{i,j}^k \leq \lambda$ ,  $k = \overline{1, m}$ ,  $i \neq j$ ,  $\lambda \rightarrow \min$ , на имеющие, однако, несколько иной смысл, чем в задаче (1)–(8) (минимизации максимальной по всем кластерам суммы расстояний между всеми объектами каждого кластера), получим искомую формализацию (7)–(12) названной в заголовке раздела задачи.

Кроме критерия (7)–(8), в зависимости от содержательного смысла задачи кластеризации в ряде случаев более приемлемым является аддитивный критерий, который удобно представлять в виде

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{i,j} x_{i,j}^k = \lambda^k, \quad k = \overline{1, m}, \quad i \neq j; \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^m \lambda^k \rightarrow \min. \quad (14)$$

Здесь  $\lambda^k$  — сумма расстояний между всеми парами объектов в кластере  $k$ ,  $k = \overline{1, m}$ .

Решение задачи (9)–(14) позволяет находить разбиение множества объектов с заданными расстояниями между всеми парами объектов на заданное число ( $m$ ) подмножеств (кластеров), которое гарантирует минимизацию суммы минимальных суммарных расстояний между всеми парами объектов по всем кластерам.

Оценим трудоемкость вариантов задачи кластеризации (1)–(8), (7)–(12), (9)–(14).

### 3. Оценки вычислительной сложности задач кластеризации и возможностей релаксации

Формального доказательства NP-трудности представленных постановок задач нами не приводится, поскольку такое доказательство предполагает сведение представленных постановок к любой известной задаче с NP-полнотой, что само по себе может оказаться труднорешаемой

задачей. Заметим только, что при значительном упрощении ограничивающих условий любой из приведенных выше задач получается NP-трудная задача смешанного целочисленного программирования. В частности, подзадачи (1)–(3), (7), (8), либо (7)–(10), (12) интерпретируются как NP-трудная задача оптимизации расписаний несвязанных параллельных машин по критерию  $C_{\max}$ . Доказательство ее NP-трудности можно найти, например, в работах [6, 7]. С учетом же остальных условий сложность представленных задач увеличивается на много порядков, что показывают вычислительные эксперименты на реальных данных.

Покажем, как можно несколько ослабить трудоемкость задач (7)–(12) и (9)–(14).

Для этого используем релаксацию по вспомогательным булевым переменным  $x_{i,j}^k$ , сняв условия целочисленности (12). Вместо них введем границы изменения непрерывных переменных:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1, \quad k = \overline{1, m}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (15)$$

Релаксации задач (7)–(12) и (9)–(14) обозначим соответственно как (7)–(11), (15) и (9)–(11), (13)–(15).

Отмечаем снижение числа булевых переменных в релаксированных задачах на величину  $mn^2$ . Таким образом, общее число булевых переменных (9) в задачах (7)–(11), (15) и (9)–(11), (13)–(15) составляет величину  $mn$  при наличии  $mn^2 + 1$  непрерывных переменных (15) и (8), против  $mn(1 + n)$  булевых переменных в задачах (7)–(12) и (9)–(14). Разница весьма существенна при применении в практических приложениях представленных задач. Поскольку перспективы разработки приемлемых по точности аппроксимационных эффективных алгоритмов для сформулированных задач весьма туманны, успешность практического применения условно экспоненциальных алгоритмов сильно зависит от фактического числа целочисленных переменных. В этом смысле релаксации (7)–(11), (15) и (9)–(11), (13)–(15) имеют существенные преимущества перед постановками (7)–(12) и (9)–(14).

Докажем эквивалентность этих постановок относительно оптимальных значений переменных  $y_i^k$ .

Рассмотрим соотношения  $x_{i,j}^k = y_i^k y_j^k$  и эквивалентные условия (11)  $0 \leq y_i^k + y_j^k - x_{i,j}^k - x_{j,i}^k \leq 1$ ,  $k = \overline{1, m}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ,  $i \neq j$ , означающие, что  $x_{i,j}^k$  истинны только тогда, когда истинны  $y_i^k$  и  $y_j^k$ . Соответственно  $y_i^k$  и  $y_j^k$  истинны одновременно только тогда, когда истинны  $x_{i,j}^k$ .

Заменяем условие целочисленности  $x_{i,j}^k$  на условие  $0 \leq x_{i,j}^k \leq 1$  и рассмотрим возможные варианты соотношений (11): если в оптимальном решении  $y_i^k = 1$  и  $y_j^k = 1$ , то соотношение  $x_{i,j}^k = y_i^k y_j^k$  выполнится только в случае  $x_{i,j}^k = x_{j,i}^k = 1$ . Если в оптимальном решении  $y_i^k = 1$  и  $y_j^k = 0$ , то соотношение  $x_{i,j}^k = y_i^k y_j^k$  выполнится только в случае  $x_{i,j}^k = x_{j,i}^k = 0$ . Совершенно аналогично для случая  $y_i^k = 0$  и  $y_j^k = 0$  то же соотношение выполнится при  $x_{i,j}^k = x_{j,i}^k = 0$ . Таким образом, решения релаксаций (7)–(11), (15) и (9)–(11), (13)–(15) совпадают с решениями задач в исходных постановках (7)–(12) и (9)–(14) соответственно.

#### 4. Алгоритмы решения

Для представленных выше вариантов NP-трудных задач кластеризации не существует теоретически эффективных алгоритмов. Однако для практических применений в достаточной степени разработаны алгоритмы, которые можно именовать как условно экспоненциальные. Это словосочетание означает, что, несмотря на недоказанность их эффективности, данные алгоритмы позволяют за разумное время находить оптимальные, либо приближенные к оптимальным решения труднорешаемых задач. Примером такого алгоритма может служить алгоритм бинарных отсечений и ветвлений (АБОВ) [9, 10]. Его программная реализация была применена для поиска решения сформулированных выше задач кластеризации (7)–(11), (15) и (9)–(11), (13)–(15). Ниже приводится содержательная интерпретация результатов обработки данных медико-психологических исследований на основе формальных постановок (7)–(11), (15) и (9)–(11), (13)–(15) и указанного программного приложения.

#### 5. Применение разработанного инструментария кластеризации для выявления послеоперационной когнитивной дисфункции

Серия вычислительных экспериментов кластеризации пациентов на основе представленных выше постановок (7)–(11), (15) и (9)–(11), (13)–(15) и соответствующих алгоритмов дискретной оптимизации [9, 10] выявила высокую эффективность данного инструментария. Задача (7)–(11), (15) с использованием минимаксного критерия и адаптированный под нее алгоритм АБОВ были применены для анализа

показателей нейрофизиологического статуса пациентов, перенесших прямую реваскуляризацию миокарда в условиях искусственного кровообращения. Нейрофизиологическое исследование проводилось за 3...5 дней до операции и через 7...10 суток после коронарного шунтирования. Подробное описание выборки пациентов и регистрации ЭЭГ и показателей когнитивного статуса представлено ранее [11, 12]. Для кластеризации на три группы были использованы суммарные (логарифмированные) значения фоновой мощности ЭЭГ при закрытых глазах в диапазонах  $\theta 1$  (4...6 Гц),  $\alpha 1$  (8...10 Гц) и  $\beta 2$  (20...30 Гц). Эти диапазоны были рассмотрены в связи с их функциональным значением для процессов внимания и памяти [13, 14] и выявленной ранее информационной ролью для предсказания когнитивного снижения в послеоперационном периоде коронарного шунтирования [12]. С учетом большого времени вычислений для анализа была взята выборка из 40 пациентов мужчин ( $56,7 \pm 5,08$  лет), имеющих показатели ЭЭГ до и после операции и исходные послеоперационные показатели когнитивного статуса: сумма баллов по краткой шкале оценки психического статуса (КШОПС) и комплексный показатель когнитивного статуса (ККС), являющийся суммарной характеристикой функций произвольного внимания, кратковременной памяти и исполнительных функций [15].

Параметры трех кластеров, полученных в ходе реализации разработанного алгоритма для показателей мощности  $\theta 1$ ,  $\alpha 1$  и  $\beta 2$  ритма до и после операции, представлены в табл. 1.

Исходя из представленных в табл. 1 результатов можно отметить, что варибельность состава кластеров составила 33,5 %; 22,5 % и 52,5 %, соответственно для  $\theta 1$ -,  $\alpha 1$ - и  $\beta 2$ -диапазонов. При этом состав пациентов из второго кластера перешел в третий по классификации послеоперационной мощности  $\alpha 1$ -биопотенциалов.

Для выяснения функционального значения выделенных кластеров было проведено сравнение значений мощности ЭЭГ в соответствующих частотных диапазонах, возраста и показателей КШОПС и ККС. Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) был выполнен для каждого из перечисленных показателей с переменной КЛАСТЕР (3)<sup>1</sup>. Достоверные эф-

<sup>1</sup>Переменная КЛАСТЕР является независимой в однофакторном дисперсионном анализе, показывая, как принадлежность к одному из трех кластеров изменяет показатели мощности  $\theta 1$ -,  $\alpha 1$ - и  $\beta 2$ -ритма.

Таблица 1

**Кластеры, сформированные на минимаксном критерии классификации показателей мощности  $\theta 1$ -,  $\alpha 1$ - и  $\beta 2$ -ритма до и после операции коронарного шунтирования**

До операции			После операции			
№ кластера	Оценка метрики	<i>n</i>	№ кластера	Оценка метрики	<i>n</i>	<i>N<sub>v</sub></i>
<b><math>\theta 1</math>-диапазон</b>						
1	45,58	15	1	56,18	17 (10)	(3)2к и (4)3к
2	46,07	14	2	41,04	13 (10)	(3)1к
3	35,51	11	3	43,21	10 (7)	(2)1к и (1)2к
<b><math>\alpha 1</math>-диапазон</b>						
1	77,05	13	1	80,88	14 (11)	(1)2к и (2)3к
2	83,89	14	2	78,90	14 (4)	(10)3к
3	74,46	13	3	73,86	12 (1)	(1)1к и (10)2к
<b><math>\beta 2</math>-диапазон</b>						
1	47,80	13	1	48,27	14 (7)	(1)2к и (6)3к
2	48,99	12	2	46,60	12 (7)	(5)3к
3	48,22	15	3	48,12	14 (5)	(6)1к и (1)2к
<p><i>Примечание:</i> <i>n</i> — число пациентов в кластере; в скобках показано число пациентов, оставшихся в этом же кластере после операции или переместившихся из других кластеров, соответственно (<i>N<sub>v</sub></i>).</p>						

факты такого анализа приведены в табл. 2, их post-hoc анализ выполняли с поправкой Бонферрони. Полученные результаты указывают на значимые различия показателей мощности  $\theta 1$ -,  $\alpha 1$ - и  $\beta 2$ -ритма между тремя кластерами как до операции (д/о), так и после нее (п/о). Эффект фактора "Возраст" был обусловлен тем, что кластер 3 характеризовался более молодым возрастом пациентов, а "ККС" — его меньшим значением в группе из кластера 2 (табл. 2).

ANOVA для переменной СТАБИЛЬНОСТЬ (2) (т. е. одну группу составили пациенты из одного и того же кластера, сформированного на основании до- и послеоперационной ЭЭГ; другую — с перемещением между кластерами), выявил достоверный эффект только для ККС и ЭЭГ  $\beta 2$ -диапазона:  $F(1,38) = 6,170$ ;  $p < 0,018$  с большими значениями ККС в группе с постоянной принадлежностью к кластерам по сравнению с переменной (0,592 и 0,473, соответственно).

Таким образом, можно заключить, что разработанный способ кластеризации перемен-

ных обладает хорошими дискриминационными возможностями, так как сформированные кластеры различаются по заданному критерию с высокой степенью достоверности.

Что касается функционального значения полученных кластеров, то вопрос этот требует дальнейшего исследования. Однако выделенное соответствие большей мощности  $\theta 1$ -ритма у более молодых лиц (см. кластер 3 для  $\theta 1$  в табл. 2) согласуется с эффектом возрастного снижения мощности низкочастотных ритмов ЭЭГ [16, 17], а меньшие значения ККС при наиболее низком уровне  $\alpha 1$  колебаний (кластер 2 для  $\alpha 1$  в табл. 2) — представлениям о сопряженной возрастной активации коры головного мозга на этих частотах и когнитивного дефицита [17–19]. Полученная в настоящем исследовании связь показателя ККС и фактора СТАБИЛЬНОСТЬ в  $\beta 2$ -диапазоне может рассматриваться как отражение гиперактивации коры компенсаторного характера у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями. Ранее показано, что сочетанное уменьшение  $\alpha$ -активности и рост мощности  $\beta$ -ритмов мо-

Таблица 2

**Результаты ANOVA для мощности  $\theta 1$ -,  $\alpha 1$ - и  $\beta 2$ -ритмов при сравнении выделенных кластеров**

Переменная	$F(2,37)$	<i>P</i>	Кластер		
			1	2	3
<b><math>\theta 1</math>-диапазон</b>					
Мощность д/о	63,477	<0,0001	0,248	0,024	0,505
Возраст	5,132	0,011	58,87	57,29	53,09*
Мощность п/о	80,86	<0,0001	0,298	0,102	0,655
<b><math>\alpha 1</math>-диапазон</b>					
Мощность д/о	102,34	<0,0001	1,452	0,293	0,920
ККС	2,69	0,08	0,573	0,455*	0,575
Мощность п/о	89,79	<0,0001	1,430	0,312	0,894
<b><math>\beta 2</math>-диапазон</b>					
Мощность д/о	54,49	<0,0001	-0,278	-0,606	-0,468
Мощность п/о	73,24	<0,0001	-0,261	-0,651	-0,442
<p><i>Примечание:</i> д/о — до операции, п/о — после нее; * — <math>p &lt; 0,01</math> по сравнению с другими кластерами; остальные различия мощности между кластерами при <math>p &lt; 0,0001</math>; курсивом выделены эффекты, характеризующие возможное функциональное значение кластеров; <math>F(2,37)</math> — значения <i>F</i>-критерия и степени свободы в выполненном дисперсионном анализе.</p>					



жет свидетельствовать о повреждении региональных нейронных взаимодействий [20]. Есть предположение, что у пациентов с низким когнитивным статусом вследствие длительно существующего состояния хронической ишемии головного мозга перестройка электрической мозговой активности связана с "замедлением" ЭЭГ, т. е. преобладанием в электрической активности медленных ритмов, а не быстрых, как у тех, у кого более сохранен когнитивный статус [21]. Однако для анализа информационного значения координации разных ритмов ЭЭГ и их локального представительства для сохранности когнитивных функций у пациентов, перенесших коронарное шунтирование, требуются дальнейшие исследования.

### Заключение

Результаты вычислительных экспериментов с кластеризацией данных нейрофизиологического тестирования с использованием трех представленных в настоящей статье формальных постановок выявили наивысшую эффективность задачи (7)—(11), (15) с использованием минимаксного критерия и адаптированного под нее алгоритма бинарных отсечений и ветвлений.

Время счета персонального компьютера до нахождения точных решений реализаций задачи кластеризации для показателей мощности ритмов ЭЭГ у 40 пациентов, при разных модификациях исходных данных и используемого критерия, находится в интервале от 15 мин до 2 ч. Приближенные решения могут быть получены за значительно более короткое время, что определяет хорошие перспективы применения инструментария с существенным увеличением размерностей реализаций задач.

### Список литературы

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Еников И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989, 608 с.
2. Кельманов А. В., Пяткин А. В. NP-Трудность некоторых евклидовых задач разбиения конечного множества точек // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018. Т. 58, № 5. С. 852—856.
3. Кельманов А. В., Пяткин А. В., Хандеев В. И. О сложности некоторых максиминных задач кластеризации // Труды института математики и механики УрО РАН. 2018. Т. 24, № 4. С. 189—198.
4. Мезенцев Ю. А., Эстрайх И. В. Задачи и алгоритмы оптимизации расписаний параллельно-последовательных систем с неопределенными маршрутами обслуживания //

Доклады академии наук высшей школы РФ. Новосибирск: Изд-во НГТУ 2016. № 3 (32) С. 83—97.

5. Mezentsev Y., Estraykh I. Problems and optimization algorithms of schedules of parallel-serial systems with undefined service routes Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V. F. Demyanov), CNSA 2017 <https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973988>.

6. Vazirani V. V. Approximation algorithms. Springer, 2001, 378 p.

7. Pinedo M. Scheduling Theory, Algorithms, and Systems. Springer, 2008. 672 p.

8. Avdeenko T. V., Mesentsev Y. A. Efficient approaches to scheduling for unrelated parallel machines with release dates // IFAC-Papers Online (IFAC Proceedings Volumes). 2016. Vol. 49, Iss. 12: 8 IFAC conference on manufacturing modelling, management and control MIM 2016, France, Troyes, 28—30 June 2016. P. 1743—1748. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631631117X>.

9. Mezentsev Y. Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems // Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V. F. Demyanov), CNSA 2017 <https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973989>.

10. Мезенцев Ю. А. Метод бинарных отсечений и ветвлений целочисленного программирования // Доклады академии наук высшей школы РФ. Новосибирск: Изд-во НГТУ 2011. № 1(16). С. 12—25.

11. Тарасова И. В., Трубникова О. А., Кухарева И. Н., Барбараш О. Л., Барбараш Л. С. Годовая динамика нейрофизиологических показателей у пациентов, перенесших коронарное шунтирование с искусственным кровообращением // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2015. № 1. С. 18—24.

12. Тарасова И. В., Трубникова О. А., Барбараш О. Л., Барбараш Л. С. Изменения электроэнцефалограммы у пациентов с ранней и стойкой послеоперационной когнитивной дисфункцией при коронарном шунтировании с искусственным кровообращением // Неврологический журнал. 2017. Т. 22, № 3. С. 136—141.

13. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis // Brain Research Reviews. 1999. Vol. 29, N. 2—3. P. 169—195.

14. Bressler S. L., Richter C. G. Interareal oscillatory synchronization in top-down neocortical processing // *Curr. Opin. Neurobiol.* 2015. Vol. 31. P. 62—66. doi:10.1016/j.conb.2014.08.010.

15. Трубникова О. А., Каган Е. С., Куприянова Т. В., Малева О. В., Аргунова Ю. А., Кухарева И. Н. Нейропсихологический статус пациентов со стабильной ишемической болезнью сердца и факторы на него влияющие // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2017. Т. 6, № 1. С. 112—121.

16. Cummins T. D., Finnigan S. Theta power is reduced in healthy cognitive aging // *Int J Psychophysiol.* 2007. Vol. 66, N. 1. P. 10—17.

17. Klass D. W., Brenner R. P. Electroencephalography of the elderly // *J Clin Neurophysiol.* 1995. Vol. 12, N. 2. P. 116—131.

18. Разумникова О. М. Закономерности старения мозга и способы активации его компенсаторных ресурсов // Успехи физиол. наук. 2015. Т. 46, № 2. С. 3—16.

19. Белоусова Л. В., Разумникова О. М., Вольф Н. В. Возрастные особенности связи интеллекта и характеристик ЭЭГ // Журн. Высш. Нервн. Деят. 2015. Т. 65, № 6. С. 699—705.

20. Zappasodi F., Olejarczyk E., Marzetti L., Assenza G., Pizzella V., Tecchio F. Fractal dimension of EEG activity senses neuronal impairment in acute stroke // *PLoS One.* 2014. 9(6): e100199. doi: 10.1371/journal.pone.0100199.

21. Тарасова И. В., Трубникова О. А., Барбараш О. Л., Барбараш Л. С. Диагностическое значение показателей электроэнцефалографии при ранней послеоперационной когнитивной дисфункции // Креативная кардиология. 2016. Т. 10, № 3. С. 220—230.

**Yu. A. Mezentsev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: mesyan@yandex.ru,  
**O. M. Razumnikova**, Doctor of Biological Sciences, Professor, e-mail: razoum@mail.ru,  
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,  
**I. V. Tarasova**, Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, e-mail: iriz78@mail.ru,  
**O. A. Trubnikova**, Doctor of Medical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: olgalet17@mail.ru,  
Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases, Kemerovo, Russia

## On some Problems of Big data Clustering by Minimax and Additive Criteria, Application in Medicine and Neurophysiology

*The NP-hard clustering problem as applied to the data of neurophysiological studies (indicators of postoperative cognitive dysfunction) is considered. Variants of the problem of clustering in the form of mixed integer programming, including the use of continuous relaxation, reducing the complexity of solutions without loss of accuracy are given. The results of computational experiments on real data using the software implementation of the algorithm of binary cuts and branch are presented. They demonstrate the high efficiency of the developed toolkit.*

**Keywords:** clustering, minimax quality criterion, additive criterion, linear relaxation, binary cutoff and branching algorithm, detection of postoperative cognitive dysfunction

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 19-29-01017.

DOI: 10.17587/it.25.602-608

### References

1. Ayzvyan S. A., Buchstaber V. M., Enikov I. S., Meshalkin L. D. Applied statistics: classification and reduction of dimension, Moscow, Finance and Statistics, 1989, 608 p. (in Russian).
2. Kelmanov A. V., Pyatkin A. V. NP-Difficulty of some Euclidean problems of partitioning a finite set of points, *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2018, vol. 58, no. 5, pp. 852–856. (in Russian).
3. Kelmanov A. V., Pyatkin A. V., Khandeev V. I. On the complexity of some maximin clustering problems, *Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 189–198 (in Russian).
4. Mezentsev Y., Estraykh I. Tasks and algorithms for optimizing the schedules of parallel-sequential systems with undefined service routes, *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016, no. 3 (32), pp. 83–97 (in Russian).
5. Mezentsev Y., Estraykh I. Problems and optimization algorithms of schedules of parallel-serial systems with undefined service routes *Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics* (Dedicated to the Memory of V. F. Demyanov), CNSA 2017, available at: <https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973988>
6. Vazirani V. V. Approximation algorithms, Springer, 2001, 378 p.
7. Pinedo M. Scheduling Theory, Algorithms, and Systems (3rd. ed.), Springer, 2008. 672 p.
8. Avdeenko T. V., Mesentsev Y. A. Efficient approaches to scheduling for unrelated parallel machines with release dates, *IFAC-Papers Online (IFAC Proceedings Volumes)*, 2016, 49 (12), 8 IFAC conference on manufacturing modelling, management and control MIM, pp. 1743–1748.
9. Mezentsev Y. Binary cut-and-branch method for solving mixed integer programming problems, *Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics* (Dedicated to the Memory of V. F. Demyanov), CNSA, 2017 <https://doi.org/10.1109/cnsa.2017.7973989>
10. Mezentsev Y. Метод бинарных отсечений и ветвлений целочисленного программирования, *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*, Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, no. 1(16), pp. 12–25 (in Russian).
11. Tarasova I. V., Trubnikova O. A., Kukhareva I. N., Barbarash O. L., Barbarash L. S. Annual dynamics of neurophysiological parameters in patients undergoing coronary artery bypass surgery with artificial circulation, *Complex problems of cardiovascular diseases*, 2015, no. 1, pp. 18–24 (in Russian).
12. Tarasova I. V., Trubnikova O. A., Barbarash O. L., Barbarash L. S. Electroencephalogram changes in patients with early and resistant postoperative cognitive dysfunction during coronary artery bypass surgery with artificial blood circulation, *Neurological Journal*, 2017, vol. 22, no. 3, pp. 136–141 (in Russian).
13. Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis, *Brain Research Reviews*, 1999, 29, pp. 169–195.
14. Bressler S. L., Richter C. G. Interareal oscillatory synchronization in top-down neocortical processing, *Curr. Opin. Neurobiol.*, 2015, vol. 31, pp. 62–66, doi:10.1016/j.conb.2014.08.010.
15. Trubnikova O. A., Kagan E. S., Kupriyanova T. V., Mal'eva O. V., Argunova Yu. A., Kukhareva I. N. Neuropsychological status of patients with stable ischemic heart disease and factors influencing it, *Complex problems of cardiovascular diseases*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 112–121 (in Russian).
16. Cummins T. D., Finnigan S. Theta power is reduced in healthy cognitive aging, *Int J Psychophysiol.*, 2007, vol. 66, no. 1, pp. 10–17.
17. Klass D. W., Brenner R. P. Electroencephalography of the elderly, *J. Clin Neurophysiol.*, 1995, vol. 12, no. 2, pp. 116–131.
18. Razumnikova O. M. Patterns of aging of the brain and how to activate its compensatory resources, *Advances physiol. Science*, 2015, vol. 46, no. 2, pp. 3–16 (in Russian).
19. Belousova L. V., Razumnikova O. M., Volf N. V. Age features of communication of intelligence and EEG characteristics, *J. Higher Nervous Activity*, 2015, vol. 65, no. 6, pp. 699–705 (in Russian).
20. Zappasodi F., Olejarczyk E., Marzetti L., Assenza G., Pizzella V., Tecchio F. Fractal dimension of EEG activity senses neuronal impairment in acute stroke, *PLoS One*, 2014, vol. 9, no. 6: e100199, doi: 10.1371/journal.pone.0100199.
21. Tarasova I. V., Trubnikova O. A., Barbarash O. L., Barbarash L. S. Diagnostic value of electroencephalography indicators for early postoperative cognitive dysfunction, *Creative Cardiology*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 220–230 (in Russian).

**К. И. Салахутдинова**, мл. науч. сотр., e-mail: kainagr@mail.ru,  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук,  
Санкт-Петербург

## Повышение точности идентификации программного обеспечения путем использования аддитивного критерия Фишберна\*

*Описан подход к повышению уровня точности идентификации исполняемых файлов ELF за счет использования аддитивного критерия Фишберна применительно к десяти ассемблерным командам, ранее выбранным в качестве признакового пространства, используемого для формирования сигнатур программ. Предлагаемое решение обеспечивает достаточный уровень идентификации программ, позволяющий проводить мероприятия по аудиту электронных носителей информации для выявления несанкционированно установленного программного обеспечения.*

**Ключевые слова:** идентификация программного обеспечения, информационная безопасность, ассемблерные команды, аддитивный критерий Фишберна

### Введение

Стремительный прогресс информационных технологий, их повсеместное внедрение во все сферы человеческой деятельности приводит к тому, что современная организация бизнес-процессов становится полностью зависима от надлежащего функционирования информационных систем. Область, отвечающая за безопасность информации, обрабатываемой в таких системах, и ее ресурсов, является областью информационной безопасности (ИБ).

Основным документом, описывающим порядок и принципы обеспечения информационной безопасности в организации, является политика ИБ, определение которой вытекает из двух понятий ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002—2012, а именно информационной безопасности ("Защита конфиденциальности, целостности и доступности информации; кроме того, сюда могут быть отнесены и другие свойства, например, аутентичность, подотчетность, неотказуемость и надежность" [1]) и политики ("Общее намерение и направление, официаль-

но выраженное руководством"). Таким образом, политика информационной безопасности является совокупностью документированных управленческих решений, направленных на защиту необходимых свойств информации и ассоциированных с ней ресурсов.

При взаимодействии пользователя с информационной системой организации, ее ресурсами и обрабатываемой внутри информацией наступает потребность в регулировании такого взаимодействия, реализуемом за счет политики ИБ, мер и средств по обеспечению безопасности. В настоящей работе идентификация программного обеспечения (ПО) рассматривается как техническая мера обеспечения безопасности, подкрепляющая собой организационную меру, часто выраженную в положении установленной политики безопасности организации о запрете на несанкционированное установление ПО.

Под идентификацией ПО понимается процедура построения некоторой информативной модели (модель в виде математического кортежа) программы (сигнатуры) по выбранному признаковому пространству (ассемблерным командам), характеристики которой позволяли бы с заданной точностью найти соответствие между рассматриваемой (идентифицируемой) программой и предопределенной ранее на этапе формирования архива сигнатур конкретной программой. Другими словами, идентифици-

\* Публикация выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН по приоритетным направлениям, определяемым президиумом РАН, № 7 "Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники".

ровать исполняемый файл означает распознать его как ту или иную программу. Под программным обеспечением рассматриваются исполнимые и компоуемые 32- и 64-разрядные файлы формата ELF в операционной системе Linux для архитектур процессоров x86 и x86-64.

Ранее автором были опубликованы результаты формирования сигнатур программ и методы их сравнения различными способами [2—4]. В данной работе проводится постобработка полученных ранее результатов идентификации с помощью аддитивного критерия Фишберна, коэффициенты которого рассчитываются для десяти ассемблерных команд — признакового пространства, используемого для формирования сигнатур.

### Оценка точности идентификации ПО

В качестве точности идентификации *Accuracy* выступает отношение числа верно идентифицированных исполняемых файлов *TP* (true positive results) к общему объему исполняемых файлов, участвовавших в идентификации *J* (числу файлов тестовой выборки). Показатель *Accuracy* считается по следующей формуле и представляется в процентах:

$$Accuracy = \frac{TP}{J} \cdot 100 \%$$

Точность классификатора также можно рассчитать с помощью *F-measure*, которая представляет собой среднее гармоничное между точностью (*precision*) и полнотой (*recall*). Так, для мультиклассификатора необходимо провести расчет *F-measure* по каждому объекту (программы тестовой выборки) по формуле

$$F\text{-measure}(P_{\text{тест},i}) = \frac{1}{\alpha \cdot \frac{1}{\text{precision}} + (1 - \alpha) \cdot \frac{1}{\text{recall}}},$$

где коэффициент  $\alpha$  позволяет взвешивать соотношение точности (*precision*) и полноты (*recall*) и принимает значение от нуля до единицы включительно.

Бикубическая мера для всех объектов рассчитывается как среднее значение *F-measure* для каждого из *i* объектов:

$$F\text{-measure} = \frac{\sum_i F\text{-measure}(P_{\text{тест},i})}{i}.$$

Разнообразие в подходе оценки точности вызвано необходимостью сравнения получае-

мых результатов точности с существующими методами идентификации других исследователей, которые используют различные меры оценки классификаторов.

### Использование аддитивного критерия Фишберна

Задача оценки эффективности принимаемых решений не одним, а несколькими критериями, является центральной проблемой теории принятия решений. В работе [5] даются строгие определения равенства и неравенства критериев по важности. Классификация методов определения коэффициентов важности критериев представлена в работе [6] и выделяются две группы методов: первые определяют коэффициенты важности критериев, использование которых возможно в обобщенных свертках; вторые определяют весовые коэффициенты, использование которых в обобщенных свертках не рекомендуется.

Аддитивный критерий Фишберна [7, 8] как раз относится к первой группе методов, в частности, к методам аддитивной свертки. Данный критерий обладает рядом достоинств, например, отсутствует необходимость в опросе мнений экспертов, нет ограничений на условия реализации, имеется простота расчетов и т. д.

Методы аддитивной свертки можно использовать, если функция полезности  $\varphi(f(x))$  представима в аддитивной форме:

$$\varphi(f_1(x), \dots, f_n(x)) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi_i(f_i(x)),$$

где  $\lambda$  — коэффициенты относительной важности критериев, которые определяются по формуле

$$\lambda_i = \frac{2(n-i+1)}{n(n+1)}, \quad i = 1, \dots, n$$

при упорядоченных критериях  $f_1(x) \geq \dots \geq f_n(x)$ .

При этом если значения нескольких критериев равны  $f_i(x) = f_{i+1}(x) = \dots = f_{i+m}(x)$ , тогда и коэффициенты относительной важности для них одинаковы и равны среднему значению

$$\frac{1}{\sum_j} \cdot \sum_{j=1}^{i+m} \lambda_j,$$

как если бы они были рассчитаны для не равных критериев с сохранением их порядка  $f_i(x) > f_{i+1}(x) > \dots > f_{i+m}(x)$ .

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что наиболее точные результаты идентификации были по-

Упорядоченные ассемблерные команды по достигаемой точности идентификации

XGBoost									
<i>jmp</i>	<i>mov</i>	<i>call</i>	<i>add</i>	<i>and</i>	<i>je</i>	<i>lea</i>	<i>push</i>	<i>pop</i>	<i>cmp</i>
118	116	115	113	113	112	112	110	109	104

Таблица 2

Коэффициенты относительной важности критериев (ассемблерных команд)

<i>jmp</i>	<i>mov</i>	<i>call</i>	<i>add</i>	<i>and</i>
$\lambda_1 = \frac{2 \cdot (10 - 1 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_2 = \frac{2 \cdot (10 - 2 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_3 = \frac{2 \cdot (10 - 3 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_4 = \frac{2 \cdot (10 - 4 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_5 = \frac{2 \cdot (10 - 5 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$
$\lambda_1 = 0,182$	$\lambda_2 = 0,164$	$\lambda_3 = 0,145$	$\lambda_4 = 0,118$	$\lambda_5 = 0,118$
<i>je</i>	<i>lea</i>	<i>push</i>	<i>pop</i>	<i>cmp</i>
$\lambda_6 = \frac{2 \cdot (10 - 6 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_7 = \frac{2 \cdot (10 - 7 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_8 = \frac{2 \cdot (10 - 8 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_9 = \frac{2 \cdot (10 - 9 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$	$\lambda_{10} = \frac{2 \cdot (10 - 10 + 1)}{10 \cdot (10 + 1)}$
$\lambda_6 = 0,082$	$\lambda_7 = 0,082$	$\lambda_8 = 0,055$	$\lambda_9 = 0,036$	$\lambda_{10} = 0,018$

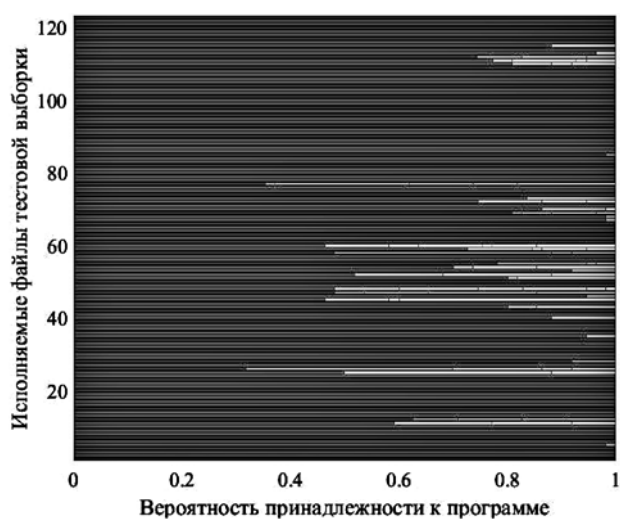
лучены при построении сигнатур, основанных на частоте одной ассемблерной команды на равных интервалах разбиения, с использованием метода их сравнения на основе градиентного бустинга деревьев решений в реализации библиотеки XGBoost. В табл. 1 представлены упорядоченные результаты по десяти ассемблерным командам, так наибольшая точность идентификации исполняемых файлов достигается при использовании ассемблерной команды *jmp*, а наихудшая — при использовании *cmp*.

Проведем расчет коэффициентов относительной важности критериев (ассемблерных команд) для нашей задачи (табл. 2).

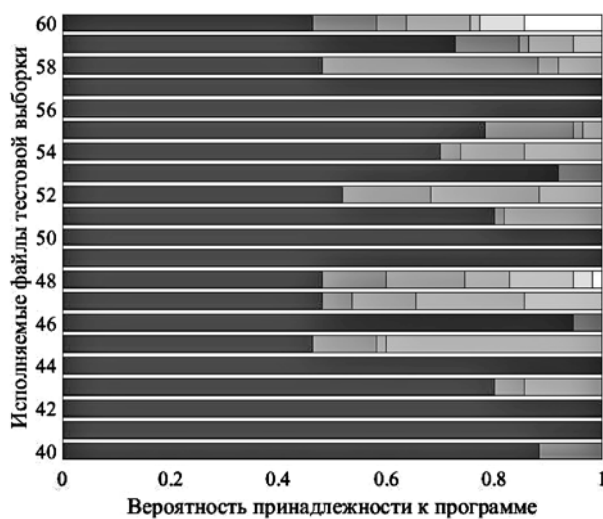
Таким образом, мы получаем аддитивную функцию вида

$$\begin{aligned} \varphi(jmp, \dots, cmp) = & 0,182 \cdot jmp + 0,164 \cdot mov + \\ & + 0,145 \cdot call + 0,118 \cdot add + 0,118 \cdot and + \\ & + 0,082 \cdot je + 0,082 \cdot lea + 0,055 \cdot push + \\ & + 0,036 \cdot pop + 0,018 \cdot cmp, \end{aligned}$$

применив которую к результатам классификации XGBoost, получим вероятности принадлежности исполняемых файлов тестовой выборки к определенным программам на основании совокупности десяти ассемблерных команд и коэффициентов их важности. На рисунке ото-



а)



б)

Результаты постобработки результатов классификации:

а — для всех файлов; б — для 20 файлов для ближайшего рассмотрения

Показатель *Accuracy* по каждой ассемблерной команде, в процентах

Ассемблерные команды	Статистические критерии, $p = 0,05$			Машинное обучение			
	однородности $\chi^2$ [2]	согласия Колмогорова [2]	однородности $\chi^2$ [3]	Нейронная сеть MLP [9]	Градиентный бустинг деревьев решений		
					LightGBM [10]	CatBoost [4]	XGBoost [10]
<i>add</i>	79,55	—	40,65	76,42	82,92	85,37	92,68
<i>and</i>	—	—	60,16	69,11	78,87	86,18	91,87
<i>call</i>	—	—	65,85	74,80	81,3	84,55	93,50
<i>cmp</i>	—	50,41	70,73	82,11	78,04	85,37	84,55
<i>je</i>	—	—	69,11	78,05	86,99	89,43	91,05
<i>jmp</i>	—	—	65,85	73,98	83,74	83,74	95,93
<i>lea</i>	—	—	78,05	56,10	73,99	76,42	91,06
<i>mov</i>	—	—	47,97	74,80	73,99	85,37	94,30
<i>pop</i>	—	—	60,16	69,11	78,86	83,74	88,60
<i>push</i>	—	—	56,91	53,66	74,79	82,93	89,40
<i>Фишберн</i>	—	—	—	84,93	87,81	91,87	<b>99,19</b>

бражены результаты идентификации с постобработкой результатов классификации XGBoost по всем 123 исполняемым файлам тестовой выборки, отмеченным на оси ординат, по оси абсцисс отмечается вероятность принадлежности исполняемого файла к классу (программе).

Автором, для более понятной визуализации, специально была выбрана линейчатая диаграмма с накоплением, где первым прямоугольником отображается вероятность принадлежности исследуемого файла к истинной программе (которой он и является). Далее следуют вероятности принадлежности к другим, не истинным, программам.

Оценка точности по различным ассемблерным командам для результатов идентификации ПО, полученных автором ранее, приведена в табл. 3.

Так, после применения подхода постобработки результатов, на основе аддитивного

критерия Фишберна и сочетания десяти ассемблерных команд, точность идентификации исполняемых файлов решений в реализации XGBoost возрастает на 3,26 % и достигает показателя 99,19 % (только один файл из 123 был неправильно идентифицирован).

### Закключение

Оценка точности идентификации на основе *Accuracy* и *F-measure* позволяет сделать вывод о том, что разработанный подход к постобработке результатов идентификации ПО с помощью аддитивного критерия Фишберна позволяет получить более высокий показатель точности с использованием всех рассмотренных методов классификации в сравнении с существующими методами идентификации программ, описанными в рассмотренных работах

Таблица 4

Точность идентификации ПО с использованием разработанной методики и различных современных методов

Признаковое пространство и метод идентификации	Число классов	Оценка качества метода	
		Точность ( <i>Accuracy</i> ), %	Бикубическая мера качества кластеризации
Печатаемые строки + Naive Bayes [11]	Бинарная классификация	97,11	—
Последовательность частоты встречаемости очередности ( $n = 2$ ) ассемблерных команд + SVM: normalised polynomial [12]		95,9	—
Вектора для блоков постоянного размера побайтового кода программы + Редакционное расстояние [13]	Мульти-классификация	—	0,69
Последовательность частоты встречаемости одной ассемблерной команды на равных интервалах + XGBoost [10]		95,93	0,96
Последовательность частоты встречаемости одной ассемблерной команды на равных интервалах + XGBoost + Фишберн		<b>99,19</b>	<b>0,99</b>

отечественных и зарубежных авторов. Разработанная автором совокупность методов по формированию и сравнению сигнатур, а также постобработки результатов не только позволяет решить задачу распознавания ПО, но и превосходит другие наиболее результативные подходы, приведенные в табл. 4.

Идентификация ПО может быть реализована в программном комплексе и может как использоваться при периодически проводимых мероприятиях, так и быть установлена на компьютере пользователя для проведения идентификации всего устанавливаемого ПО в автоматическом режиме.

Совокупность разработанных методов позволяет проводить идентификацию непосредственно исполняемого файла, а не его метаданных, записанных в конфигурационных файлах, и, таким образом, может быть использована в компьютерной криминалистике специальными службами.

#### Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002—2012 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил менеджмента информационной безопасности. М.: Стандартинформ, 2012.
2. Krivtsova I. E., Lebedev I. S., Salakhutdinova K. I. Identification of executable files on the basis of statistical criteria

// Conference of Open Innovation Association, FRUCT. 2017. Т. 2017-April. P. 202—208.

3. Салахутдинова К. И., Лебедев И. С., Кривцова И. Е., Сухопаров М. Е. Исследование влияния выбора признака и коэффициента (ratio) при формировании сигнатуры в задаче по идентификации программ // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2018. № 1. С. 136—141.
4. Салахутдинова К. И., Лебедев И. С., Кривцова И. Е. Алгоритм градиентного бустинга деревьев решений в задаче идентификации программного обеспечения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 6.
5. Подиновский В. В. Аксиоматическое решение проблемы оценки важности критериев в многокритериальных задачах // Современное состояние теории исследования операций. 1979. С. 117—149.
6. Анохин А. М., Глогов В. А., Павельев В. В., Черкашин А. М. Методы определения коэффициентов важности критериев // Автоматика и телемеханика. 1997. № 8. С. 3—35.
7. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. 1978. 352 с.
8. Фишберн П. Методы оценки аддитивных ценностей // Статистическое измерение качественных характеристик. 1972. С. 8—34.
9. Рудина Т. Д. Разработка способа идентификации elf-файлов на основе нейронной сети. 2018. 52 с.
10. Салахутдинова К. И., Малков В. В., Кривцова И. Е. Сравнительный анализ подходов к идентификации программного обеспечения // Безопасность информационных технологий. 2019. Т. 26, № 2. С. 58—66.
11. Schultz M. G., Eskin E., Zadok F., Stolfo S. J. Data mining methods for detection of new malicious executables // Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. Los Alamitos, CA, 2001. P. 38—49.
12. Santos I., Brezo F., Ugarte-Pedrero X., Bringas P. G. Opcode sequences as representation of executables for data-mining-based unknown malware detection // Inf. Sci. (Ny). 2013. Vol. 231. P. 64—82.
13. Антонов А. Е., Федулов А. С. Идентификация типа файла на основе структурного анализа // Прикладная информатика. 2013. Т. 2, № 44. С. 68—77.

**K. I. Salakhutdinova**, Junior Researcher, e-mail: kainagr@mail.ru,  
St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

## The Improving of Program Identification Accuracy by Using the Additive Fisher Criterion

*In this study, the information security field related to the management of installed software by automated system users is investigated.*

*An approach to increase the accuracy level of ELF file identification by using the Fishburn additive criterion is described. The criterion is applied to the executable file signatures, the formation principle of which was described in previous works. Signatures are built on the frequency occurrence for each of the ten selected assembly commands. The results of the performed executable files identification outcome post-processing are presented for all test sample files signatures compared with different methods, as well Accuracy increased and achieved to 99.19 %. A comparison with local and foreign studies is presented. Individually, it is worth to be noticed that the software identification is considered by the author as the identification of any common non-malicious programs, the prohibition on the use of which is established by the rules of the organization.*

*The proposed solution provides a sufficient level of program identification, allowing conducting the data storage media audit activities with purpose to identify unauthorized installed software. It is proposed to use this approach in conjunction with the previously developed methods of signatures formation and their comparison by information security specialists in organizations, as well as special services in computer forensics.*

**Keywords:** software identification, information security, assembly commands, Fishburn additive criterion

DOI: 10.17587/it.25.609-614

**Acknowledgment:** The publication was made under RAS fundamental research program in priority areas determined by the RAS presidium No. 7 "New developments in prospective energy areas, mechanics and robotics".

## References

1. **GOST R ISO/MEK 27002—2012** Information technology. Security techniques. Code of practice for information security management, Moscow, Standartinform, 2012 (in Russian)
2. **Krivtsova I. E., Lebedev I. S., Salakhutdinova K. I.** Identification of executable files on the basis of statistical criteria, *Conference of Open Innovation Association, FRUCT*, 2017, vol. 2017-April, pp. 202—208.
3. **Salakhutdinova K. I., Lebedev I. S., Krivtsova I. E., Sukhoparov M. E.** Studying the Effect of Selection of the Sign and Ratio in the Formation of a Signature in a Program Identification Problem, *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy*, 2018, no. 1, pp. 136—141 (in Russian).
4. **Salakhutdinova K. I., Lebedev I. S., Krivtsova I. E.** The algorithm is gradient boosting of decision trees in problem of software identification, *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1016—1022 (in Russian).
5. **Podinovskiy V. V.** Axiomatic solution of the evaluation problem of importance criteria in multi-criteria problems, *Sovremennoe sostoyaniye teorii issledovaniya operatsiy*, 1979, pp. 117—149 (in Russian).
6. **Anokhin A. M., Glotov V. A., Pavel'ev V. V., Cherka-shin A. M.** Coefficients determining methods of the importance criteria, *Avtomat. i telemekh.*, 1997, no. 8, pp. 3—35 (in Russian).
7. **Fishbern P.** Theory of usefulness for decision-making, 1978, 352 p.
8. **Fishbern P.** Methods of evaluation of additive values, *Statisticheskoe izmerenie kachestvennykh kharakteristik*, 1972, pp. 8—34 (in Russian).
9. **Rudina T. D.** Development of a method for identifying elf files based on neural network, 2018, 52 p. (in Russian).
10. **Salakhutdinova K. I., Malkov V. V., Krivtsova I. E.** A comparative analysis of software identifying approaches, *IT Security*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 58—66 (in Russian).
11. **Schultz M. G., Eskin E., Zadok F., Stolfo S. J.** Data mining methods for detection of new malicious executables, *Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy*, Los Alamitos, CA, 2001, pp. 38—49.
12. **Santos I., Brezo F., Ugarte-Pedrero, X., Bringas P. G.** Opcode sequences as representation of executables for data-mining-based unknown malware detection, *Inf. Sci. (Ny)*, 2013, vol. 231, pp. 64—82.
13. **Antonov A. E., Fedulov A. S.** File type identification based on structural analysis, *Prikladnaya informatika*, 2013, vol. 2, no. 44, pp. 68—77 (in Russian).



XV НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
SECR 2019 «РАЗРАБОТКА ПО»

## ОТКРЫТ ПРИЕМ ДОКЛАДОВ

Главная тема - разработка  
программного обеспечения

От технологий программирования до  
образования и ведения бизнеса в ИТ

Принимаются заявки на доклады,  
мастер-классы, научные статьи с  
презентацией.

Срок подачи: 20 августа 2019

14-15 ноября, Санкт-Петербург

Преимущества для спикеров:

- Бесплатное участие
- Премия за лучшую исследовательскую работу
- Планируется публикация научных статей в электронной библиотеке ACM

[www.secrus.org](http://www.secrus.org) [contact@secrus.org](mailto:contact@secrus.org)



**С. М. Авдошин**, канд. техн. наук, проф., руководитель департамента программной инженерии факультета компьютерных наук НИУ ВШЭ, e-mail: savdoshin@hse.ru,

**Д. Д. Цветков**, аспирант, e-mail: dtsvetkov@hse.ru,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ)

### Методика проведения ICO

*Первичное размещение токенов (ICO) — новый метод привлечения средств IT-проектами, ставший особенно популярным в 2017—2018 гг. Несмотря на снижение числа проектов к 2019 г., интерес к методу ICO все еще высок.*

*Поскольку в настоящий момент методологические принципы проведения первичного размещения токенов все еще недостаточно представлены в научной литературе, целью настоящей статьи является представление общей методики проведения первичного размещения токенов в виде подробного описания ее ключевых этапов.*

*Для достижения цели в процессе подготовки статьи, в первую очередь, был проведен анализ опубликованных научных работ в области исследования ICO. Затем были проанализированы блокчейн-проекты, проводившие ICO в период с января 2013 по март 2019 г., — как успешные и качественные, так и провальные. Среди проанализированных такие проекты, как: Mastercoin, Ethereum, Waves, NEO, Nem, EOS, Stratis, Golos, Gnosis, Tron, KICKICO, Enigma, BitTorrent, The Dao, Tezos, CoinDash, OneCoin, Tithecoin, Nodio, Silber Pfeil, Tingo и др.*

*Результатом анализа стала эта статья, где на основе критериев успешности ICO, подтвержденных эмпирическими исследованиями, и реального опыта проанализированных проектов представлена последовательность шагов и действий, составляющих основу любой ICO-кампании. Также даны конкретные практические рекомендации, предупреждающие возможные ошибки на каждом этапе проведения первичного размещения токенов. Полученные результаты заполняют пробел в теоретических исследованиях методологии ICO, а также могут быть полезны при организации ICO в реалиях рынка 2019 г.*

**Ключевые слова:** ICO, краудфандинг, токен, койн, white paper, криптовалюта, блокчейн, децентрализация

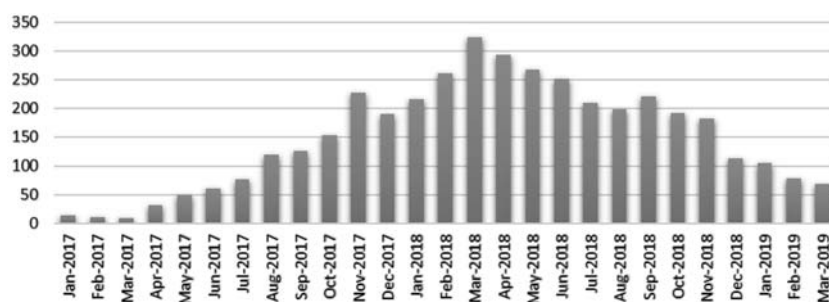
#### Введение

Под токеном в данной статье понимается единица учета, предназначенная для представления цифрового баланса в некотором активе. Единица учета, именуемая токен, является цифровым активом, криптовалютой, которая применяется для привлечения инвесторов.

ICO (Initial Coin Offering) — первичное размещение токенов — является аналогом классического IPO (первичного размещения акций), но, в отличие от последнего, проводится с помощью токенов.

Первым ICO-проектом стал Mastercoin, появившийся в 2013 г. Самый известный — Ethereum — платформа Виталика Бутерина для разработки децентрализованных приложений на базе "умных контрактов".

В начале 2017 г. на рынке криптовалют начался настоящий "бум" ICO, который, достигнув пика весной 2018 г., пошел на спад. Это хорошо проиллюстрировано на графике (см. рисунок), составленном по данным статистики "Cryptocurrency ICO Stats" портала мониторинга ICO Coinschedule [1] и данным отчетов "ICO Market Reports" рейтинговой платформы ICObench [2].



Динамика числа новых ICO-проектов с января 2017 по март 2019 г.

За 2017 г. блокчейн-стартапы, по разным оценкам, с помощью первичного размещения токенов смогли привлечь около 6 млрд долл. [3, 4], а по итогам 2018 г. общая сумма сборов достигла 30 млрд долл. (с учетом крупнейших частных продаж Telegram и FileCoin, а также государственной венесуэльской Elpetro) [5, 6].

Интерес к ICO обусловлен множеством его преимуществ: высокая скорость привлечения средств; вхождение в проект осуществляется не через долю в компании, а через токен — носитель ценности разрабатываемого продукта; отсутствие зависимости от посредников в виде краудфандинговых платформ и сторонних поставщиков услуг в виде платежных систем; нет необходимости в проведении сложных юридических процедур, привычных для рынка IPO.

Поскольку явление ICO существует только в онлайн-формате, и вся информация, связанная с этим, публикуется преимущественно в сети, основным источником информации об ICO в этом исследовании является интернет.

Исходя из анализа профильных форумов, блогов и социальных сетей можно отметить, что настроения и тактика участников рынка ICO конца 2018—начала 2019 г. изменились: от поверхностного анализа проектов и бездумного финансирования ради быстрой сверхприбыли к глубокому, пристальному изучению каждой детали. Эти настроения и повлияли на снижение числа ICO к 2019 г. Такие пункты, как отсутствие анализа рынка, конкурентов и целевой аудитории, неполнота бизнес-плана, "слабые" идея, техническая часть и модель распределения токенов перестали "прощаться". Появилось больше "каверзных" вопросов, пристальнее стали проверяться навыки и компетенции команды, участники ICO больше не доверяют красивой упаковке. Все это требует от команд проектов, выходящих на ICO, соответствия предъявляемым требованиям к качеству.

Кроме того, анализ вопросов пользователей на тематических форумах и блогах, посвященных ICO, показал, что вопросы организации и проведения первичного размещения токенов не теряют актуальности.

Структура этой работы организована следующим образом. В разделе 1 представлен анализ научной литературы из электронных баз данных (Scopus, Web of Science, Science Direct), на которую опиралось это исследование. Раздел 2 описывает методы анализа ICO-проектов в этом исследовании. В разделе 3 предлагается поэтапная методика проведения ICO с практическими рекомендациями по каждому этапу. Раздел 4 подводит итоги исследования.

## 1. Обзор литературы

W. Kaal [7] одним из первых анализирует явление ICO. Он выделяет ключевые элементы дорожной карты ICO-проектов, а также проводит анализ рыночной среды. Также W. Kaal подробно показывает, насколько сильное влияние оказало явление ICO на мировую финансовую систему и классические венчурные инвестиции. Кроме того, в его работе приводятся основные факторы риска ICO-проектов и анализируются плохие практики ICO 2016—2017 гг. В исследовании M. Chanson и др. [8] описываются составляющие ICO в первом приближении. Авторы показывают различие всех ICO-проектов и отмечают, что нужны дополнительные исследования для поиска объединяющих их признаков. F. Hartmann и др. [9] анализируют специализированные сайты по оценке рейтинга ICO и делают вывод о различности применяющихся подходов к оценке ICO. В статье G. Fridgen и др. [10] представлена общая классификация эмпирически подтвержденных параметров планирования ICO.

Работа G. Fenu и др. [11] охватывает 1388 ICO-проектов. Исследователи оценивали их качество, методологию управления разработкой программного обеспечения, а также пытались выявить факторы, оказывающие влияние на успех ICO. Похожий анализ был проведен S. Adhami и др. [12]. Согласно данным, полученным в этих работах, вероятность успеха ICO не зависит от наличия white paper, но сильно зависит от высокого качества услуг, предоставляемых будущим инвесторам, наличия минимального жизнеспособного продукта (MVP) и его открытого исходного кода. Помимо этого, рейтинги, полученные на веб-сайте icobench.com, страна юрисдикции, состав команды и платформа также влияют на успех ICO. Что касается условий продажи токенов и маркетинга, S. Adhami отмечает, что предпродажные бонусы оказывают незначительное влияние на успех кампании. В то же время сам этап предпродажи имеет большое значение и положительно коррелирует с успехом первичного размещения токенов. Основной проблемой ICO, по мнению исследователей, является неспособность потенциальных инвесторов отличить мошеннические ICO.

S. Lahajnaг и др. [13] обращают внимание на то, что несмотря на наличие большого числа методик оценки процесса ICO все еще нет стандартизированного набора критериев, которые послужили бы основой для заслужива-

ющих доверия моделей оценки. В связи с этим они выделили наиболее часто используемые критерии оценки ICO и построили на их основе иерархическую модель, с помощью которой проанализировали несколько проектов.

Возможности ICO как инструмента по сбору средств без посредников для финансирования технологических стартапов были проанализированы в работе S. Ibba и др. [14]. В статье разбираются особенности проектов, проводивших ICO по методологии Lean Startup. В другом исследовании S. Ibba [15] анализируются ICO, ведущие разработку продукта с использованием Agile-подхода.

I. Barsan [16] уделил особое внимание аспекту регулирования ICO. Он подчеркивает, что на текущий момент регулирующие органы имеют все инструменты для применения существующего законодательства к криптовалютам и ICO. Кроме того, в его работе дана юридическая классификация ICO, которая отличает обычные токены от токенов-ценных бумаг. I. Chiu и E. Greene рассуждают [17] о важности токенизации классических активов и считают, что для сферы ICO неприменимо существующее законодательство, несмотря на то что многие токены попадают под определение "ценная бумага". По их мнению, необходимы дальнейшие исследования в целях разработки подходящего регулирования, контуры которой I. Chiu и E. Greene попытались обрисовать в своем исследовании. В большом обзоре, посвященном юридическим вопросам ICO, N. Essaghoonian [18] останавливается на анализе текущей ситуации с регулированием ICO и отмечает, как и I. Chiu, что некоторые токены являются ценными бумагами с точки зрения классического законодательства. Вместе с тем N. Essaghoonian считает, что "втискивание" ICO в существующие правила может "убить" отрасль, и предлагает, на его взгляд, более эффективную и привлекательную модель регулирования, которая соответствовала бы инновационным особенностям ICO и в то же время защищала бы инвесторов от мошенничества. W. Huang и др. [19] отмечают, что развитость финансовой системы страны, гибкое регулирование цифровой экономики и лояльность к ICO местного законодательства положительно влияют на развитие ICO-кампаний. Кроме того, по мнению исследователей, важна четкая нормативная база для первичных предложений токенов. Эти выводы подтверждаются их статистическим исследованием, согласно которому странами, где регистрировалось наи-

большее число ICO, являются США, Сингапур, Швейцария, Канада. В то же время они отмечают, что налоговые режимы страны не играют существенную роль в процессе ICO. В работе J. Debler [20] анализируются подходы SEC (Федеральной комиссии по ценным бумагам США) к определению токенов как финансовых инструментов. D. Demidenko и др. [21] указывают на отсутствие четких правил учета средств ICO в финансовой отчетности компании. S. Emtseva и др. [22] описывают подходы к регулированию ICO в различных странах.

E. De George и др. [23] обращают особое внимание на важность открытости и качества информации при проведении ICO. Кроме того, исследователи выявили, что главными каналами распространения информации на рынке ICO являются социальные сети и мессенджеры. В работе M. Chanson и др. [24] анализируется влияние активности стартапа в социальных сетях, на специализированных форумах и блогах на процесс ICO и итоговые финансовые показатели проекта после ICO. Эмпирические результаты доказали существенное влияние указанной активности. Отмечается, что особое влияние оказывают социальные сети, а наименьшее влияние оказывают публикуемые криптоновости об ICO на тематических новостных порталах.

A. Ivashchenko и др. [25] провели обзор лучших практик проведения ICO в Европе. Кроме того, авторы кратко выделили несколько важных стадий проведения ICO и их основные риски.

M. Anson [26] акцентирует внимание на основных рисках ICO: классический взлом (пример The DAO); отсутствие у выпускаемых токенов места в структуре капитала и денежных потоков компании, из чего следует, что держатели таких токенов не имеют права предъявлять претензии к компании или ее продуктам; риск нарушения законодательства о ценных бумагах и последующие судебные разбирательства (пример Tezos); сильная волатильность и высокие риски на рынке криптовалют в целом. M. Anson считает, что многие токены могут потерять свою ценность, поскольку их число увеличивается без противовесной "фискальной политики" со стороны большинства эмитентов. Кроме того, по мнению M. Anson, именно спекуляция, а не фундаментальная ценность удерживает на плаву большинство токенов.

M. Yadav [27] выделил важные для ICO-инвестора сигналы: отношение правительства к инвестированию в технологические стартапы, история компании, ликвидность выпущенных токенов и модель их распространения,

обратная связь криптосообщества, бонусы для инвесторов, наличие платной рекламы, качество white paper. Его выводы подкреплены интервью с экспертами криптосферы.

Публикация P. Momtaz [28] дает общее представление о процессе ICO. В ней анализируются жизненный цикл криптовалют и факторы, определяющие успешность продажи токенов.

Проведенный анализ литературы показал, что несмотря на новизну темы ICO уже имеется достаточное число работ по исследованию этого явления. Тем не менее, статей, затрагивающих вопросы общей методологии и методологии проведения ICO, обнаружить не удалось.

## 2. Методы анализа ICO-проектов

Для анализа были выбраны блокчейн-проекты, проводившие ICO в период с января 2013 по март 2019 г. Проекты разделены на две категории: успешные и провальные. Успешными признавались проекты, достигшие минимального порога собранных средств, но не менее 100 тыс. долл. США. К неуспешным относятся проекты с резко обвалившейся капитализацией токена, не собравшие средств, разорившиеся либо попавшие в громкие скандалы. Были подробно проанализированы ICO, проведенные с января 2013 по март 2019 г. Среди них: Mastercoin, Ethereum, Waves, NEO, Nem, EOS, Stratis, Golos, Gnosis, Tron, KICKICO, Enigma, BitTorrent, The Dao, Tezos, CoinDash, OneCoin, Tithecoin, Nodio, Silber Pfeil, Tingo и др.

Для каждого проекта подробно рассматривались следующие аспекты: ретроспектива, сайт, описание на тематических форумах, white paper, план развития экосистемы (дорожная карта), состав команды и их бэкграунд, модель распределения токенов, бизнес-модель компании, платформа, рейтинг безопасности продукта, наличие и доступность технической документации, юридические аспекты, рыночная капитализация, отрасль, рыночная ниша, конкуренты и характеристики рынка, отзывы о проекте, а также отчеты и сводки процесса подготовки и проведения ICO, опубликованные в блогах и чатах. Выбор этих критериев для анализа обусловлен их значимостью и наиболее частым использованием в других исследованиях [7, 10–14, 19, 23, 24, 28].

Также были изучены отчеты и рейтинги на сайтах ведущих поставщиков информации о рынке криптовалют и сфере ICO (ICObench, ICORating, CoinSchedule, CoinMarketCap,

Smith + Crown). Кроме того, анализировались новости в тематических СМИ (CCN, CoinTelegraph, CoinDesk, ForkLog, DeCenter), активность проектов и пользователей на тематических форумах (BitcoinTalk, Bits-forum), блогах (Medium, Golos.io), в социальных сетях и на каналах в мессенджерах (Facebook, Twitter, Telegram). Также были изучены возможности ICO-платформ (Ethereum, Waves, NEM, Nxt, BitShares, EOS) и их техническая документация.

## 3. Результат

На основе проведенного исследования далее предлагается общая методика проведения первичного размещения токенов с подробными рекомендациями. Она является последовательностью этапов, составляющих основу любой ICO-кампании.

### 3.1. Этап формирования идеи и анализа рынка

Идея — самое главное в проекте, его "фундамент". Она должна быть полностью продумана и четко сформулирована. К 2019 г. технологию блокчейн попытались использовать практически во всех областях. Но далеко не все из идей и концепций имели успех. Анализируя идеи самых успешных ICO-проектов, можно условно разделить их на две группы: в первом случае предлагались инновации, позволяющие создавать собственные децентрализованные приложения, а также ускоряющие операции и снижающие транзакционные комиссии в блокчейн-сетях; во втором — предлагался продукт для эффективного решения конкретных проблем каких-либо классических бизнес-процессов или оптимизирующий их с помощью внедрения блокчейн.

Поскольку в ICO участвует множество людей, недостаточно просто придумать что-то интересное и инновационное, необходимо сформулировать и подать идею так, чтобы она была максимально проста и наглядна для широкого круга будущих участников.

Немаловажным является понимание самой сути своего проекта: каким образом будут использоваться токены, и есть ли принципиальная необходимость в проведении ICO, т. е. имеет ли смысл решать выбранную проблему с помощью внедрения Блокчейн. Обычно токены упрощают и ускоряют процессы, связанные с совершением платежей, но поскольку их внедрение является довольно сложным про-

цессом и сопряжено с множеством рисков, не следует без необходимости переносить свои бизнес-процессы на Блокчейн. Важно проработать роли токена так, чтобы он был неотъемлемой составляющей будущего продукта.

В процессе поиска и формирования идеи не следует также забывать и об уже существующем опыте. Необходимо тщательно провести конкурентный анализ, поскольку высока вероятность того, что на рынке уже существует продукт со схожей концепцией.

Успех оригинальных ICO, таких как Ethereum, Golos, TRON и др., показывает, что ценится по-настоящему оригинальная идея, нечто новое, а не простой перенос классических бизнес-процессов на Блокчейн.

### **3.2. Этап подбора состава команды**

Для достижения успеха в проведении ICO необходима слаженная работа команды профессионалов из различных областей. Состав команды можно условно разделить на четыре группы. Первая — основатели и менеджеры высшего уровня. Ко второй относятся разработчики, инженеры и другие технические специалисты. В третью группу входят эксперты из той области, в рамках которой была сформулирована идея и будет разрабатываться продукт. К четвертой относятся специалисты по маркетингу, развитию сообщества и пр. Все представители команды должны обладать достаточными компетенциями и опытом как в своей области, так и в IT-сфере. Немаловажным также является обладание хорошими знаниями в области блокчейн-технологий.

Помимо представленных выше основных четырех групп можно также выделить еще одну — группу советников и консультантов. В нее входят профессионалы, обладающие известностью и солидной репутацией в криптоиндустрии: журналисты и редакторы профильных СМИ, бизнес-консультанты и аналитики, лидеры мнений, а также обладающие связями с крупными инвесторами и инвестиционными фондами люди. Не лишним будет заручиться поддержкой специалистов пятой группы, поскольку они могут обеспечить серьезную экспертную, финансовую или техническую поддержку на ранних стадиях развития проекта.

Иногда могут возникнуть сложности с поиском и подбором квалифицированных кадров из одной страны или региона. В этом случае можно найти кандидата за рубежом. У многих проанализированных проектов часто встре-

чается мультинациональная команда. Важно помнить, что в разных странах сложился различный подход к работе и труду, поэтому для достижения взаимопонимания важно изучить и учесть менталитет и культуру каждого участника команды.

Доверие будущих участников ICO — один из важнейших факторов успеха в криптовалютной сфере. Людям важно понимать, куда они вкладывают свои деньги, и почему им нужно выбрать именно этот проект для вложений. Поэтому открытость, прозрачность и обратная связь — важные аспекты деятельности команды. Программистам и инженерам желательно иногда отвечать на сложные технические вопросы, а специалистам по развитию сообщества необходимо постоянно поддерживать коммуникации и отвечать на вопросы всех заинтересованных в будущем продукте в соцсетях, мессенджерах и других каналах.

После того как основная команда будет сформирована, рекомендуется заняться разработкой минимального жизнеспособного продукта (MVP) — бета-версии будущего проекта. Это поможет определить направления для дальнейшей работы и будет ключевым преимуществом перед другими ICO-проектами. Кроме того, важно уделить внимание проведению тщательного и объективного анализа этого будущего продукта, оценке качества его технической части, а также исследованию актуальности разработки. Это важно, поскольку в реалиях 2019 г., как упоминалось выше, каждый проект, проводящий ICO, досконально изучается, а участники ICO стали более внимательны и требовательны к деталям. Следует также принять во внимание, что на рынке блокчейн-технологий преимущество за продуктами с открытым исходным кодом [12].

### **3.3. Этап выбора бизнес-модели**

В процессе организации ICO необходимо серьезно подойти к вопросу выбора модели проведения ICO и модели ценообразования и продажи токенов.

Модели проведения ICO можно условно разделить на четыре группы:

- продажа внутренних токенов будущей платформы (utility-токены);
- STO или продажа токенов как ценных бумаг (security-токены);
- первичное биржевое размещение (IEO);
- сбор пожертвований через криптовалютный фонд.

Продажа utility-токенов — самая популярная модель, используемая в большинстве проанализированных ICO. Здесь предполагается выпуск и продажа токенов, необходимых для использования будущего продукта, например оплаты внутренних услуг. Проведение ICO по этой модели минимизирует риск признания токена инструментом инвестирования. Кроме того, это достаточно простая модель с точки зрения технической и юридической реализации.

Продавая security-токены, команда несет множество юридических рисков. Тем не менее эта модель привлекательна для участников ICO, поскольку токен может предоставлять держателю право на получение дивидендов от прибыли будущей компании, право голосования, долю в уставном капитале и пр. Выбирая эту модель проведения ICO, во избежание нарушения законодательства, следует серьезно проработать все юридические моменты и грамотно оформить необходимые документы в соответствии с требованиями. В этом случае хорошим вариантом реализации модели будет являться размещение ICO через платформу, обеспечивающую соблюдение законодательства. Примером такой платформы является CoinList [29], где средства принимаются только от аккредитованных инвесторов.

При проведении IEO (Initial Exchange Offerings) появляется посредник в лице криптовалютной биржи, команда которой проводит Due Diligence — процедуру объективного составления представления о проекте. Кроме того, проводится финансовый и юридический аудит проекта, оценка привлекательности и потенциала, а также технический аудит будущего продукта. Если проект был одобрен, и стороны договорились об условиях сотрудничества, команда проекта выпускает токены и отправляет их на биржу, которая будет заниматься их распределением. Этот способ в настоящий момент быстро набирает популярность. Одной из бирж, которые проводят IEO, является Binance с ее платформой Launchpad, а самые известные IEO-проекты — BitTorrent и Fetch.AI.

Сбор пожертвований через криптовалютный фонд на практике успешно реализовала команда Ethereum. Для этой модели создается некоммерческая организация — фонд, который принимает от участников пожертвования и управляет ими, выделяя средства по мере необходимости, в соответствии с дорожной картой проекта. Эта модель не предполагает каких-либо целей по собранным средствам, токены распределяются пропорционально пожертвованному, а сумма

привлеченных средств зависит только лишь от интереса со стороны сообщества.

Также существуют две новые модели проведения ICO:

- Decentralized Autonomous Initial Coin Offering (DAICO) — децентрализованное автономное ICO — модель, предложенная Виталиком Бутериным в начале 2018 г. [30] для реализации на платформе Ethereum. Главное отличие от традиционного механизма — блокировка собранных средств на специальном "умном контракте", который после окончания ICO периодически выделяет команде только часть средств в соответствии с дорожной картой. Участники ICO могут управлять этим процессом с помощью голосования: например, если команда не справляется, может быть инициирован возврат средств. Пример проекта, проводившего DAICO — The Abyss.

- Perpetual Coin Offering (PCO) — бессрочное предложение токенов. Предложена Евгением Гордеевым [31] и реализована в тестовой сети Minter, основной запуск которой произойдет в 2019 г. Это инновационная модель, принципиально отличающаяся от существующих. Главная особенность — неограниченная эмиссия токенов, цена которых регулируется автоматически за счет заложенных в сети формул и зависит напрямую от спроса. Такие токены резервируются через основную монету сети, которая обеспечивает полную ликвидность выпущенных токенов.

Наиболее популярными моделями ценообразования и продажи токенов среди проанализированных проектов являются:

- голландский аукцион [32]. В классическом понимании — это аукцион, где первоначальная цена лота устанавливается на максимум, а затем аукционист постепенно ее снижает. Победителем становится тот участник, который первым согласился на текущую объявленную цену. Но, поскольку суть ICO состоит в распределении токенов и привлечении средств от множества участников, схема голландского аукциона меняется. Команда проекта устанавливает период проведения ICO-аукциона, а также число токенов, которое будет выставлено на продажу. Далее участники делают ставки, устанавливая желаемое число токенов и цену их покупки. По окончании установленного периода ICO прием ставок прекращается, а все ставки сортируются, начиная с максимальной за единицу токена (для этого пред-

ложенная участником цена делится на предложенный им объем). Окончательной ценой токена будет являться та ставка, на которой будет исчерпан весь объем продаваемых токенов. В итоге все участники, предложившие цену больше окончательной, получают желаемое число токенов по окончательной цене, а излишек средств будет возвращен. По подобной модели распределялись токены на ICO Gnosis;

- **hard cap** [33] (максимальный порог собранных средств). В такой модели цена за токен фиксированная и определяется непосредственно командой проекта. Также команда устанавливает **hard cap**. ICO прекращается по достижении максимального порога. Токены получают только те участники, которые первыми успели отправить средства до достижения **hard cap**. Для всех опоздавших производится возврат отправленных ими средств;
- **hard cap** и **soft cap** [33] (минимальный и максимальный порог собранных средств). Здесь командой устанавливается два предела: минимальный и максимальный. Цена токена также фиксированная. На начальном этапе токены продаются по более низкой цене, затем, после достижения **soft cap**, цена повышается. Если участник не успел приобрести токены по цене минимального порога, произойдет либо возврат отправленных средств, либо перерасчет числа токенов по актуальной цене (в зависимости от правил, заложенных в "умный контракт"). ICO заканчивается через определенное время после достижения минимального порога или по достижении **hard cap**.

Каждую модель можно комбинировать, дополнять, изменять под свой проект для получения лучшей бизнес-модели. Например, часто для участников устанавливается максимальный порог по сумме вложений (в целях защиты от манипуляций).

Помимо модели выпуска, ценообразования и распределения токенов необходимо также разработать жизнеспособный в долгосрочной перспективе бизнес-план проекта в целом, который будет учитывать также алгоритм консенсуса сети и мотивацию держателей узлов-создателей новых блоков, поскольку токен — всего лишь инструмент, который должен быть грамотно встроен в экосистему будущего продукта. Хороший токен должен выполнять понятные будущим пользователям роли и функции, а также служить определенным целям [34]. Отсутствие ясности в понимании того, как токен будет ис-

пользоваться внутри будущей платформы, говорит о том, что в его модели есть серьезные недостатки.

### **3.4. Этап подбора платформы для создания токенов**

После подбора основной команды можно определяться с платформой, на которой будут созданы токены. К настоящему времени уже существует множество различных платформ, в том числе старых, хорошо зарекомендовавших себя.

Главная и наиболее популярная на текущий момент платформа — Ethereum, на ней создано большинство токенов в списке **Coinmarketcap** [35]. Платформа предоставляет возможность создания собственных "умных контрактов". Единственное требование — разработка по стандартам ERC (**Ethereum Request for Comments**).

Наиболее известными и используемыми ERC для "умных контрактов" и токенов являются ERC-20 [36] и ERC-721 [37]. Эти стандарты в сообществе Ethereum имеют статус "Окончательный".

Стандарт ERC-20 был разработан непосредственно командой Ethereum и является самым главным и популярным стандартом, на основе которого создано большинство токенов и "умных контрактов". Все токены, выпущенные по стандарту ERC-20, являются делимыми и взаимозаменяемыми, поэтому они отлично подходят для проектов, роль токена которых будет заключаться в оплате внутренних услуг их продукта.

Концепция стандарта ERC-721 была впервые предложена Дитером Ширли, а сам стандарт был разработан Уильямом Энтрикеном. Главным отличием токенов стандарта ERC-721 является их уникальность (невзаимозаменяемость). Кроме того, в отличие от ERC-20 токены стандарта ERC-721 не могут быть разделены и должны быть переданы, куплены или проданы целиком. Уникальные токены лучше всего подходят проектам, которые собираются оцифровать какие-либо уникальные активы (например, документы, недвижимость, автомобили или предметы коллекционирования).

Альтернативой Ethereum являются платформы Waves, NEM, Nxt, BitShares, EOS. У каждой из них собственная блокчейн-сеть, которая также дает возможность выпускать собственные токены и создавать "умные контракты", с помощью которых будет осуществляться рас-

пределение токенов. Плюсы и минусы зависят от набора условий, на которых функционирует блокчейн-сеть платформы. Например, у Waves высокая скорость транзакций и удобные инструменты, позволяющее быстро выпустить токен. А создание токена на Nxt занимает больше времени, чем на других платформах, зато она очень популярна на азиатском рынке.

### **3.5. Этап регистрации компании и подготовки White paper**

На текущий момент у ICO, как и у всей криптоиндустрии, нет определенного правового статуса. Нормативно-правовая база сильно различается от страны к стране [38, 39]. Некоторые вводят запреты и ограничения (Южная Корея [40], Китай [41]); другие выпускают нормативную политику, которая требует лицензии, регистрации и строгой отчетности (США [42], ЕС [43], Австралия [44], Сингапур и др.). Есть и лояльные к ICO страны, некоторые из которых даже выпустили "памятку-руководство" для ICO-стартапов (Канада [45], Швейцария [46], Каймановы острова, остров Мэн, Маврикий, Мальта и др.). Хотя правительства стран и пытаются выработать необходимые для регуляции индустрии законы, пока еще никто не смог довести это дело до конца. В России, тем временем, достаточно настороженное отношение к новой тенденции, созданы рабочие группы для исследования этой индустрии, в правительстве ведутся активные обсуждения, но принятие законов откладывается.

Большинство успешных ICO-проектов продает токены участникам по всему миру. Следовательно, если следовать их примеру, при планировании и запуске ICO необходимо учитывать юридические правила всех стран, граждане которых принимают участие в ICO, либо ограничивать их доступ к покупке токенов. Эта рекомендация актуальна даже если юридическое лицо компании, проводящей ICO, зарегистрировано в "дружественной" юрисдикции. Несоблюдение этой рекомендации может привести к судебным разбирательствам и штрафам (наиболее известные прецеденты: Centra [47], Munchee [48], Airfox и Paragon [49]).

После выбора юрисдикции необходимо грамотно подготовить все документы. Важнейшим здесь является white paper — документация для участников ICO, в которой будет поэтапно описано развитие компании, а также идея, технология и технические алгоритмы будущего продукта. Чем больше будет раскрыто

деталей, тем понятнее будет суть проекта для участников, следовательно, выше шансы сбора запланированной на ICO суммы.

Поскольку white paper является по сути коммерческим предложением, он должен быть написан в деловом стиле, а также основываться и придерживаться структуры, свойственной подобным документам. Проанализировав различные white paper, можно выделить следующую общую структуру:

1. Содержание.
2. Краткая вводная часть для привлечения внимания. Должна быть нацелена на аудиторию проекта и кратко описывать решаемую проблему или задачу, суть и пользу будущего решения.
3. Описание проблемы, на которую направлено будущее решение, и анализ ситуации на рынке. Этот пункт не должен быть слишком длинным, так как читающие white paper, скорее всего, уже в курсе ситуации, лучше добавить сюда больше статистики и новых данных.
4. Раздел с описанием идеи проекта: цель, задачи, миссия. Здесь нужно подробно описать то, как будущий продукт позволит решить проблему, также можно рассказать о предпосылках к созданию проекта.
5. Разбор проекта и продукта по отдельным составляющим: техническим (описание технологии, модель и схема того, как продукт будет функционировать), экономическим (бизнес-план со стратегией монетизации, модель распределения токенов, этапы продажи), конкурентным (маркетинговый анализ), инновационным (в чем конкретно состоит уникальность) и пр.
6. Дорожная карта проекта, особенно подробно расписанная на первый год. Важно, чтобы она не расходилась с планами, описанными в других разделах.
7. Информация о составе команды и консультантах проекта. Факты о компании: юрисдикция, лицензии и пр.
8. Заключение. Здесь еще раз делается акцент на ключевых аспектах проекта и приводятся основные тезисы о выгодности проекта для участника.

Над составлением white paper должны работать все члены команды: основатели, разработчики, юристы, экономисты, маркетологи и др.

Кроме того, важно не делать "тупик" в конце документа, нужно отправлять аудиторию на страницу проекта или на страницу регистрации как участника для подписки на новости. Это очень важно для поддержания обратной связи с потенциальными участниками. Сайт и



презентацию проекта, а также личный кабинет участника ICO можно начать разрабатывать параллельно с white paper.

В методике оценки перспективности и качества ICO "4Т" отмечается [50], что если white paper больше сфокусирован на описании различных выгод и бонусов, чем на технически грамотном и глубоко описании технологии, это может быть серьезным признаком того, что главная задача проекта — сбор средств, а не реализация своей идеи.

Помимо white paper важными документами являются пользовательское соглашение или оферта, а также политика в области обработки персональных данных ("знай своего клиента") и политика по борьбе с отмыванием денег. Этим документам нужно уделить особое внимание, проработав их с опытными юристами.

Одним из неочевидных советов является использование сложившейся терминологии сферы. Анализируя ошибки ICO команды KICKICO, можно отметить, что это существенно влияет на сборы. Они, по аналогии со сферой краудфандинга, использовали для обозначения soft cap термин "goal". Помимо этого, команда решила изначально скрыть hard cap на сайте (он открывался только по достижении goal). В итоге, многие участники ICO приняли goal за максимальный порог. После достижения goal для всех открылся hard cap, кампания продолжилась, вопреки ожиданиям многих участников, которые стали обвинять команду KICKICO в мошенничестве и "заваливать" негативными комментариями. Вся эта ситуация снизила объем сборов и негативно повлияла на репутацию команды. Нужно также отметить, что несмотря на указание всех этих условий в соглашении и в white paper некоторые участники из-за спешки уделили документации мало внимания. Отсюда следует еще один совет — важные условия сразу должны быть на виду всегда.

### **3.6. Этап создания токенов и аудита уязвимостей**

Когда white paper готов и основные приготовления завершены, можно приступать к созданию токенов проекта, которые впоследствии будут отправляться участникам во время ICO.

Как уже отмечалось выше, самой популярной платформой для создания токенов является Ethereum, на ней можно написать "умный контракт" и выпустить свой токен с помощью специального языка программирования — Solidity. Для этого не нужно обладать профес-

сиональными навыками программирования, достаточно придерживаться рекомендаций разработчиков Ethereum и стандартов ERC или вовсе использовать уже готовые шаблонные примеры. На других платформах, таких как Waves и BitShares, можно создать токен быстрее, буквально "в несколько кликов", используя интуитивный графический интерфейс, но аудитория таких платформ, в отличие от Ethereum, будет меньше.

Поскольку ICO — привлекательное место для мошенников и злоумышленников, а число угроз информационной безопасности растет [51], следует серьезно подойти к вопросу защиты ICO-кампании от таких рисков. Из основных угроз, которые уже неоднократно применялись в ходе различных ICO, можно выделить: взлом сайтов кампании и подмена адреса кошельков, создание дубликатов сайтов одновременно с DDoS-атаками на основной, взлом почты провайдеров и вредоносная рассылка от имени сервиса, взлом кошельков, где хранятся собранные средства, использование уязвимостей в "умном контракте" для перераспределения выпущенных токенов. Все эти и подобные риски необходимо предупредить с помощью тестирования систем, а на этапе создания токенов следует провести тщательный аудит исходного кода будущего продукта и "умного контракта", который будет отвечать за прием и распределение средств, чтобы не повторить ошибок проектов The DAO, CoinDash, Enigma, Arx и др.

### **3.7. Этап запуска маркетинговой кампании**

Частая ошибка многих ICO-проектов — позднее начало маркетинговой кампании. Планировать и искать соответствующих специалистов необходимо еще на этапе планирования всего проекта. Если же выбор падет на агентства или сторонних аутсорсеров — необходимо обязательно контролировать каждый этап их работы. Запускать же маркетинговую кампанию лучше одновременно с началом работ по созданию токенов — после подготовки white paper.

Маркетинг — один из важнейших этапов подготовки к ICO, поскольку именно здесь блокчейн-проект впервые заявляет о себе в медиа-пространстве, а потенциальные участники впервые узнают о появлении новой идеи.

Необходимо иметь четкую маркетинговую стратегию и опытных специалистов, которые будут ее реализовывать, чтобы выделить про-

ект из других ICO. На текущий момент "раскручиваться" на одной только идее — мало, поскольку на рынке большая конкуренция, поэтому маркетинговая поддержка должна сопровождать проект на каждом этапе.

Для того чтобы повысить успешность ICO, как уже упоминалось, нужно постоянно контактировать с аудиторией. Исторически сложилось, что главной площадкой для блокчейн-проектов является форум *Bitcointalk*, где обязательно нужно создать ветку в разделе об анонсе новых ICO и поддерживать постоянную связь с заинтересовавшимися пользователями.

Кроме того, одной ветки на форуме может быть мало, поэтому в дополнение стоит выбрать блог-платформу — здесь шире возможности для взаимодействия. Хорошим примером является платформа *Medium*. Начать ведение блога рекомендуется за 4...5 месяцев до старта этапа ICO.

Помимо традиционных каналов продвижения (специализированные СМИ, блокчейн-форумы и конференции, социальные сети, мессенджеры и пр.), привлечение новых пользователей особенно эффективно через работу с рейтинг-трекенами ICO-проектов и раздачу бесплатных токенов: *Bounty* и *Airdrop*.

*Bounty* — поощрение участников за проделанную работу по продвижению проекта. Этот инструмент можно использовать для поиска и привлечения опытных специалистов из разных областей, компетенций которых не хватает в команде. Самыми популярными *bounty*-кампаниями являются: репосты в социальных сетях; помощь проекту в переводе *white paper* на другие языки; поиск уязвимостей и багов в коде; создание полезного мини-функционала и надстроек; разработка элементов дизайна; написание публикаций и др.

*Airdrop* — это просто бесплатная раздача токенов для привлечения внимания, которая не требует выполнения каких-либо условий от участников, кроме регистрации.

На этапе привлечения участников можно также подумать и о сотрудничестве с крупными институциональными инвесторами: вложения от крупных игроков помогут закрыть большую часть *soft cap*. Но для этого необходимо иметь не просто впечатляющую идею, но и готовый MVP. Это условие необходимо, чтобы подчеркнуть серьезные намерения команды.

Не стоит забывать, что маркетинг — лишь один из пунктов ICO-кампании, без грамотно сделанных вышеописанных этапов все затраты на маркетинг не будут оправданы.

### **3.8. Этап проведения частной продажи (Presale), предпродажи (Pre-ICO) и основного этапа продаж**

Решение, проводить частную продажу или нет, зависит от модели и наличия заинтересованных лиц. Частная продажа осуществляется путем рассылки персональных предложений для крупных инвесторов и бизнес-консультантов. Как правило, на частной продаже токены продаются со значительными скидками, но с высоким порогом входа.

Этап *Pre-ICO* также не является обязательным, но он необходим для оценки заинтересованности покупателей и потенциала будущего ICO, тестирования технической платформы и выявления недостатков. Кроме того, за счет бонусов при покупке предпродажа является хорошим инструментом для продвижения ICO и создания инфоповодов.

Рекомендуемая продолжительность каждого этапа — до двух недель.

Наличие упомянутого выше минимального жизнеспособного продукта, который бы к моменту *presale* и *pre-ICO* уже функционировал, является дополнительным преимуществом. Такие проекты более привлекательны для вложений.

Основной этап продаж — пик всего жизненного цикла ICO-кампании. На этом этапе порог вхождения минимален, а токены продаются без скидок. Рекомендуемый период — до одного месяца. Если до запуска кампании все шаги выполнены добросовестно, то основной этап пройдет без особых проблем. Но нужно быть готовыми к возникновению непредвиденных обстоятельств.

В период ICO команде нужно проводить активную рекламную кампанию, постоянно "подогревать" интерес к проекту в социальных сетях и медиапространстве, а также круглосуточно (особенно в момент старта) следить за процессом продаж. Были случаи, когда сайт проекта взламывали и подменяли адреса кошельков для сбора средств. Также нельзя забывать о постоянно меняющейся ситуации в области регулирования блокчейн-отрасли и правилах публикаций и рекламы на крупных площадках.

Кроме того, важнейшими условиями проведения основной ICO-кампании являются постоянная поддержка обратной связи и неизменность условий соглашения с участниками, иначе есть большой риск потери доверия.

После завершения основного этапа ICO, когда проект собрал запланированную сум-

му, начинается работа по реализации идеи и продукта, для которого собирались средства. Пока разработчики трудятся над созданием обещанной технологии, работа маркетологов и комьюнити-менеджеров не прекращается. ведь открытость по-прежнему является одной из важнейших задач команды. Кроме того, необходимо повышать популярность бренда в блокчейн-отрасли.

### Заключение

ICO — весьма долгий и сложный процесс. Каждый этап должен тщательно продумываться. Даже самые незначительные ошибки в планировании и выполнении могут существенно снизить сумму собранных в итоге средств или поставить под угрозу срыв всей кампании.

На основе анализа различных алгоритмов проведения ICO, которые использовали отмеченные в статье проекты, была предложена общая методика проведения первичного размещения токенов — последовательность этапов, составляющих основу любой ICO-кампании. По организации каждого из этапов предложенной методики даны подробные практические рекомендации. Кроме того, разобраны основные ошибки проектов и риски, с которыми они сталкивались, рассмотрены две новые модели проведения ICO, выделены три наиболее популярные модели выпуска токенов, определены угрозы информационной безопасности для ICO-проектов. Все вышеперечисленное можно использовать при организации и проведении первичного размещения токенов как опорный теоретический материал.

Важность и значимость выделенных в этой методике этапов подтверждается эмпирическими исследованиями, представленными в анализе литературы, на которое опиралось это теоретическое исследование. При этом сами этапы организации ICO не являются очевидными. В проведенном анализе литературы некоторые авторы лишь кратко упоминают о некоторых составляющих первичного размещения токенов. Многие авторы также часто упоминают о различности методик и подходов к оценке ICO. При этом работ, посвященных методике и методологии проведения ICO, не найдено. Кроме того, в процессе анализа пользовательских вопросов на тематических форумах, в социальных сетях, на каналах в мессенджерах было выявлено большое число вопросов о том, как провести ICO, и других, связанных с этой темой.

Представленная методика вносит важный вклад в теоретические исследования, заполняя существующий пробел, и закладывает основу для дальнейших исследований по формированию методологической базы явления ICO.

В дальнейших исследованиях планируется изучить применение представленной методики в практике будущих ICO, в частности эмпирически определить, какие отклонения от нее могут повлиять на процесс первичного размещения токенов.

### Список литературы

1. **Cryptocurrency**, Token Offering, ICO, STO Market Statistics // CoinSchedule — A Trusted Blockchain Intelligence Platform. 2019. URL: <https://www.coinschedule.com/stats> (дата обращения: 08.04.2019).
2. **ICO Market Reports** // ICOBench — ICO rating platform. 2019. URL: <https://icobench.com/report> (дата обращения: 08.04.2019).
3. **ICORating Annual Report 2017** // ICORating — analytical agency. 2018. URL: <https://icorating.com/report/icorating-annual-report-2017> (дата обращения: 08.04.2019).
4. **Попов В.** Предварительный анализ рынка ICO/ITO/TGE (2013-2018 гг.) // ITSynergis. 2018. URL: <http://itsynergis.ru/assets/docs/ico-report-first-half-2018.pdf> (дата обращения: 08.04.2019).
5. **ICO Market Research — Quarterly Reports 2018** // ICORating — analytical agency. 2019. URL: <https://icorating.com/reports/quarterly> (дата обращения: 08.04.2019).
6. **Попов В.** Путеводитель "МВ-0" по blockchain, ICO/STO 2018 и прогнозы 2019-2022 // ITSynergis. 2018. URL: [http://itsynergis.ru/assets/docs/meta\\_analysis\\_menaskop\\_synergis\\_2018.pdf](http://itsynergis.ru/assets/docs/meta_analysis_menaskop_synergis_2018.pdf) (дата обращения: 08.04.2019).
7. **Kaal W., Dell'Erba M.** Initial Coin Offerings: Emerging Practices, Risk Factors, and Red Flags // Social Science Research Network (SSRN). 2017. URL: <https://ssrn.com/abstract=3067615> (дата обращения: 06.05.2019).
8. **Chanson M., Risius M., Wortmann F.** Initial coin offerings (ICOs): An introduction to the novel funding mechanism based on blockchain technology // 24th Americas Conference on Information Systems, New Orleans, USA, 16–18 August 2018, AMCIS. 2018.
9. **Hartmann F., Wang X., Lunesu M. I.** Evaluation of initial cryptoasset offerings: The state of the practice // Proceeding of the 2018 IEEE 1st International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering, IWBOSE. 2018. P. 33–39.
10. **Fridgen G., Regner F., Schweizer A., Urbach N.** Don't slip on the initial coin offering (ICO) — a taxonomy for a blockchain-enabled form of crowdfunding // 26th European Conference on Information Systems: Beyond Digitization — Facets of Socio-Technical Change, ECIS 2018. 2018.
11. **Fenu G., Marchesi L., Marchesi M., Tonelli R.** The ICO phenomenon and its relationships with Ethereum smart contract environment // 2018 IEEE 1st International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering, IWBOSE 2018 — Proceedings. 2018. P. 1–7.
12. **Adhami S., Giudici G., Martinazzi S.** Why do businesses go crypto? An empirical analysis of initial coin offerings // Journal of Economics and Business. 2018. 100. P. 64–75.
13. **Lahajnar S., Rožanec A.** Initial coin offering (ICO) evaluation model // Investment Management and Financial Innovations. 2018. 15 (4). P. 169–182.

14. **Ibba S., Pinna A., Baralla G., Marchesi M.** ICOs overview: Should investors choose an ICO developed with the lean startup methodology? // Lecture Notes in Business Information Processing. 2018. 314. P. 293–308.
15. **Ibba S., Pinna A., Lunesu M. I., Marchesi M., Tonelli R.** Initial coin offerings and agile practices // Future Internet. 2018. 10 (11). N. 103.
16. **Barsan I.** Legal Challenges of Initial Coin Offerings (ICP) // Social Science Research Network (SSRN). 2017. URL: <https://ssrn.com/abstract=3064397> (дата обращения: 06.05.2019).
17. **Chiu I. H. Y., Greene E. F.** The Marriage of Technology, Markets and Sustainable (and) Social Finance: Insights from ICO Markets for a New Regulatory Framework. European Business Organization Law Review. 2019. N. 20 (1). P. 139–169.
18. **Essaghoolian N.** Initial coin offerings: Emerging technology's fundraising innovation. UCLA Law Review. 2019. N. 66 (1). P. 294–343.
19. **Huang W., Meoli M., Vismara S.** The geography of Initial Coin Offerings. Small Business Economics, 2019.
20. **Debler J.** Foreign initial coin offering issuers beware: The Securities and Exchange Commission is watching // Cornell International Law Journal. 2018. N. 51 (1). P. 245–272.
21. **Demidenko D. S., Malevskaia-Malevich E. D., Dubolazova Y. A.** ISO as a real source of funding. Pricing issues // In Proceedings of the 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN), Chiang Mai, Thailand, 10–12 January 2018. 2018. P. 622–625.
22. **Emtseva S., Morozov N.** Comparative Analysis of Legal Regulation of ICO in Selected Countries // KnE Soc. Sci. 2018. N. 3. P. 77–84.
23. **De George E., Bourveau T., Ellahie A., Macciocchi D.** How can we trust crypto-markets? // London Business School Review. 2018. N. 29 (3). P. 34–35.
24. **Chanson M., Risius M., Gjoen J., Wortmann F.** Initial coin offerings (ICOs): The role of social media for organizational legitimacy and underpricing // International Conference on Information Systems 2018, ICIS 2018. 2018.
25. **Ivashchenko A., Polishchuk Y., Britchenko I.** Implementation of ICO European best practices by SMEs // Economic Annals-XXI. 2018. N. 169 (1–2). P. 67–71.
26. **Anson M.** Initial Coin Offerings: Economic reality or Virtual economics? // Journal of Private Equity. 2018. N. 21 (4). P. 41–52.
27. **Yadav M.** Exploring signals for investing in an initial coin offering (ICO) // SSRN Electronic Journal. 2017. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3037106](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3037106) (дата обращения: 06.05.2019).
28. **Momtaz P.** Initial Coin Offerings // Social Science Research Network (SSRN). 2018. URL: <https://ssrn.com/abstract=3166709> (дата обращения: 06.05.2019).
29. **Gobaud D.** ICOs and the SAFT — Why, What, and How // Medium — online publishing platform. 2017. URL: <https://medium.com/cryptos-today/icos-and-the-saft-why-what-and-how-9dee58cc0059/> (дата обращения: 08.04.2019).
30. **Buterin V.** Explanation of DAICOs // Ethereum Research. 2018. URL: <https://ethresear.ch/t/explanation-of-daicos/465/> (дата обращения: 08.04.2019).
31. **Гордеев Е.** Perpetual Coin Offering // Minter Network. 2018. URL: [https://about.minter.network/Minter\\_PCO\\_Russian.pdf](https://about.minter.network/Minter_PCO_Russian.pdf) (дата обращения: 08.04.2019).
32. **Dutch auction** // Wikipedia — the free encyclopedia. 2019. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dutch\\_auction/](https://en.wikipedia.org/wiki/Dutch_auction/) (дата обращения: 08.04.2019).
33. **ICO Hard Cap vs. Soft Cap** — Easily understand the difference // CoinStaker: Cryptocurrency News, Service Testing and Monitoring. URL: <https://www.coinstaker.com/difference-ico-hard-cap-soft-cap/> (дата обращения: 08.04.2019).
34. **Mougayar W.** Tokenomics — A Business Guide to Token Usage, Utility and Value // Startup Management. 2017. URL: <http://startupmanagement.org/2017/06/10/tokenomics-a-business-guide-to-token-usage-utility-and-value/> (дата обращения: 08.04.2019).
35. **All Tokens Ranking** // CoinMarketCap — Cryptocurrency Market Capitalizations. 2019. URL: <https://coinmarketcap.com/tokens/views/all/> (дата обращения: 08.04.2019).
36. **EIP 20: ERC-20 Token Standard** // Ethereum Improvement Proposals. 2015. URL: <http://eips.ethereum.org/EIPS/eip-20> (дата обращения: 08.04.2019).
37. **ERC-721 Non-Fungible Token Standard** // Ethereum Improvement Proposals. 2018. URL: <http://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721> (дата обращения: 08.04.2019).
38. **Decryption:** новости ICO и криптоэкономики. Новости и позиции регуляторов мира // Deloitte. 2017. URL: <https://www2.deloitte.com/ru/ru/pages/tax/articles/2017/ico-alert.html> (дата обращения: 08.04.2019).
39. **Reese F.** ICO Regulations by Country // Bitcoin Market Journal. 2018. URL: <https://www.bitcoinmarketjournal.com/ico-regulations> (дата обращения: 08.04.2019).
40. **Breaking** — South Korea Bans Initial Coin Offerings: Report // CCN: Cryptocurrency News and US Business Insights. 2017. URL: <https://www.ccn.com/breaking-south-korea-bans-initial-coin-offerings-report> (дата обращения: 08.04.2019).
41. **Public Notice of the PBC, CAC, MIIT, SAIC, CBRC, CSRC and CIRC on Preventing Risks of Fundraising through Coin Offering** // The People's Bank of China. 2017. URL: <http://www.pbc.gov.cn/en/3688110/3688181/3712144/index.html> (дата обращения: 08.04.2019).
42. **SEC Issues Investigative Report Concluding DAO Tokens, a Digital Asset, Were Securities** // U. S. Securities and Exchange Commission. 2017. URL: <https://www.sec.gov/news/press-release/2017-131> (дата обращения: 08.04.2019).
43. **ESMA50-157-828:** ESMA alerts firms involved in Initial Coin Offerings (ICOs) to the need to meet relevant regulatory requirements // The European Securities and Markets Authority. 2017. URL: [https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-157-828\\_ico\\_statement\\_firms.pdf](https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-157-828_ico_statement_firms.pdf) (дата обращения: 08.04.2019).
44. **Initial coin offerings and crypto-currency** // Australian Securities and Investments Commission. 2018. URL: <https://asic.gov.au/regulatory-resources/digital-transformation/initial-coin-offerings-and-crypto-currency> (дата обращения: 08.04.2019).
45. **CSA Staff Notice 46-307: Cryptocurrency Offerings** // The Ontario Securities Commission. 2017. URL: [https://www.osc.gov.on.ca/documents/en/Securities-Category4/csa\\_20170824\\_cryptocurrency-offerings.pdf](https://www.osc.gov.on.ca/documents/en/Securities-Category4/csa_20170824_cryptocurrency-offerings.pdf) (дата обращения: 08.04.2019).
46. **FINMA publishes ICO guidelines** // The Swiss Financial Market Supervisory Authority. 2018. URL: <https://www.finma.ch/en/news/2018/02/20180216-mm-ico-wegleitung> (дата обращения: 08.04.2019).
47. **SEC Halts Fraudulent Scheme Involving Unregistered ICO** // U. S. Securities and Exchange Commission. 2018. URL: <https://www.sec.gov/news/press-release/2018-53/> (дата обращения: 08.04.2019).
48. **Company Halts ICO After SEC Raises Registration Concerns** // U. S. Securities and Exchange Commission. 2017. URL: <https://www.sec.gov/news/press-release/2017-227/> (дата обращения: 08.04.2019).
49. **Two ICO Issuers Settle SEC Registration Charges, Agree to Register Tokens as Securities** // U. S. Securities and Exchange Commission. 2018. URL: <https://www.sec.gov/news/press-release/2018-264/> (дата обращения: 08.04.2019).
50. **Малашкевич И.** Методические рекомендации по анализу ICO: методика 4Т // ITSynergis. 2018. URL: [https://itsynergis.ru/assets/docs/4t\\_synergis.pdf](https://itsynergis.ru/assets/docs/4t_synergis.pdf) (дата обращения: 08.04.2019).
51. **Initial Coin Offering: Угрозы информационной безопасности** // Positive Technologies. 2018. URL: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/ICO-Threats-rus.pdf> (дата обращения: 08.04.2019).
52. **Chapin Andrew J.** Art of the Initial Coin Offering: Lessons Learned from the Launch of a Crypto-Token. New Providence: Bowker. 2017. 120 p.

S. M. Avdoshin, PhD, Professor, Head of Software Engineering School,

Faculty of Computer Science, HSE, savdoshin@hse.ru,

D. D. Tsvetkov, PhD student, e-mail: dtsvetkov@hse.ru,

National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow, 101000, Russian Federation

## Methodology for ICO Implementation

*Initial Coin Offering (ICO) is a new method of funds attraction by IT-projects that became especially popular in 2017–2018. Despite the decrease in the number of projects by 2019, the interest to ICO method is still high. Since, currently, methodological principles of initial coin offering are still insufficiently presented in scientific literature, the aim of the present article is to provide the general methodology for conducting initial coin offering, in the form of detailed description of its key steps. Primarily, in order to achieve the goals in the process of article preparation, the analysis of published scientific works in the scope of ICO was undertaken. Thereafter, blockchain projects having implemented ICO in the period from January 2013 to March 2019 were analyzed — both successful and high-quality ones, and failed ones. Among the analyzed projects there are: Mastercoin, Ethereum, Waves, NEO, Nem, EOS, Stratis, Golos, Gnosis, Tron, KICKICO, Enigma, BitTorrent, TheDao, Tezos, CoinDash, OneCoin, Tithecoin, Nodio, SilberPfeil, Tingo and others. The result of the analysis is this article, where, based on ICO success criteria, confirmed by empirical research, and actual experience of the projects analyzed, the sequence of steps and actions, forming the basis of any ICO-campaign is provided. Moreover, the article provides specific practical recommendations that prevent possible errors on every step of initial coin offering implantation. The results obtained fill the gap in theoretical research on ICO methodology, and, furthermore can be useful at ICO organization in actuality of the market in 2019.*

**Keywords:** ICO; crowdfunding; token; coin; white paper; cryptocurrency; blockchain; decentralization

DOI: 10.17587/it.25.615-628

### References

1. **CoinSchedule** — A Trusted Blockchain Intelligence Platform (2019). Cryptocurrency, Token Offering, ICO, STO Market Statistics, available at: <https://www.coinschedule.com/stats/> (accessed: 08.04.2019).

2. **ICOBench** — ICO rating platform (2019). ICO Market Reports, available at: <https://icobench.com/report> (accessed: 08.04.2019).

3. **ICORating** — analytical agency (2018). ICORating Annual Report 2017., available at: <https://icorating.com/report/icorating-annual-report-2017/> (accessed: 08.04.2019).

4. **Popov V.** (2018). Predvaritel'nyj analiz rynka ICO/ITO/TGE [Preliminary market analysis ICO/ITO/TGE (2013-2018)]. ITSynergis, available at: <http://itsynergis.ru/assets/docs/ico-report-first-half-2018.pdf> (accessed: 08.04.2019) (in Russian).

5. **ICORating** — analytical agency (2019). ICO Market Research — Quarterly Reports 2018. Available at: <https://icorating.com/reports/quarterly> (accessed: 08.04.2019).

6. **Popov V.** (2018). Putevoditel' "MB-0" po blockchain, ICO/STO 2018 i prognozy 2019-2022 [Guidebook "MV-0" along blockchain, ICO/STO 2018 and forecasts 2019-2022]. ITSynergis, available at: [http://itsynergis.ru/assets/docs/meta\\_analysis\\_menaskop\\_synergis\\_2018.pdf](http://itsynergis.ru/assets/docs/meta_analysis_menaskop_synergis_2018.pdf) (accessed: 08.04.2019) (in Russian).

7. **Kaal W., Dell'Erba M.** (2017) Initial Coin Offerings: Emerging Practices, Risk Factors, and Red Flags, *Social Science Research Network (SSRN)*, available at: <https://ssrn.com/abstract=3067615> (accessed: 06.05.2019).

8. **Chanson M., Risius M., Wortmann F.** (2018) Initial coin offerings (ICOs): An introduction to the novel funding mechanism based on blockchain technology, *24th Americas Conference on Information Systems*, New Orleans, USA, 16–18 August 2018, AMCIS.

9. **Hartmann F., Wang X., Lunesu M. I.** (2018) Evaluation of initial cryptoasset offerings: The state of the practice, *Proceeding of the 2018 IEEE 1st International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering, IWBOSE*, pp. 33–39.

10. **Fridgen G., Regner F., Schweizer A., Urbach N.** (2018) Don't slip on the initial coin offering (ICO) — a taxonomy for a blockchain-enabled form of crowdfunding, *26th European Conference on Information Systems: Beyond Digitization — Facets of Socio-Technical Change, ECIS 2018*.

11. **Fenu G., Marchesi L., Marchesi M., Tonelli R.** (2018) The ICO phenomenon and its relationships with ethereum smart contract environment, *2018 IEEE 1st International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering, IWBOSE 2018 — Proceedings*, pp. 1–7.

12. **Adhami S., Giudici G., Martinazzi S.** (2018) Why do businesses go crypto? An empirical analysis of initial coin offerings, *Journal of Economics and Business*, 100, pp. 64–75.

13. **Lahajnar S., Rožanec A.** (2018) Initial coin offering (ICO) evaluation model, *Investment Management and Financial Innovations*, no. 15 (4), pp. 169–182.

14. **Ibba S., Pinna A., Baralla G., Marchesi M.** (2018) ICOs overview: Should investors choose an ICO developed with the lean startup methodology?, *Lecture Notes in Business Information Processing*, 314, pp. 293–308.

15. **Ibba S., Pinna A., Lunesu M. I., Marchesi M., Tonelli R.** (2018) Initial coin offerings and agile practices, *Future Internet*, 10 (11), no. 103.

16. **Barsan I.** (2017) Legal Challenges of Initial Coin Offerings (ICP). Social Science Research Network (SSRN), available at: <https://ssrn.com/abstract=3064397> (accessed: 06.05.2019).

17. **Chiu I. H. Y., Greene E. F.** (2019) The Marriage of Technology, Markets and Sustainable (and) Social Finance: Insights from ICO Markets for a New Regulatory Framework, *European Business Organization Law Review*, 20 (1), pp. 139–169.

18. **Essaghoolian N.** (2019) Initial coin offerings: Emerging technology's fundraising innovation, *UCLA Law Review*, 66 (1), pp. 294–343.

19. **Huang W., Meoli M., Vismara S.** (2019) The geography of Initial Coin Offerings, *Small Business Economics*, 2019.

20. **Debler J.** Foreign initial coin offering issuers beware: The Securities and Exchange Commission is watching (2018), *Cornell International Law Journal*, 51 (1), pp. 245–272.

21. **Demidenko D. S., Malevskaia-Malevich E. D., Dubolazova Y. A.** (2018) ISO as a real source of funding. Pricing issues, *In Proceedings of the 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Chiang Mai, Thailand, 10–12 January 2018, pp. 622–625.
22. **Emtseva S., Morozov N.** (2018) Comparative Analysis of Legal Regulation of ICO in Selected Countries, *KnE Soc. Sci.*, no. 3, pp. 77–84.
23. **De George E., Bourveau T., Ellahie A., Macciocchi D.** (2018) How can we trust crypto-markets? *London Business School Review*, no. 29 (3), pp. 34–35.
24. **Chanson M., Risius M., Gjoen J., Wortmann F.** (2018) Initial coin offerings (ICOS): The role of social media for organizational legitimacy and underpricing, *International Conference on Information Systems 2018*, ICIS 2018.
25. **Ivashchenko A., Polishchuk Y., Britchenko I.** (2018) Implementation of ICO European best practices by SMEs, *Economic Annals-XXI*, no. 169 (1-2), pp. 67–71.
26. **Anson M.** (2018) Initial Coin Offerings: Economic reality or Virtual economics? *Journal of Private Equity*, no. 21 (4), pp. 41–52.
27. **Yadav M.** (2017). Exploring signals for investing in an initial coin offering (ICO), *SSRN Electronic Journal*, Available at [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3037106](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3037106) (accessed: 06.05.2019).
28. **Momtaz P.** (2018) Initial Coin Offerings // Social Science Research Network (SSRN), available at: <https://ssrn.com/abstract=3166709> (accessed: 06.05.2019).
29. **Gobaud D.** (2017) ICOs and the SAFT — Why, What, and How. Medium — online publishing platform, available at: <https://medium.com/criptos-today/icos-and-the-saft-why-what-and-how-9dee58cc0059/> (accessed: 08.04.2019).
30. **Buterin V.** (2018). Explanation of DAICOs. Ethereum Research, available at: <https://ethresear.ch/t/explanation-of-dai-cos/465/> (accessed: 08.04.2019).
31. **Gordeev E.** (2018). Perpetual Coin Offering. Minter Network, available at: [https://about.minter.network/Minter\\_PCO.pdf](https://about.minter.network/Minter_PCO.pdf) (accessed: 08.04.2019).
32. **Wikipedia** — the free encyclopedia (2019). Dutch auction, available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dutch\\_auction/](https://en.wikipedia.org/wiki/Dutch_auction/) (accessed: 08.04.2019).
33. **CoinStaker**: Cryptocurrency News, Service Testing and Monitoring. ICO Hard Cap vs. Soft Cap — Easily understand the difference, available at: <https://www.coinstaker.com/difference-ico-hard-cap-soft-cap/> (accessed: 08.04.2019).
34. **Mougayar W.** (2017). Tokenomics — A Business Guide to Token Usage, Utility and Value. Startup Management, available at: <http://startupmanagement.org/2017/06/10/tokenomics-a-business-guide-to-token-usage-utility-and-value/> (accessed: 08.04.2019).
35. **CoinMarketCap** — Cryptocurrency Market Capitalizations (2019). All Tokens Ranking, available at: <https://coinmarketcap.com/tokens/views/all/> (accessed: 08.04.2019).
36. **Ethereum Improvement Proposals** (2015). EIP 20: ERC-20 Token Standard, available at: <http://eips.ethereum.org/EIPS/eip-20> (accessed: 08.04.2019).
37. **Ethereum Improvement Proposals** (2018). ERC-721 Non-Fungible Token Standard, available at: <http://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721> (accessed: 08.04.2019).
38. **Deloitte** (2017). Decryption: novosti ICO i kriptojekonomiki. Novosti i pozicii reguljatorov mira [ICO and cryptoeconomics news. News and positions of the world regulators], available at: <https://www2.deloitte.com/ru/ru/pages/tax/articles/2017/ico-alert.html> (accessed: 08.04.2019) (in Russian).
39. **Reese F.** (2018). ICO Regulations by Country, *Bitcoin Market Journal*, available at: <https://www.bitcoinmarketjournal.com/ico-regulations> (accessed: 08.04.2019).
40. **CCN: Cryptocurrency News and US Business Insights** (2017). Breaking — South Korea Bans Initial Coin Offerings: Report, available at: <https://www.ccn.com/breaking-south-korea-bans-initial-coin-offerings-report> (accessed: 08.04.2019).
41. **The People's Bank of China** (2017). Public Notice of the PBC, CAC, MIIT, SAIC, CBRC, CSRC and CIRC on Preventing Risks of Fundraising through Coin Offering, available at: <http://www.pbc.gov.cn/en/3688110/3688181/3712144/index.html> (accessed: 08.04.2019).
42. **U. S. Securities and Exchange Commission** (2017). SEC Issues Investigative Report Concluding DAO Tokens, a Digital Asset, Were Securities, available at: <https://www.sec.gov/news/press-release/2017-131> (accessed: 08.04.2019).
43. **The European Securities and Markets Authority** (2017). ESMA50-157-828: ESMA alerts firms involved in Initial Coin Offerings (ICOs) to the need to meet relevant regulatory requirements, available at: [https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-157-828\\_ico\\_statement\\_firms.pdf](https://www.esma.europa.eu/sites/default/files/library/esma50-157-828_ico_statement_firms.pdf) (accessed: 08.04.2019).
44. **Australian Securities and Investments Commission** (2018). Initial coin offerings and crypto-currency, available at: <https://asic.gov.au/regulatory-resources/digital-transformation/initial-coin-offerings-and-crypto-currency> (accessed: 08.04.2019).
45. **The Ontario Securities Commission** (2017). CSA Staff Notice 46-307: Cryptocurrency Offerings, available at: [https://www.osc.gov.on.ca/documents/en/Securities-Category4/csa\\_20170824\\_cryptocurrency-offerings.pdf](https://www.osc.gov.on.ca/documents/en/Securities-Category4/csa_20170824_cryptocurrency-offerings.pdf) (accessed: 08.04.2019).
46. **The Swiss Financial Market Supervisory Authority** (2018). FINMA publishes ICO guidelines, available at: <https://www.finma.ch/en/news/2018/02/20180216-mm-ico-wegleitung> (accessed: 08.04.2019).
47. **U. S. Securities and Exchange Commission** (2018). SEC Halts Fraudulent Scheme Involving Unregistered ICO, available at: <https://www.sec.gov/news/press-release/2018-53/> (accessed: 08.04.2019).
48. **U. S. Securities and Exchange Commission** (2017). Company Halts ICO After SEC Raises Registration Concerns, available at: <https://www.sec.gov/news/press-release/2017-227/> (accessed: 08.04.2019).
49. **U. S. Securities and Exchange Commission** (2018). Two ICO Issuers Settle SEC Registration Charges, Agree to Register Tokens as Securities. Available at: <https://www.sec.gov/news/press-release/2018-264/> (accessed: 08.04.2019).
50. **Malashkevich I.** (2018). Metodicheskie rekomendacii po analizu ICO: metodika 4T [Methodical recommendations for ICO analysis: 4T methodology]. ITSynergis, available at: [https://itsynergis.ru/assets/docs/4t\\_synergis.pdf](https://itsynergis.ru/assets/docs/4t_synergis.pdf) (accessed: 08.04.2019) (in Russian).
51. **Positive Technologies** (2018). Initial Coin Offering: Ugrozy informacionnoj bezopasnosti [Initial Coin Offering: Threats to cyber-security], available at: <https://www.ptsecurity.com/upload/corporate/ru-ru/analytics/ICO-Threats-rus.pdf> (accessed: 08.04.2019) (in Russian).
52. **Chapin Andrew J.** (2017). Art of the Initial Coin Offering: Lessons Learned from the Launch of a Crypto-Token. New Providence, Bowker, 120 p.

**Т. К. Кравченко**, д-р экон. наук, проф., e-mail: tkravchenko@hse.ru,

**С. Н. Брускин**, канд. экон. наук, доц., e-mail: sbruskin@hse.ru,

**К. С. Гоменюк**, ст. преподаватель, e-mail: kgomenyuk@hse.ru,

**Е. В. Огуречников**, ст. преподаватель, e-mail: eogurechnikov@hse.ru,

Кафедра бизнес-аналитики, Школа бизнес-информатики, Факультет бизнеса и менеджмента  
Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики"

## Разработка архитектуры требований при реализации ИТ-проекта по повышению эффективности управления складской деятельностью торговой компании сферы электронной коммерции

*Предлагается подход к разработке архитектуры требований для проекта по повышению эффективности управления складской деятельностью торговой компании сферы электронной коммерции. Архитектура требований формируется исходя из проблем и требований бизнеса, заказчиков и конечного решения, которые определены в рамках данной работы. С помощью матриц отслеживания требований, пользовательских и тестовых сценариев архитектура требований разработана с использованием программного продукта Sparx Enterprise Architect. Данный подход применим для разработки архитектуры требований любых бизнес-проектов.*

**Ключевые слова:** архитектура требований, матрица отслеживания требований, бизнес-требования, требования заинтересованных сторон, функциональные требования, матрица VCG, система сбалансированных показателей, пользовательские сценарии, тестовые сценарии, программный продукт Sparx Enterprise Architect

### Введение

Актуальность проектирования архитектуры требований обуславливается необходимостью обеспечения:

- ✓ гармоничного взаимодействия требований;
- ✓ их направленности на достижение бизнес-целей;
- ✓ соответствия точкам зрения различных заинтересованных сторон проекта.

Без обоснованной архитектуры требований нет гарантий, что собранные бизнес-требования могут лечь в основу связного и работоспособного проектного решения.

В работе предлагается подход к разработке архитектуры требований с помощью матриц отслеживания требований. Результаты исследования проиллюстрированы на примере проекта по повышению эффективности управления складской деятельностью торгового предприятия сферы электронной коммерции. Предложенные рекомендации могут быть использованы в рамках любого бизнес-проекта, поскольку требования к изменениям, вносимым в организационную структуру, бизнес-процессы и информационные технологии, должны быть согласованы с бизнес-требованиями компании, требованиями заинтересованных сторон и функциональными требованиями решения. Однако проведение исследования невозможно без использования кон-

кретного объекта исследования, позволяющего сформулировать все требования, разработать матрицы отслеживания требований, тестовые и пользовательские сценарии и архитектуру требований в целом с применением программного продукта Sparx Enterprise Architect.

В качестве **объекта** исследования в данной работе рассматривается торговое предприятие "Retail", ведущее деятельность в области электронной коммерции [1].

**Предметом** исследования является управление складскими операциями.

**Целью** исследования выступает определение архитектуры требований для повышения эффективности управления складскими операциями торгового предприятия электронной коммерции.

В соответствии с поставленной целью можно поставить следующие **задачи** исследования:

- ✓ цель разработки архитектуры требований;
- ✓ назначение процесса отслеживания требований;
- ✓ формирование стратегии развития компании "Retail";
- ✓ структура архитектуры требований компании;
- ✓ формулировка бизнес-требований компании;
- ✓ определение требований заинтересованных сторон;
- ✓ определение функциональных требований решения;

- ✓ построение матриц отслеживания требований;
- ✓ разработка архитектуры требований с использованием программного продукта Sparx Enterprise Architect.

### Понятие архитектуры требований

Под архитектурой требований понимается структура всех требований проекта, которая объединяет в себе различные модели и спецификации в целях определения того факта, что их совместная реализация обеспечит достижение бизнес-целей и желаемого конечного результата для заинтересованных сторон [2, с. 148].

Задачей определения архитектуры требований является обеспечение взаимосвязи между различными требованиями и их направленности на достижение единого результата.

Архитектура требований позволяет:

- ✓ понять, какие модели подходят для предметной области, рамок решения и целевой аудиторией;
- ✓ структурировать требования заинтересованных лиц;
- ✓ проиллюстрировать взаимосвязь и взаимодействие требований и моделей;
- ✓ обеспечить выполнение всех требований для достижения общих целей;
- ✓ выработать компромиссные решения для выполнения требований при рассмотрении общих целей.

При определении архитектуры требований необходимо принимать во внимание их видение — набор допущений, который может представлять собой шаблон для решения проблем отдельных групп заинтересованных сторон (например, модели бизнес-процессов, модели данных, пользовательские и тестовые сценарии и сценарии использования). Объединенные видения составляют шаблон архитектуры требований, стандартно используемый в рамках компании.

Архитектура также помогает гарантировать необходимую полноту требований и отсутствие противоречий. Требования должны обладать следующими характеристиками [2, с. 143]:

- ✓ атомарность: требование автономно и доступно для понимания вне зависимости от других требований;
- ✓ полнота: полная и детализированная формулировка требования, с которой можно начинать работать;
- ✓ согласованность: требование соответствует выявленным потребностям и не противоречит другим требованиям;

- ✓ конкретика: не содержит посторонней и лишней информации;
- ✓ правдоподобность: требование адекватно и реализуемо с учетом рисков, сроков и бюджета;
- ✓ однозначность: требование должно быть четко определено и покрывать потребности;
- ✓ проверяемость: возможность проведения тестирования требований;
- ✓ приоритизация: требования упорядочены в порядке их относительной значимости;
- ✓ ясность: использование единой терминологии.

### Назначение процесса отслеживания требований

Назначение процесса отслеживания требований заключается в том, чтобы убедиться, что требования различных уровней корректно взаимосвязаны друг с другом и их реализация поможет достичь необходимых заинтересованным сторонам результатов [2, с. 75].

Чтобы определить и отследить требования решения, необходимо учесть проблемы бизнеса и определить бизнес-требования, которые из них проистекают, а также собрать и проанализировать требования заинтересованных сторон, участвующих в процессе создания бизнес-ценности.

Отслеживание требований предполагает идентификацию и документирование последовательности требований, их прямой и обратной связи, а также связи с другими требованиями. Отслеживать требования необходимо, чтобы иметь возможность обнаружить отсутствие требований для части необходимого функционала или излишний функционал, не подкрепленный набором требований.

Отслеживание требований позволяет:

- ✓ просто и быстро проводить анализ воздействий;
  - ✓ достоверно обнаруживать несоответствия или пробелы в требованиях;
  - ✓ более глубоко понимать текущие рамки решения и сложности необходимых изменений.
- Существует несколько типов связи требований, которые необходимо учесть в процессе отслеживания требований:
- ✓ следование — взаимосвязь между двумя требованиями, используемая, когда одно требование следует из другого;
  - ✓ зависимость — соотношение между двумя требованиями, используемое, когда одно требование зависит от другого;
  - ✓ удовлетворение — взаимосвязь между элементом решения и требованием, которое он удовлетворяет;



- ✓ подтверждение — взаимосвязь между требованием и тест-кейсом или другим элементом, который может определить, удовлетворяет ли полученное решение данному требованию.

Для отслеживания требований может быть использована матрица отслеживания (Requirements Traceability Matrix) [3—5]. Матрица отслеживания требований — это таблица, отображающая логические связи бизнес-требований, функциональных требований, требований заинтересованных сторон с другими элементами архитектуры компании.

Основное назначение матрицы отслеживания требований — визуализация:

- ✓ причинно-следственных связей или их отсутствия между требованиями различных типов;
- ✓ связей или их отсутствия между вехами фаз разработки продукта: требованиями и реализацией, требованиями и тестированием, требованиями и пользовательской документацией.

Использование отслеживания требований для определения архитектуры требований позволяет:

- ✓ организовать требования в структуры, соответствующие различному уровню заинтересованных сторон;
- ✓ иллюстрировать полноту, взаимосвязанность и непротиворечивость требований;
- ✓ демонстрировать синергетический эффект в отношении достижения бизнес-целей;
- ✓ выбирать наиболее эффективные требования, корректно определив приоритеты и потенциальную выгоду от их реализации.

### **Стратегия развития компании "Retail"**

Компания "Retail" реализует стратегию диверсифицированного роста, в частности, стратегию концентрической диверсификации, которая состоит в том, что предприятие расширяет производственный портфель за счет продуктов и направлений бизнеса, позволяющих более эффективно и полно использовать существующие технологии и ресурсы компании [6].

Преимущества стратегии диверсификации является получение доступа к готовым решениям, снижение конкуренции в сегменте (при покупке конкурирующих товаров), повышение эффективности использования имеющихся ресурсов.

В рамках выполнения складской деятельности, связанной с B2B-партнерами, компания должна решать следующие задачи:

- ✓ отслеживание движения товара на всех этапах обработки и отправки;
- ✓ ведение учета производительности труда сотрудников, задействованных в рамках данного процесса;
- ✓ применение ключевых показателей эффективности для персонала;
- ✓ расчет времени выполнения складских операций;
- ✓ расчет себестоимости выполнения складских операций;
- ✓ обеспечение точности и скорости выполнения складских операций;
- ✓ разработка системы отчетности для B2B-партнеров.

Чтобы управлять новым бизнес-процессом, внедренным в деятельность склада, и решать приведенные задачи, менеджерам компании необходимо регулярно получать информацию о ключевых показателях эффективности (КПЭ), привязанных к вехам данного процесса. Для информационно-аналитической поддержки руководящих лиц компании в части реализации указанной стратегии компании "Retail" необходимо построить систему сбалансированных показателей.

Сбалансированная система показателей (BSC) — методология, позволяющая трансформировать миссию и стратегию компании в исчерпывающий набор показателей эффективности, которые служат основой для системы стратегического управления и контроля [7].

На основе системы сбалансированных показателей определяется перечень требований и матрицы их отслеживания, которые будут использоваться как способ демонстрации взаимосвязей в рамках архитектуры требований.

### **Структура архитектуры требований компании**

В структуру архитектуры требований, реализуемую в рамках данного исследования, предлагается включить следующие элементы:

1) описание требований заинтересованных сторон, которое, в свою очередь, проистекает из потребностей бизнеса и представляет собой некоторую их декомпозицию. Другими словами, фиксируется, каким образом каждая из заинтересованных сторон могла бы воплотить стратегию и повысить эффективность деятельности компании. Требования заинтересованных сторон отображаются в таблице требований, согласованной с заинтересованными сторонами, каждое из которых будет заcoded

ровано соответствующим номером в формате BRn-n (Business Requirement);

2) описание функциональных требований решения, которое в дальнейшем будет использоваться в процессе подготовки технического задания на разработку. В последующем это позволит транслировать требования бизнеса на язык, который будет доступен системным аналитикам и конечным исполнителям проекта;

3) матрицу отслеживания требований заинтересованных сторон и требований решения, используемую для проверки корректности собранных требований;

4) пользовательские и тестовые сценарии, определенные на основе требований заинтересованных сторон, которые помогут проиллюстрировать взаимодействие конечных пользователей с реализуемым решением, а также проверить, что решение будет удовлетворять поставленным требованиям;

5) матрицу отслеживания требований для тестовых пользовательских сценариев и функциональных требований решения, представляющую собой один из наборов соглашений об организации требований, используемую для проверки выполнимости и корректности постановки каждого из требований решения;

6) матрицу отслеживания требований для функциональных требований решения и тестовых сценариев.

Построение архитектуры требований с использованием данных элементов позволит однозначно проследить корректность постановки требований, их выполнимость, а также направленность на результат.

### Формулировка бизнес-требований компании "Retail"

Оценку конкурентоспособности компании предлагается оценить на основе матрицы BCG (BCG Matrix), разработанной Бостонской консалтинговой группой (США) [8].

Эта матрица также известна как матрица "доля рынка — темп роста", так как представляет отображение позиции конкретного бизнеса в стратегическом пространстве. Матрица демонстрирует относительную долю конкретного продукта компании на конкретном рынке, а также измерение темпов прироста рынка соответствующего продукта, т. е. рост потребительского спроса на определенный продукт.

В соответствии с матрицей BCG услуга в своем развитии проходит четыре стадии:

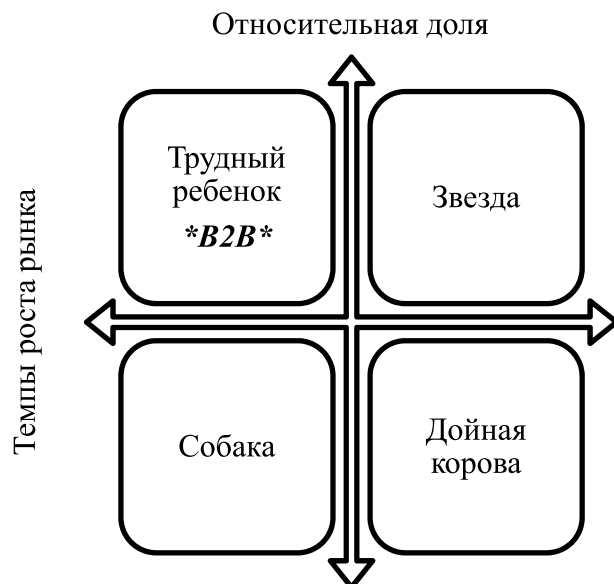


Рис. 1. Матрица BCG для B2B-услуг компании "Retail"

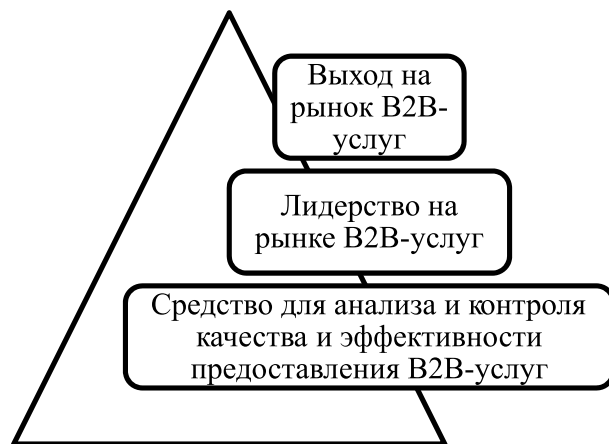


Рис. 2. Иерархия требований компании "Retail"

выход на рынок ("Трудный ребенок"), рост ("Звезда"), зрелость ("Дойная корова") и спад ("Собака"). Недавний выход компании "Retail" в сегмент B2B, который предполагает оказание услуг автоматизированного склада, по матрице BCG можно классифицировать как "Трудный ребенок" (быстрый рост рынка, сопряженный с пока что малой долей компании на данном рынке) (рис. 1). Требования бизнеса компании "Retail" заключаются в приобретении лидерства на рынке B2B-услуг, что находит отражение в поставленных стратегических целях (рис. 2).

### Определение требований заинтересованных сторон

Требования заинтересованных сторон компании "Retail" (табл. 1) заключаются в предо-

Таблица 1

## Требования заинтересованных сторон компании "Retail"

Код требования	Категория требования	Формулировка требования
BR1-1	Требование заинтересованных сторон	Возможность проведения финансовой B2B-аналитики
BR1-2	Требование заинтересованных сторон	Возможность мониторинга деятельности склада в части обработки B2B-заказов
BR1-3	Требование заинтересованных сторон	Возможность ведения клиентской B2B-аналитики
BR1-4	Требование заинтересованных сторон	Возможность отслеживать качество оказываемых B2B-услуг
BR1-5	Требование заинтересованных сторон	Возможность получения управленческой отчетности для поддержки принятия решений на регулярной основе
BR1-6	Требование заинтересованных сторон	Автоматизированное, удобное средство ведения аналитики, простое и наглядное в применении

ставлении средства для анализа и контроля качества и эффективности B2B-услуг. В качестве такого средства было предложено реализовать систему сбалансированных показателей эффективности управления складскими операциями.

### Определение функциональных требований решения

Перечень функциональных требований, способных поддерживать систему сбалансированных показателей для управления эффективностью складских операций, а именно для принятия управленческих решений, связанных с новым для компании "Retail" B2B-процессом, приведен в табл. 2.

### Построение матриц отслеживания требований

Приведем матрицу отслеживания причинно-следственных связей между требованиями заинтересованных сторон компании "Retail" и функциональными требованиями к решению информационно-аналитической поддержки управления эффективностью складских операций (табл. 3).

Исходя из данной матрицы отслеживания связей между требованиями можно сделать вывод, что требования к решению информационно-аналитической поддержки управле-

Таблица 2

## Перечень функциональных требований решения

Код требования	Категория требования	Формулировка требования
SR1-1	Работа системы	Обеспечивать взгляд на стратегию с точки зрения четырех перспектив: финансы, клиенты, внутренние процессы, обучение и рост
SR1-2	Работа системы	Обеспечивать функционал для установления стратегических целей для каждой перспективы
SR1-3	Работа системы	Связывать цели с показателями эффективности
SR1-4	Работа системы	Устанавливать целевые значения показателей
SR2-1	Взаимодействие с пользователями	Давать возможность описания и документирования целей, показателей, целевых значений и стратегических инициатив
SR2-2	Взаимодействие с пользователями	Выполнять аналитику силами бизнес-пользователей
SR2-3	Взаимодействие с пользователями	Актуализация данных не должна быть сопряжена с трудностями
SR3-1	Аналитика	Обеспечивать непрерывность процесса принятия управленческих решений
SR3-2	Аналитика	Обеспечивать автоматизацию вычислений КПЭ и план-факт анализа
SR3-3	Аналитика	Обеспечивать автоматизацию отчетности
SR4-1	Интеграция	Иметь доступ в существующее в рамках компании корпоративное хранилище данных
SR4-2	Интеграция	Иметь возможность загружать плановые значения в формате Excel

ния эффективностью складских операций сформулированы корректно и полностью следуют из требований заинтересованных сторон компании "Retail".

Пользовательские сценарии являются описанием взаимодействия пользователя и системы, которое осуществляется в целях достижения некоторой цели, и иллюстрируют взаимодействие между участником процесса и решением [2, с. 356].

Исходя из требований заинтересованных сторон были определены следующие пользовательские сценарии:

1) ведение финансовой B2B-аналитики (UC-1);

2) мониторинг деятельности склада в части обработки B2B-заказов (UC-2);

Отслеживание связей между требованиями заинтересованных сторон и функциональными требованиями к решению

		Требования заинтересованных сторон					
		BR1-1	BR1-2	BR1-3	BR1-4	BR1-5	BR1-6
Функциональные требования решения	SR1-1	Следует	Следует	Следует	Следует		
	SR1-2	Следует	Следует	Следует	Следует		
	SR1-3	Следует	Следует	Следует	Следует		
	SR1-4	Следует	Следует	Следует	Следует		
	SR2-1					Следует	Следует
	SR2-2						Следует
	SR2-3						Следует
	SR3-1					Следует	
	SR3-2						Следует
	SR3-3						Следует
	SR4-1					Следует	Следует
	SR4-2						Следует

3) управление клиентской B2B-аналитикой (UC-3);

4) отслеживание качества оказываемых B2B-услуг (UC-4);

5) анализ управленческой отчетности (UC-5);

6) настройка автоматической отчетности (UC-6).

Пользовательские сценарии создаются и используются для проверки того, что решение удовлетворяет поставленным требованиям [2, с. 219]. Исходя из пользовательских сценариев и требований заинтересованных сторон были выявлены следующие тестовые сценарии, каждый из которых поставлен в соответствие ра-

нее рассмотренным пользовательским сценариям (TS-n — UC-n):

1) тестирование формирования финансовой B2B-аналитики (TS-1);

2) тестирование мониторинга деятельности склада в части обработки B2B-заказов (TS-2);

3) тестирование ведения клиентской B2B-аналитики (TS-3);

4) тестирование отслеживания качества оказываемых B2B-услуг (TS-4);

5) тестирование регулярности предоставления управленческой отчетности (TS-5);

6) тестирование удобства использования и качества автоматизации решения (TS-6).

Таблица 4

Отслеживание связей между функциональными требованиями решения и тестовыми сценариями

		Тестовые сценарии					
		TS-1	TS-2	TS-3	TS-4	TS-5	TS-6
Функциональные требования решения	SR1-1	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение		
	SR1-2	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение		
	SR1-3	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение		
	SR1-4	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение	Подтверждение		
	SR2-1					Подтверждение	Подтверждение
	SR2-2						Подтверждение
	SR2-3						Подтверждение
	SR3-1					Подтверждение	
	SR3-2						Подтверждение
	SR3-3						Подтверждение
	SR4-1					Подтверждение	Подтверждение
	SR4-2						Подтверждение

Используя тестовые сценарии, можно проверить:

- ✓ удовлетворяют ли решения поставленным требованиям;
- ✓ корректно ли выявлены требования.

Далее построим матрицу отслеживания причинно-следственных связей между функциональными требованиями к решению и тестовыми сценариями (табл. 4).

Тестовые сценарии, указанные по столбцам таблицы, помогают определить, соответствуют ли решения требованиям, и можно ли подтвердить, что решение выполняет поставленное требование. В данном случае удалось отследить выполнение требований за шесть тестовых сценариев.

Таким образом, было определено, что все требования бизнеса и заинтересованных сторон сформулированы корректно и будут выполнены должным образом.

### Разработка архитектуры требований с использованием программного продукта Sparx Enterprise Architect (EA)

Для практической реализации и демонстрации формирования предложенной архитек-

туры требований был выбран программный продукт Sparx Enterprise Architect (EA), который представляет собой средство управления требованиями и их репозиторий (Requirements Management Tool & Repository) [9].

Enterprise Architect от Sparx Systems позиционируется как набор UML-инструментов бизнес-анализа, охватывающий все стадии разработки программного обеспечения: анализ, разработку, тестирование и поддержку. EA также может успешно служить в качестве практически полноценной системы управления требованиями при условии, что основным инструментом описания требований является UML.

Данный инструмент является одним из лучших в своей сфере и широко распространен среди отечественных IT-компаний — по большей части за счет удобства и наглядности при создании UML-моделей любой сложности. Следует также отметить, что EA является наиболее распространенным средством при проведении бизнес-анализа.

На рис. 3 приведена основная страница архитектуры требований, включающая в себя:

- ✓ перечень проблем бизнеса;
- ✓ требования бизнеса;

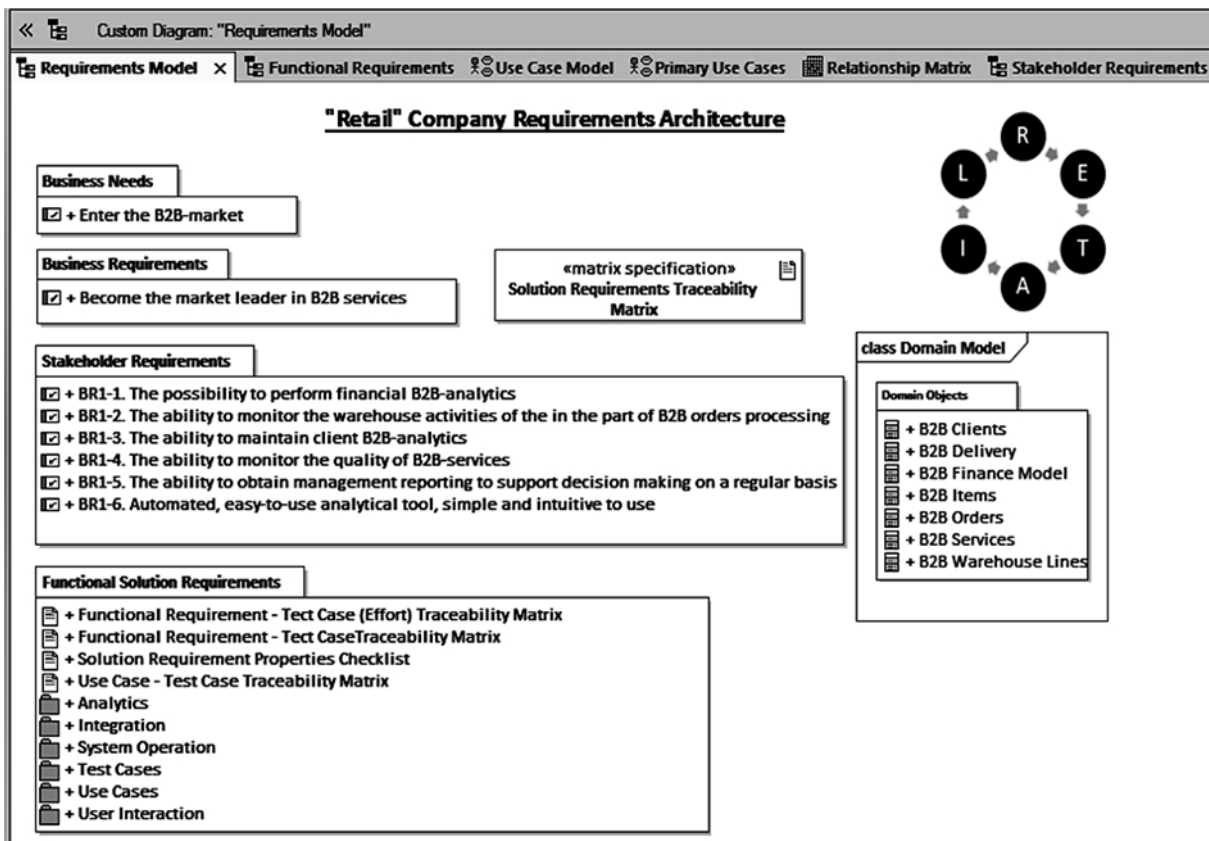


Рис. 3. Архитектура требований компании "Retail"

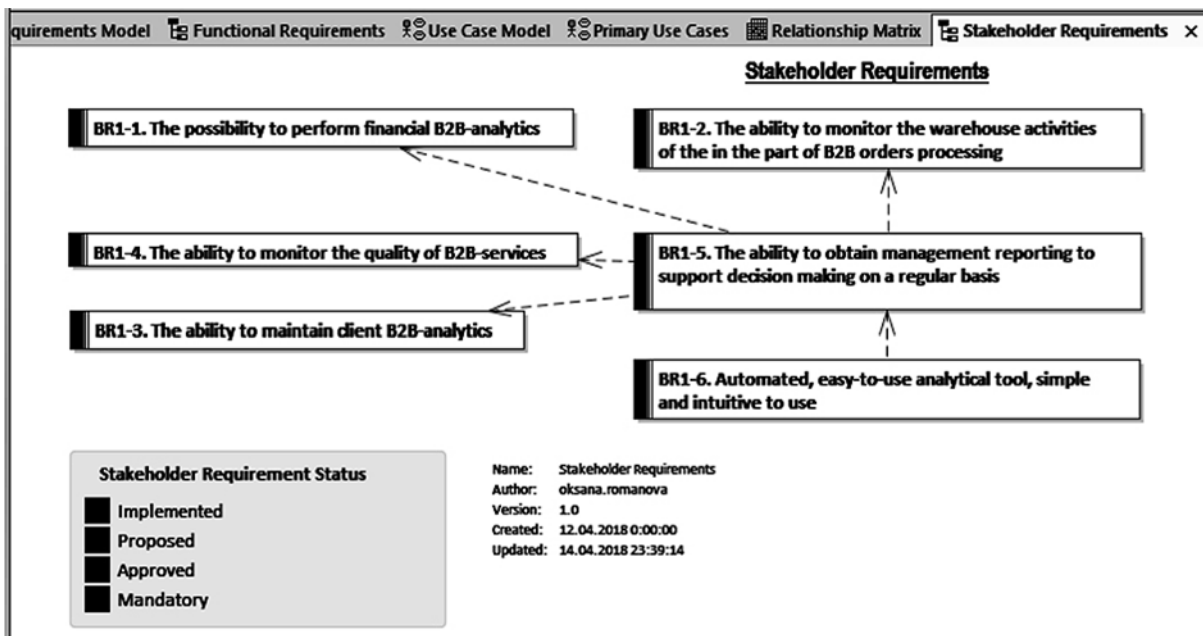


Рис. 4. Требования заинтересованных сторон

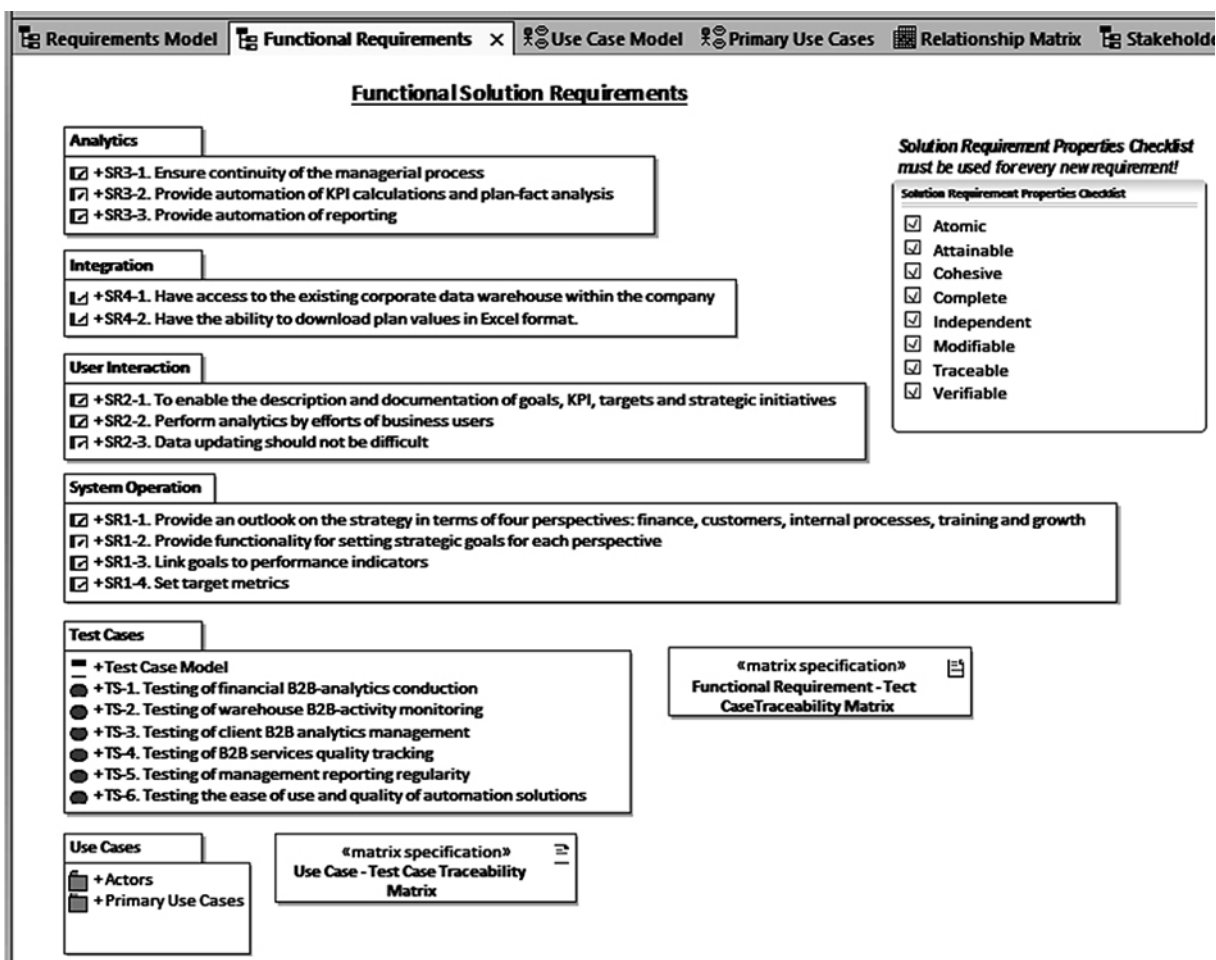


Рис. 5. Функциональные требования к решению

- ✓ перечень требований заинтересованных сторон;
- ✓ группировку функциональных требований к решению;
- ✓ объекты предметной области;
- ✓ корпоративное лого компании "Retail".

На рис. 4 приведена организация требований заинтересованных сторон:

- ✓ перечень требований заинтересованных сторон;
- ✓ связи следования между ними;
- ✓ легенда, содержащая информацию о статусе каждого требования;
- ✓ версия, дата последнего изменения и пользователь, который внес его в требования заинтересованных сторон.

Организация архитектуры функциональных требований к решению представлена на рис. 5.

Требования сгруппированы соответственно их направлению: аналитические (Analytics), интеграционные (Integration), взаимодействие с пользователем (User Interaction), функционирование системы (System Operation). Отдельным блоком приводится перечень основных тестовых сценариев, содержащих в себе информацию об агентах и пользовательских сценариях.

В нижней правой части страницы приводятся два элемента управления, включающие ссылки на следующие матрицы отслеживания:

- ✓ матрица отслеживания для функциональных требований решения и тестовых сценариев;
- ✓ матрица отслеживания для пользовательских и тестовых сценариев.

Для организации пользовательских сценариев были созданы два агента: бизнес-аналитик (Business Analyst) и менеджер компании "Retail" (Manager) (рис. 6).

Модель пользовательских сценариев (рис. 7) наглядно иллюстрирует, каким образом конечные пользователи решения планируют взаимодействовать с ним. Демонстрируется также разделение зон влияния: управление клиентской аналитикой и анализ управленческой отчетности будут выполняться силами менеджера компании "Retail", а финансовый анализ, мониторинг финансовой активности, настройка автоматических отчетов — силами бизнес-аналитика.

Модель тестовых сценариев приведена на рис. 8, а матрица отслеживания для требо-

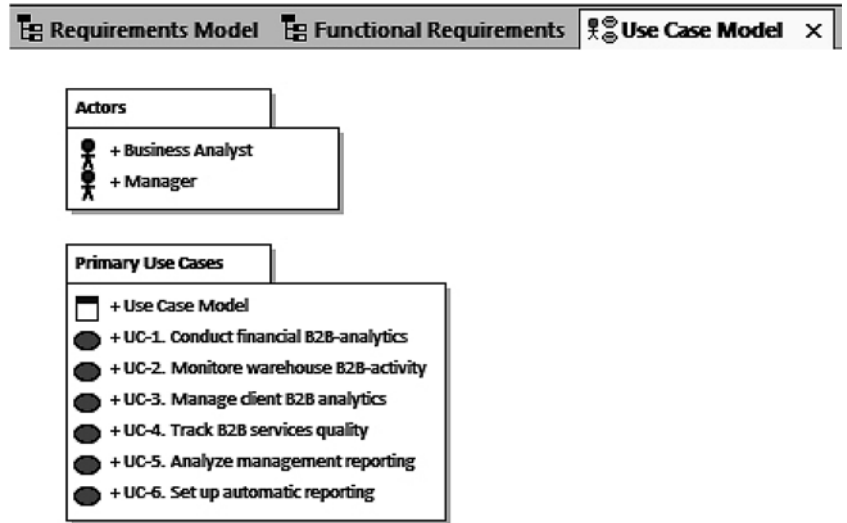


Рис. 6. Организация элементов модели пользовательских сценариев

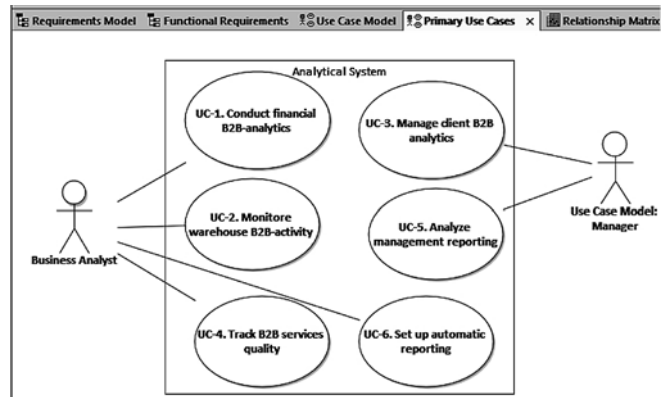


Рис. 7. Модель пользовательских сценариев

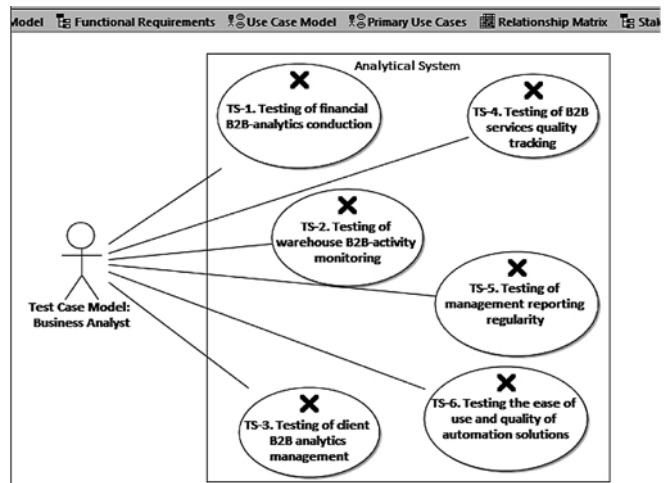


Рис. 8. Модель тестовых сценариев

ваний заинтересованных сторон и функциональных требований решения — на рис. 9.

На рис. 10 показана матрица отслеживания для пользовательских и тестовых сценариев.

Матрица отслеживания для функциональных требований решения и тестовых сценариев приведена на рис. 11.

### Заключение

В рамках данного исследования были получены следующие результаты:

- ✓ предложен подход для определения архитектуры требований и процесса отслеживания требований;
  - ✓ обоснована релевантность использования матриц отслеживания требований в процессе определения архитектуры требований;
  - ✓ с помощью программного продукта Enterprise Architect реализовано формирование архитектуры требований на примере проекта по повышению эффективности управления складскими операциями торговой компании "Retail", ведущей деятельность в области электронной коммерции.
- Предложенный подход к формированию архитектуры требований может быть использован в рамках любого бизнес-проекта и позволяет обеспечить качество собранных требований, гармоничность их взаимодействия, соответствие точкам зрения различных заинтересованных сторон проекта, а также направленность на достижение бизнес-целей компании.

### Список литературы

1. **Electronic Commerce** — ecommerce // INVESTOPEDIA. URL: <http://www.investopedia.com/terms/e/ecommerce.asp> / (дата обращения: 01.03.2018)
2. **A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK® Guide)**. Version 3.0. Toronto: International Institute of Business Analysis, 2015.
3. **Cleland-Huang J., Gotel O., Zisman A.** eds. Software and Systems Traceability. London: Springer, 2012. P. 3—22.
4. **Egeland B.** (April 25, 2009). Requirements Traceability Matrix. URL: [pmtips.net](http://pmtips.net) (date of access April 4, 2013).
5. **Carlos T.** Requirements Traceability Matrix — RTM. PM Hut, October 21, 2008. Retrieved October 17, 2009. URL: <http://www.pmhut.com/requirements-traceability-matrix-rtm>.
6. **Концентрическая диверсификация**. URL: <http://powerbranding.ru/marketing-strategy/diversification/> (дата обращения: 01.03.2018).
7. **Каплан Р., Норто́н Д.** Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию. М.: Олимп-Бизнес. 2008. 416 с.
8. **Хендерсон Б. Д.** Продуктовый портфель // BCG Review: Дайджест. 2008. Вып. 2. С. 7—8.
9. **Web-site of Sparx Systems Pty Ltd.** URL: <http://www.sparxsystems.com.au> (дата обращения: 01.03.2018)

Source	System Operation:SR1-1. Provide an outlook on the strategy in terms of four perspectives: finance, customers, internal processes, training and growth	System Operation:SR1-2. Provide functionality for setting strategic goals for each perspective	System Operation:SR1-3. Link goals to performance indicators	System Operation:SR1-4. Set target metrics	User Interaction:SR2-1. To enable the description and documentation of goals, KPI, targets and strategic initiatives	User Interaction:SR2-2. Perform analytics by efforts of business users	User Interaction:SR2-3. Data updating should not be difficult	Analytics:SR3-1. Ensure continuity of the managerial process	Analytics:SR3-2. Provide automation of KPI calculations and plan-fact analysis	Integration:SR4-1. Have access to the existing corporate data warehouse within the company	Integration:SR4-2. Have the ability to download plan values in Excel format.
Stakeholder Requirements:SR1-1. The possibility to perform financial B2B-analytics	↑	↑	↑	↑							
Stakeholder Requirements:SR1-2. The ability to monitor the warehouse activities of the in the part of B2B orders processing	↑	↑	↑	↑							
Stakeholder Requirements:SR1-3. The ability to maintain client B2B-analytics	↑	↑	↑	↑							
Stakeholder Requirements:SR1-4. The ability to monitor the quality of B2B-services	↑	↑	↑	↑							
Stakeholder Requirements:SR1-5. The ability to obtain management reporting to support decision making on a regular basis					↑						
Stakeholder Requirements:SR1-6. Automated, easy-to-use analytical tool, simple and intuitive to use					↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Рис. 9. Матрица отслеживания для требований заинтересованных сторон и функциональных требований решения

Source	Test Cases:TS-1. Testing of financial B2B-analytics conduction	Test Cases:TS-2. Testing of warehouse B2B-activity monitoring	Test Cases:TS-3. Testing of client B2B analytics management	Test Cases:TS-4. Testing of B2B services quality tracking	Test Cases:TS-5. Testing of management reporting regularity	Test Cases:TS-6. Testing the ease of use and quality of automatic
Primary Use Cases:UC-1. Conduct financial B2B-analytics	↑					
Primary Use Cases:UC-2. Monitor warehouse B2B-activity		↑				
Primary Use Cases:UC-3. Manage client B2B analytics			↑			
Primary Use Cases:UC-4. Track B2B services quality				↑		
Primary Use Cases:UC-5. Analyze management reporting					↑	
Primary Use Cases:UC-6. Set up automatic reporting						↑

Рис. 10. Матрица отслеживания для пользовательских и тестовых сценариев

Source	Test Cases:TS-1. Testing of financial B2B-analytics conduction	Test Cases:TS-2. Testing of warehouse B2B-activity monitoring	Test Cases:TS-3. Testing of client B2B analytics management	Test Cases:TS-4. Testing of B2B services quality tracking	Test Cases:TS-5. Testing of management reporting regularity	Test Cases:TS-6. Testing the ease of use and quality of automation solutions
System Operation:SR1-1. Provide an outlook on the strategy in terms of four perspectives: finance, customers, internal processes, training and growth	↑	↑	↑	↑		
System Operation:SR1-2. Provide functionality for setting strategic goals for each perspective	↑	↑	↑	↑		
System Operation:SR1-3. Link goals to performance indicators	↑	↑	↑	↑		
System Operation:SR1-4. Set target metrics	↑	↑	↑	↑		
User Interaction:SR2-1. To enable the description and documentation of goals, KPI, targets and strategic initiatives					↑	↑
User Interaction:SR2-2. Perform analytics by efforts of business users						↑
User Interaction:SR2-3. Data updating should not be difficult						↑
Analytics:SR3-1. Ensure continuity of the managerial process						↑
Analytics:SR3-2. Provide automation of KPI calculations and plan-fact analysis						↑
Analytics:SR3-3. Provide automation of reporting						↑
Integration:SR4-1. Have access to the existing corporate data warehouse within the company						↑
Integration:SR4-2. Have the ability to download plan values in Excel format.						↑

Рис. 11. Матрица отслеживания для функциональных требований решения и тестовых сценариев



**T. K. Kravchenko**, Doctor of Econ. Sc., Professor, e-mail: tkravchenko@hse.ru,  
**S. N. Bruskin**, Candidate of Econ. Sc., Associate Professor, e-mail: sbruskin@hse.ru,  
**K. S. Gomenyuk**, Lecturer, e-mail: kgomenyuk@hse.ru,  
**E. V. Ogurechnikov**, Senior Lecturer, e-mail: eogurechnikov@hse.ru,  
School of Business Informatics, Faculty of Business and Management,  
National Research University Higher School of Economics

## Development of Architecture of Requirements in the Implementation of IT-Project to Improve the Efficiency of Warehouse Management of a Trading Company of Electronic Commerce Area

*This paper proposes an approach to the development of architecture requirements for a project to improve the efficiency of warehouse management of a trading company in the field of electronic commerce. The requirements architecture is formed on the basis of the problems and requirements of the business, customers and the final solution, which are defined within the framework of this work. Using requirements tracking matrices, custom and test scenarios, the requirements architecture is implemented using the Sparx Enterprise Architect software. The object of this research is the "Retail" trading enterprise, which works in the field of electronic commerce. The subject of the study is the management of warehouse operations. The purpose of the study is to determine the architecture of requirements to improve the efficiency of warehouse operations management. In order to make sure that the various requirements are correctly interconnected and their implementation will help to achieve the required results, we use the requirements traceability matrices. Using the Sparx Enterprise Architect software, models of user and test scenarios and architecture of company requirements were developed. The proposed approach to the formation of the requirements architecture made it possible to ensure the harmonious interaction of all requirements, conformity with the points of view of the various project stakeholders, as well as their focus on achieving the company's business goals. The proposed approach to the formation of requirements architecture can be used within any business project.*

**Keywords:** requirements architecture; requirements tracking matrix; business requirements; requirements of interested parties; functional requirements; BCG matrix; balanced scorecard; user scripts, test scripts; software product Sparx Enterprise Architect

DOI: 10.17587/it.25.629-639

### References

1. **Electronic Commerce** — ecommerce // INVESTOPEDIA, available at: <http://www.investopedia.com/terms/e/ecommerce.asp/> (date of access: 03/09/2018).

2. **A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK® Guide)**. Version 3.0, Toronto, International Institute of Business Analysis, 2015.

3. **Cleland-Huang J., Gotel O., Zisman A.** eds. *Software and Systems Traceability*, London, Springer, 2012, pp. 3–22.

4. **Egeland B.** (April 25, 2009), *Requirements Traceability Matrix*, available at: [pmtips.net](http://pmtips.net). Retrieved April 4, 2013.

5. **Carlos T.** *Requirements Traceability Matrix — RTM*, PM Hut, October 21, 2008, Retrieved October 17, 2009, available at: <http://www.pmhut.com/requirements-traceability-matrix-rtm/> (date of access: 03/09/2018).

6. **Concentric diversification**, available at: <http://power-branding.ru/marketing-strategy/diversification/> (date of access: 03.09.2018) (in Russian).

7. **Kaplan R., Norton D.** *Balanced Scorecard. From strategy to action*, Moscow, Olimp-Biznes, 2008, 416 p. (in Russian).

8. **Henderson B. D.** *Product portfolio, BCG Review: Dajdzhest*, 2008, iss. 2, pp. 7–8 (in Russian).

9. **Web-site of Sparx Systems Pty Ltd.**, available at <http://www.sparxsystems.com.au/> (date of access: 03/09/2018).

---

### Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: [it@novtex.ru](mailto:it@novtex.ru)

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 08.08.2019. Подписано в печать 25.09.2019. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT1019. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

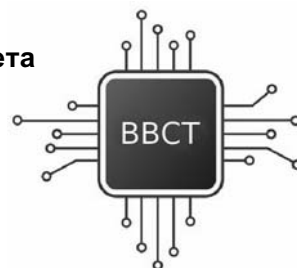
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)



17—18 апреля 2020 г. в Барнауле  
на базе Алтайского государственного университета  
состоится



**X Международная  
научно-практическая конференция**

**«ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ  
В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ,  
АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА  
(ВВСТ-2020)»**

**Секции работы конференции**

*Секция 1*

Многопроцессорные вычислительные системы и сети, многоядерные процессоры и программируемые логические структуры, цифровая обработка сигналов: архитектура и особенности разработки аппаратного обеспечения многопроцессорных вычислительных систем (МВС), сигнальных (ЦСП) и многоядерных процессоров, устройств на базе ПЛИС; использование ускорителей GPU, FPGA и компьютеров с нетрадиционной архитектурой в высокопроизводительных вычислениях; цифровая обработка и синтез сигналов.

*Секция 2*

Параллельное программирование и компьютерное моделирование явлений и процессов в естественнонаучных областях с использованием параллельных вычислений: технологии программирования, средства и инструменты для разработки, отладки и оптимизации параллельных приложений; GRID-системы, облачные технологии, нейросетевые технологии; системы и методы защиты компьютерной информации; высокопроизводительное компьютерное многомасштабное предсказательное моделирование в нанoeлектронике, химии и физике наноструктурированных материалов и метаматериалов с использованием параллельных вычислений.

*Секция 3*

Робототехника, автоматизация управления, автоматизация производства и научного эксперимента: робототехника и системы с искусственным интеллектом; автоматизация управления и мехатроника; автоматизация производства (АСУП, АСУТП и автоматические линии); автоматизация научного эксперимента и проблемно-ориентированные интеллектуальные исследовательские лаборатории с высокой степенью интеграции междисциплинарных методов и компьютеризированных приборных комплексов; использование ИКТ, средств мультимедиа и средств телекоммуникаций в системах управления и учебном процессе.

**Подробная информация на сайте конференции:  
<http://konf.asu.ru/hpcst/>**

Рисунок к статье Т. О. Федоровой, О. А. Сосниной  
«ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЦЕН С MENTAL RAY»



Рис. 1. Визуализация с начальными настройками



Рис. 2. Визуализация с измененными настройками

# Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



## Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу  
«Пресса России» – 72656



Научно-практический  
и учебно-методический журнал

## **БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по  
Объединенному каталогу  
«Пресса России» – 79963

Ежемесячный  
междисциплинарный  
теоретический и прикладной  
научно-технический журнал

## **НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА**

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано микросистем в различные области науки, технологии и производства.



Подписной индекс по  
Объединенному каталогу  
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический  
и прикладной  
научно-технический журнал

## **МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ**

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматизацию и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписной индекс по  
Объединенному каталогу  
«Пресса России» – 79492

Теоретический  
и прикладной  
научно-технический журнал

## **ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ**

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписной индекс по  
Объединенному каталогу  
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".  
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru