

ISSN 1684–8853

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

1(74)/2015

1(74)/2015

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

**Founder**

«Information and Control Systems», Ltd.

**Publisher**Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

M. Sergeev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

**Deputy Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Council**

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

L. Chubraeva

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Meyer

Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov

Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

**Editorial Board**

V. Anisimov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin

Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

V. Khimenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Melekhin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia

**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** N. Karavaeva, M. Chernenko**Layout and composition:** N. Karavaeva**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

**THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS****Balonin N. A., Sergeev M. B.** Regular Hadamard Matrix of Order 196 and Similar Matrices 2**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL****Lakhin O. I., Polnikov A. S., Simonova E. V., Skobelev P. O.** Complexity Theory and Challenges of Aerospace Products Lifecycle Management 4**Gryzunov V. V.** Dynamic Aggregation of Pools in Military Computing Systems 13**Kozinov I. A.** Detecting Local Characteristic of Analyzed Signals and Processes Using Wavelet Transformation 21**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Fridman A. Ya., Kulik B. A., Kurbanov V. G.** Course Indicators for Forward Logical Inference upon List Variables 29**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Gorodetskiy A. E., Tarasova I. Lb., Ziniakov V. Y.** Combined Logical-Probabilistic and Linguistic Modeling of Complex System Failures 35**Emeljanov V. Yu., Dokuchaeva A. N.** Searching for Approximate Solutions in Statistical Modeling Complexity Reduction 43**INFORMATION SECURITY****Maltsev G. N., Pankratov A. V., Lesniak D.** A Probabilistic Characteristics of Information System Security Changes under Unauthorized Access 50**INFORMATION CODING AND TRANSMISSION****Cheprukov Yu. V.** Synthesis of Binary R-Codes 59**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM****Ben-Shimol Y., Blaunstein N., Sergeev M. B.** Depolarization Effects of Radio Wave Propagation in Various Land Built-Up Environments 68**INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS****Britov G. S.** A Method for Testing Linear Dynamic Systems 77**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS****Benderskaya E. N., Nikitin K. V.** Using Spiking Recurrent Neural Networks for ECG Analysis 85**CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS****Stepanov A. G., Semin S. G.** Production Line Technical Upgrading Investment Project Simulation Model 92**Burlutsky S. G., Ezersky V. V., Khakhaev I. A.** Electronic Passport as a Basis of Information Support in Automated Decision Support Systems 100**Balashova E. S.** Modern Models of Industrial Enterprise Resource Management 105**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

112

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

Submitted for publication 26.12.14. Passed for printing 17.02.15. Format 60×84<sub>1/8</sub>. Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI, 67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia  
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI, 67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue: № 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

1(74)/2015

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

# ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель  
ООО «Информационно-управляющие системы»

Издатель  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

Главный редактор  
М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора  
Е. А. Крук,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь  
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Н. Васильев,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Н. Козлов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

К. Кристофолу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США  
Б. Мейер,  
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария

Ю. Ф. Подоплёкин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. В. Симаков,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, Италия  
А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ  
Ю. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:  
В. Г. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль  
А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

И. И. Думер,  
д-р наук, проф., Риверсайд, США  
А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

Г. Н. Мальцев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Ф. Мелехин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. П. Шепета,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

З. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова  
Корректор: Т. В. Звертановская  
Дизайн: Н. Н. Караваева, М. Л. Черненко  
Компьютерная верстка: Н. Н. Караваева

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.  
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации  
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

© Коллектив авторов, 2015

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

**Balotin N. A., Sergeev M. B.** Regular Hadamard Matrix of Order 196 and Similar Matrices 2

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

**Ляхин О. И., Полников А. С., Симонова Е. В., Скобелев П. О.** Теория сложности и проблема управления жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности 4

**Грызунов В. В.** Метод динамического формирования пулов в информационно-вычислительных системах военного назначения 13

**Козин И. А.** Обнаружение локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования 21

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

**Фридман А. Я., Кулик Б. А., Курбанов В. Г.** Метод управления прямым логическим выводом в интеллектуальных системах с дискретными доменами переменных 29

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

**Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Зиняков В. Ю.** Комбинированное логико-вероятностное и лингвистическое моделирование отказов сложных систем 35

**Емельянов В. Ю., Докучаева А. Н.** Исследование методов поиска приближенного решения в задаче сокращения трудоемкости статистического моделирования 43

## ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

**Мальцев Г. Н., Панкратов А. Н., Лесняк Д. А.** Исследование вероятностных характеристик изменения защищенности информационной системы от несанкционированного доступа нарушителей 50

## КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

**Чепруков Ю. В.** Синтез бинарных R-кодов 59

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

**Ben-Shimol Y., Blaunstein N., Sergeev M. B.** Depolarization Effects of Radio Wave Propagation in Various Land Built-Up Environments 68

## ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

**Бритов Г. С.** Метод тестового диагностирования линейных динамических систем 77

## УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

**Бендерская Е. Н., Никитин К. В.** Возможности использования импульсных рекуррентных нейронных сетей для анализа электрокардиограмм 85

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

**Степанов А. Г., Семин С. Г.** Имитационная модель инвестиционного проекта технического перевооружения производственной линии **Бурлуцкий С. Г., Езерский В. В., Хахаев И. А.** Электронный паспорт как основа информационного обеспечения автоматизированных систем поддержки принятия решений 92

**Балашова Е. С.** Современные модели ресурсного менеджмента промышленного предприятия 105

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

112

Сдано в набор 26.12.14. Подписано в печать 17.02.15. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBook. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,5. Уч.-изд. л. 16,9. Тираж 1000 экз. Заказ 30.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП. 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

UDC 004.438

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.2

## REGULAR HADAMARD MATRIX OF ORDER 196 AND SIMILAR MATRICES

N. A. Balonin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ru

M. B. Sergeev<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, mbse@mail.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** This note discusses two level quasi-orthogonal matrices which were first highlighted by J. J. Sylvester; Hadamard matrices, symmetric conference matrices, and weighing matrices are the best known of these matrices with entries from the unit disk. The goal of this note is to develop a theory of such matrices based on preliminary research results. **Methods:** Our new regular Hadamard matrix constructed for order 196, suggests a source of ideas to construct regular Hadamard matrices of orders  $n = 1 + p \times q = 1 + p \times (1 + 2m)$ , where  $p, q$  are twin odd integer ( $q - p = 2$ );  $m = (q - 1)/2$ , prime, order of inner blocks. **Results:** We present a new method aimed to give regular Hadamard matrix of order 196 and similar matrices. Such kinds of regular Hadamard matrix of order 36 were done by Jennifer Seberry (1969), that inspired to find matrices of orders  $4k^2$ ,  $k$  integer, 36, 100, 196, ..., 1444 and many others. We apply this result to the family of regular matrices obtaining a new infinite family of Cretan matrices with orders  $4t + 1$ ,  $t$  an integer, 37, 101, 197, ..., 1445, etc. **Practical relevance:** Web addresses are given for other illustrations and other matrices with similar properties. Algorithms to construct regular matrices have been implemented in developing software of the research program-complex.

**Keywords** — Quasi-Orthogonal Matrices, Hadamard Matrices, Regular Hadamard Matrices, Cretan Matrices, Legendre Symbols.

**AMS Subject Classification:** 05B20; 20B20.

We present a new method aimed to give regular Hadamard matrices, that can be used to construct Cretan matrices [1, 2] with orders  $4t + 1$ ,  $t$  is an integer. Similar kinds of regular Hadamard matrix of order 36 were done by Jennifer Seberry (1969) [3] that inspired to find matrices of orders  $4k^2$ ,  $k$  integer, 36, 100, 196, and many others. The conditions for the existence request SBIBD is given in [4]. We observe an example of regular Hadamard matrix, order 196.

Let order of regular Hadamard matrix is  $n = 1 + p \times q$ ,  $p$  is prime (or prime power),  $q$  is prime or not prime. Thus we take composition  $n = 1 + p \times q = 1 + p \times (1 + 2m)$ , where  $p, q$  are twin odd integer ( $q - p = 2$ );  $m = (q - 1)/2$  is prime and it is order of blocks of the following two-border structure

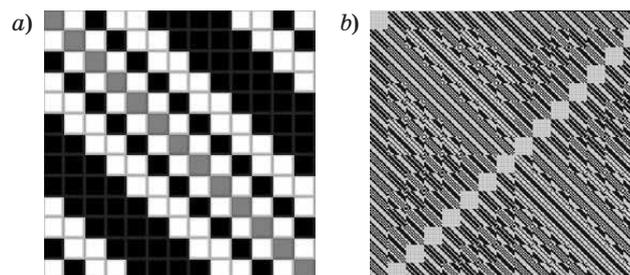
$$H = \begin{pmatrix} 1 & e^T & e^T & \dots & e^T & -e^T & \dots & -e^T \\ e & J & B & \dots & B & A & \dots & A \\ e & B^T & & & & & & \\ \vdots & \vdots & & C_{11} & & & & C_{12} \\ e & B^T & & & & & & \\ -e & A^T & & & & & & \\ \vdots & \vdots & & C_{21} & & & & C_{22} \\ -e & A^T & & & & & & \end{pmatrix},$$

here  $A, B$  of size  $p$ ,  $J, e$  are the same size matrix and vector of all 1s respectively; matrix border

has  $m$  blocks  $B, \dots, B$  and  $m$  blocks  $A, \dots, A$ ; and  $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$  are  $m \times m$  matrices of blocks of a core consisted  $J, A, B$ .

For order  $n = 196 = 1 + 13 \times 15 = 1 + 13 \times (1 + 2 \times 7)$  we have  $p = 13, q = 15$  is not prime,  $m = 7$  is prime. Let be  $C_{11} = \text{circ}(A, -B, -B, A, -B, A, A)$  be a circulant matrix of order  $m = 7$  of Legendre symbols where “1” (and “0”), “-1” changed to  $A, -B$  respectively; a complementary matrix is  $C_{22} = \text{circ}(-B, A, A, -B, A, -B, -B)$ ;  $C_{21} = C_{12}^T$ , and  $C_{12} = \text{circback}(-A, -A, B, -A, B, B, J)$  is the back-circulant matrix of Legendre symbols, taken in reversed order, where “0” is changed by  $J$ .

Then if  $A = I - Q, B = -I - Q; Q$  is a circulant matrix of order  $p = 13$  of Legendre symbols (Figure, a), Hadamard matrix of order 196 has sums of all columns and rows equal to 14 (i.e. it is regular



■ Circulant matrix  $Q$  of Legendre symbols (a) and regular Hadamard matrix of order 196 (b)

matrix) (Figure, b). In such a way, we can get set of regular Hadamard matrices orders  $36 = 1 + 5 \times 7 = 1 + 5 \times (1 + 2 \times 3)$  and it can be constructed with one border and one circulant core due 7 is prime,  $100 = 1 + 9 \times 11 = 1 + 9 \times (1 + 2 \times 5)$  — this matrix has a special cell-structure due order of  $\mathbb{Q}$  is  $9 = 3 \times 3$ ,  $196 = 1 + 13 \times 15 = 1 + 13 \times (1 + 2 \times 7)$  is given matrix, ...,  $1444 = 1 + 37 \times 39 = 1 + 37 \times (1 + 2 \times 19)$  it is used as a test with positive result,

and many others with the same form described above. We apply this result to the family of regular matrices obtaining a new infinite family of *Cretan matrices* of *Fermat-type* [1, 2] with orders  $4t + 1$ ,  $t$  an integer, 37, 101, 197, ..., 1445, etc. which will be studied in later papers. We acknowledge the use of the <http://www.mathscinet.ru> and <http://www.wolframalpha.com> sites for the number and symbol calculations in this paper.

## References

1. Balonin N. A., Sergeev M. B. Local Maximum Determinant Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2014, no. 1(68), pp. 2–15 (In Russian).
2. Balonin N. A., Jennifer Seberry. Remarks on Extremal and Maximum Determinant Matrices with Moduli of Real Entries  $\leq 1$ . *Informatsionno-upravliayushchie sistemy*, 2014, no. 5(72), pp. 2–4.
3. Jennifer Wallis (Seberry). Two New Block Designs. *Journal of Combinatorial Theory*, 1969, vol. 7, no. 4, pp. 369–368.
4. Xia T., Xia M., Seberry J. Regular Hadamard Matrices, Maximum Excess and SBIBD. *AJC*, 2003, vol. 27, pp. 263–275.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.

УДК 658.512.6

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.4

## ТЕОРИЯ СЛОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О. И. Лахин<sup>а</sup>, руководитель направления

А. С. Полников<sup>а</sup>, аналитик

Е. В. Симонова<sup>а, б</sup>, канд. техн. наук, доцент, ведущий аналитик

П. О. Скобелев<sup>а, б</sup>, доктор техн. наук, профессор, генеральный директор

<sup>а</sup>ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения», Самара, РФ

<sup>б</sup>ФГАОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева (национальный исследовательский университет)», Самара, РФ

**Постановка проблемы:** в существующих системах управления жизненным циклом изделий используются различные методики, а знания слабо структурированы. По этой причине внедряемые системы эксплуатируются не в полную меру своих возможностей и зачастую используются только на ранних стадиях жизни изделия. В статье описывается новый, сетцентрический подход к управлению жизненным циклом сложных изделий аэрокосмической промышленности. **Методы:** предлагается интеллектуальная сетцентрическая система Smart PLM, которая является надстройкой над традиционными PLM-системами. Smart PLM состоит из взаимосвязанных систем контроля отдельных стадий жизненного цикла, в которых возникающие проблемы решаются по мере возможности локально, но при необходимости глобально. **Результаты:** разработана концепция сетцентрической архитектуры системы управления традиционными системами сопровождения жизненного цикла изделий. Продемонстрированы преимущества предлагаемого подхода на примере сложных изделий аэрокосмической промышленности. Выделены основные компоненты системы Smart PLM и описан механизм их взаимодействия. Обосновано решение использовать онтологии для описания предметной области и мультиагентный подход для построения сети потребностей и возможностей при планировании всех этапов жизненного цикла изделий. Разработана логическая архитектура распределенной мультиагентной системы. Разработанные модели, методы и алгоритмы поддержки принятия решений в отдельных компонентах системы позволяют своевременно обеспечивать адекватную реакцию на возникающие события на всех этапах жизненного цикла изделий аэрокосмической промышленности. **Практическая значимость:** разработанная архитектура системы может применяться как полностью автономно, так и посредством интеграции в единый комплекс с существующими PLM-системами. Использование предлагаемого адаптивного подхода к управлению жизненным циклом изделий аэрокосмической промышленности позволит повысить их надежность и снизить издержки эксплуатации за счет своевременного взаимодействия и учета требований всех участников на различных этапах жизни изделия.

**Ключевые слова** — жизненный цикл изделия, управление жизненным циклом, PLM-система, поддержка принятия решений, адаптивное управление, сетцентрическая архитектура, мультиагентная технология, стратегическое планирование, онтология предметной области, киберфизическая модель.

### Введение

При проектировании, производстве и эксплуатации изделий аэрокосмической промышленности (ИАП) ставится задача повышения качества используемых технологических процессов и конечной продукции при различных условиях эксплуатации. Все в большей мере для экономии времени и денежных средств при управлении жизненным циклом изделий (ЖЦИ, PLM — Product Lifecycle Management) используются программные средства, основанные на знаниях, учитывающие особенности эксплуатации каждого отдельного изделия и позволяющие не только автоматизировать наукоемкие инженерные задачи, но и осуществлять поддержку принятия решений при эксплуатации и обслуживании изделия. В настоящее время в связи с растущей сложностью управления ЖЦИ и усиливающейся конкуренцией, а также высоким уровнем и динамикой изменения индивидуальных требований,

предъявляемых клиентом к изделию, необходимо применять сквозное и связанное адаптивное управление ЖЦИ на всех его этапах [1].

В настоящей статье предлагаются новые принципы управления ЖЦИ аэрокосмической промышленности на основе применения сетцентрического подхода, позволяющего создать интеллектуальную «систему» для повышения эффективности управления всеми основными этапами жизненного цикла сложных изделий, от проектирования и производства — до эксплуатации и утилизации.

### Изделие аэрокосмической промышленности как сложная система

Управление ЖЦИ предполагает создание сложных организационно-технических систем, обеспечивающих управление всеми его этапами, начиная от концепции изделия, через его проектирование, конструирование и производство,

до эксплуатации, обслуживания и утилизации. В аэрокосмической промышленности изделиями являются такие сложные технические объекты, как космические и ракетные комплексы, космические корабли и аппараты, летательные аппараты (ЛА) и их системы, отдельные приборы и др. [2].

Несмотря на существенный прогресс последних двух десятилетий, по-прежнему наблюдаются значительные трудности, связанные с внедрением существующих автоматизированных PLM-систем. Главная проблема заключается в том, что вопреки декларируемым целям полного охвата жизненного цикла, на практике использование программных средств PLM до сих пор зачастую ограничивается стадией разработки и проектирования. Другой причиной низкой эффективности внедрения PLM-систем является отсутствие единообразных правил моделирования и сопутствующих методик программирования систем. Вследствие того, что в традиционных PLM-системах большая часть знаний содержится в неструктурированном виде, затрудняется отслеживание информации по стадиям жизненного цикла. Это ограничивает доступ к знаниям о каждом отдельном изделии в середине и конце его жизненного цикла и не позволяет передать достаточно информации на стадию проектирования и производства [3].

Знания неизбежно изменяются со временем, поэтому приложения, использующие их, могут стремительно устаревать. Существующие и разрабатываемые системы должны своевременно реагировать на происходящие изменения знаний об изделии в течение его жизненного цикла. В качестве решений проблемы предлагаются следующие: полное или частичное перепроектирование системы, инвестиции в интенсивное и высокозатратное обслуживание или полное прекращение поддержки системы, неизбежно приводящее к ее устареванию. Поэтому уже в процессе разработки PLM-системы необходимо предусматривать возможность изменения знаний в ходе ее эксплуатации и использовать методы, поддерживающие изменения на уровне программной реализации [4].

Сопровождение ЖЦИ аэрокосмической промышленности является сложной задачей вследствие высокого уровня неопределенности, постоянно присутствующего в системе. На практике это означает необходимость своевременного устранения отказов, происходящих в различных узлах с трудно прогнозируемой частотой. Можно выделить семь признаков сложности, на основании которых ИАП следует отнести к сложным системам [5].

1. Наличие связей — ИАП состоит из очень большого количества компонентов, отказы которых независимы друг от друга ввиду их функци-

онального назначения либо взаимного расположения. Задача управления заключается в своевременном выявлении узлов, способных отказать, фактически произошедших отказов, их возможных последствий и обстоятельств, приводящих к возникновению отказов. Кроме этого, обслуживанием ИАП занимаются различные наземные инженерные службы, при взаимодействии которых периодически возникают проблемы. Задача анализа состоит в выявлении человеческого фактора, влияющего на отказы, и в их устранении.

2. Автономность — способность действовать при отсутствии прямых указаний сверху. Хотя комплекты ИАП не имеют физической автономности, они обладают автономностью в плане динамики отказов, а также частичной автономностью при выполнении их технического обслуживания. Задача заключается в выявлении степени автономности каждого компонента и ее влияния на динамику возникновения и устранения отказов.

3. Эмерджентность — динамика отказов системы является следствием проявления непредсказуемых индивидуальных отказов отдельных узлов. Вместо точного прогнозирования ставится задача выявления динамики вероятностей отказов. Если вероятность отказа отдельного узла непрерывно возрастает и в определенный момент превышает допустимое значение, надежнее заменить узел, не дожидаясь окончательного выхода его из строя.

4. Неуравновешенность — ИАП можно представить в виде динамической системы, которая не успевает вернуться в состояние равновесия в промежутки времени между двумя соседними внешними воздействиями. Например, отказавший узел может отличаться по своим рабочим характеристикам от узла, установленного на замену, что может повлиять на возникновение отказов в дальнейшем.

5. Нелинейность — сравнительно малый при прочих обстоятельствах отказ может привести к катастрофическим последствиям в системах ИАП. Задача состоит в своевременном выявлении всех возможных изменений, способных оказать влияние на надежность всего ИАП.

6. Самоорганизация — многие авиационные системы имеют резервные компоненты на случай отказа основных систем. При принятии решений относительно целесообразности замены компонентов необходимо учитывать уже существующие средства поддержки отказоустойчивости.

7. Сопряженность — поскольку отказы зависят от условий эксплуатации и технического обслуживания ИАП, можно представить динамику отказов как функцию от изменения этих условий. Другими словами, процессы возникновения и устранения отказов сопряжены не только друг

с другом, но и с изменяющимися внешними условиями.

Информация об изделии, содержащаяся в PLM-системе нового поколения, должна базироваться не просто на цифровом макете объекта, а на его действующей компьютерной модели, которая должна эволюционировать вместе с реальным изделием, интегрируя в себе знания о требованиях к изделию, о структуре и принципах его функционирования, особенностях эксплуатации, текущем состоянии и т. д. [6].

### Новые принципы создания интеллектуальной системы управления ЖЦИ

Для решения поставленной задачи предлагается новый подход к созданию интеллектуальной системы управления ЖЦИ Smart PLM, построенной на принципах сетцентрического управления, мультиагентных технологий, онтологий предметных областей и киберфизических моделей изделий (рис. 1) [7].

Smart PLM представляет собой решение, которое строится «над» традиционными PLM-системами. Выделяется верхний уровень системы, который создается автономными интеллектуальными системами с использованием сервис-ориентированной архитектуры и общей информационной шины предприятия, что обеспечивает интеграцию данных всех подсистем в едином информационном пространстве для достижения заданных целей управления.

Таким образом, вместо одной большой PLM-системы на всех этапах будет строиться адаптивная p2p сеть взаимодействующих через общую шину мультиагентных планировщиков отдельных этапов ЖЦИ, подразделений предприятий или даже сотрудников. Планировщики смогут размещаться на персональных компьютерах, планшетах и сотовых телефонах, обеспечивая со-

гласованную работу в режиме реального времени. При этом впервые станет возможно достижение согласованных результатов на всех этапах жизненного цикла за счет поддержки динамического взаимодействия всех участников. Например, проектирование изделия должно осуществляться с учетом особенностей эксплуатации, а особенности и результаты эксплуатации должны быть доступны проектировщикам.

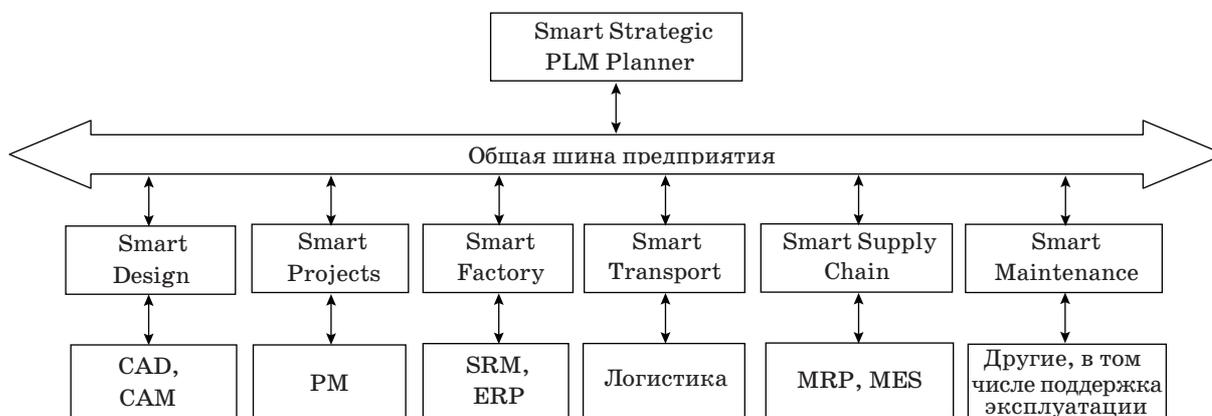
Концепция «сетцентричности» жизненного цикла представляет собой новую систему взглядов на управление, ориентированную на конечный результат и достижение превосходства. Новизна предлагаемого подхода состоит как в использовании интеллектуальных систем управления этапами жизненного цикла, так и в обеспечении адаптивного p2p взаимодействия между основными интеллектуальными системами (к чему не способны традиционные системы), заменяя традиционные каскадные бизнес-процессы на адаптивные p2p взаимодействия систем по принципам «каждый с каждым» и «равный с равным».

Рассматриваемая сетцентрическая интеллектуальная система Smart PLM строится на основе онтологий и мультиагентных технологий, использующих фундаментальные принципы самоорганизации и эволюции, присущие живой природе. Для взаимодействия с человеком используется киберфизическая модель изделий.

Основными системами Smart PLM являются:

1) Smart Strategic PLM Planner — стратегический планировщик, обеспечивающий планирование жизни изделия на большой промежуток времени и координацию между отдельными системами;

2) Smart Design — поддержка принятия решений при проектировании изделий в ходе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), во время которых части изделия самоорганизуются с учетом предлагаемых требований;



■ Рис. 1. Архитектура распределенной интеллектуальной PLM-системы

3) Smart Project — управление проектами НИОКР с поддержкой процессов командного управления в сложных междисциплинарных командах;

4) Smart Factory — оперативное управление цехами производства «точно в срок» и «под заданную стоимость» по целям и событиям в реальном времени;

5) Smart Transport — управление транспортом (грузовиками, РЖД, морскими перевозками и др.);

6) Smart Supply Chain — поддержка цепочек закупок и поставок внешних комплектующих при производстве и ремонтах, техническом обслуживании изделий;

7) Smart Maintenance / Smart Reliability — поддержка эксплуатации изделий, технического обслуживания и ремонтов.

Указанные системы будут интегрироваться с существующими классическими системами и использоваться для поддержки принятия решений и их согласования по методике виртуального «круглого стола» на базе общей шины предприятия/изделия.

При этом будет применен гомеостатический подход, который позволит в рамках многокритериальной оптимизации в реальном времени возвращать текущие планы, нарушаемые непредвиденными событиями, к заданным директивным планам, в первую очередь, по тем критериям, где отклонение является максимальным.

Каждая из указанных систем должна поддерживать работу с моделями знаний предметной области, представленными в виде онтологий на основе семантических сетей классов понятий и отношений, что необходимо для формирования баз знаний, а также поиска и сопоставления вариантов для принятия управленческих решений [8].

### Сетецентрический подход к построению системы управления ЖЦИ

В связи с большой сложностью задачи управления ЖЦИ аэрокосмической промышленности предлагается декомпозировать исходную задачу на последовательность локальных оптимизационных задач, решаемых по мере появления событий. Это означает, что структуры плана действий строятся не централизованно, а создаются в разных областях сцены мира агентов, связанных между собой. Такой метод, в отличие от прямых оптимизационных методов или обычных эвристик, основанных на правилах приоритета при централизованном планировании, называется сетецентрическим.

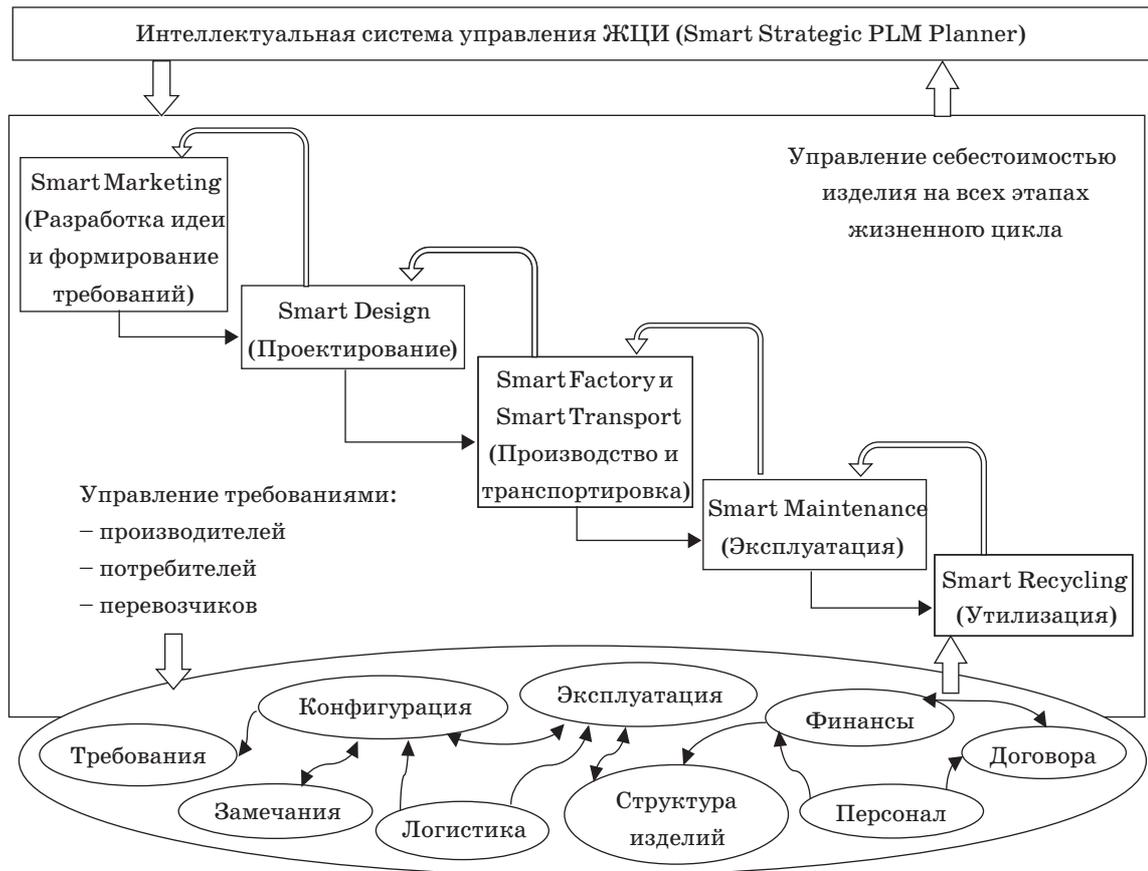
Сетецентрический подход к построению решения для управления ЖЦИ обеспечивает не просто передачу данных между системами, а выработку

согласованных решений в ответ на появление того или иного события. Предполагается, что системы постоянно работают в параллельном и асинхронном режиме, но в случае важных событий, нарушающих ранее принятые ими обязательства, могут обращаться друг к другу с сообщениями типа «Запрос», «Просьба», «Информирование», «Варианты», «Подтверждение», «Встречное предложение» и т. д. [7].

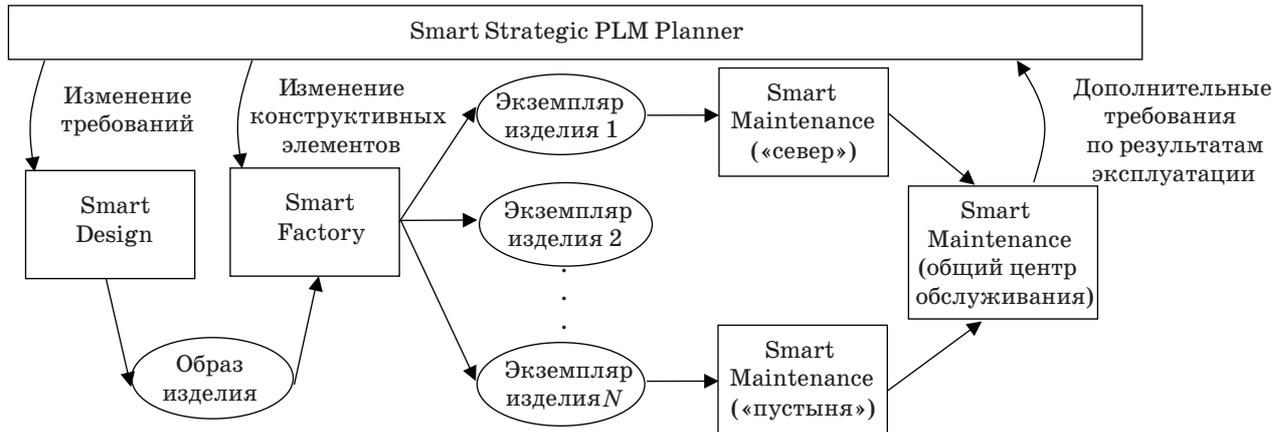
Предлагаемая интеллектуальная система управления ЖЦИ состоит из интеллектуальных подсистем управления его отдельными этапами с изначальной ориентацией на возможность адаптивного построения и согласованной корректировки планов по событиям, поступающим в реальном времени. Согласованность решений отдельных интеллектуальных систем при этом обеспечивается за счет разработки многоуровневой адаптивной р2р сети указанных систем, в отличие от традиционно используемых отношений «ведущий-ведомый» в каскадной модели бизнес-процессов управления предприятиями (рис. 2). Такая архитектура реализует основной принцип сетецентрического подхода — «Решать проблемы настолько локально, насколько возможно, и настолько глобально, насколько требуется». Только в том случае, если не удастся решить проблему в одной из систем, начинается цепная реакция взаимодействий с другими системами, подобная расходящейся волне.

Согласно сетецентрическому подходу, многоуровневая адаптивная р2р сеть интеллектуальных PLM-систем включает систему стратегического планирования в целом на большой горизонт времени и систему оперативного управления, которые совместно обеспечивают согласованное принятие решений на всех стадиях жизни изделия и быструю, адаптивную реакцию на любые непредвиденные события на более короткий горизонт. Это является принципиальным моментом, с учетом того, что пункты проектирования, сборки и технического обслуживания изделия могут находиться на большом расстоянии друг от друга.

Общая схема работы «системы систем» под управлением стратегического планировщика показана на рис. 3. Системы нижнего уровня обеспечивают проектирование изделия (Smart Design), его производство (Smart Factory) и эксплуатацию (Smart Maintenance). Различные центры обслуживания конкретного экземпляра изделия собирают и обрабатывают информацию и статистику отказов, наработку узлов, динамику изменения показателей работы. В случае выхода одного или нескольких параметров за пределы нормативных планировщик передает запрос о возможности изменения либо требований к изделию и его перепроектирования или изменения конструкции, либо особенностей технологического процесса изготовления изделия.



■ **Рис. 2.** Сетецентрический подход к управлению в распределенной интеллектуальной PLM-системе



■ **Рис. 3.** Взаимодействие систем в рамках Smart Strategic PLM Planner

В такой системе стратегический планировщик, построив первую грубую версию плана, «сбросит» ее вниз на согласование оперативным планировщикам центров компетенций, которые, спланировав свою работу автономно, начнут переговоры по горизонтали для согласования своих оперативных планов. Успешно созданные «внизу» планы будут взяты в разработку, а воз-

никающие проблемы, где центрам компетенций не удалось договориться, доведены до стратегического планировщика для получения помощи в разрешении конфликтных ситуаций и выделении дополнительных ресурсов. Получив такое разрешение, конфликтующие центры смогут перепланировать свою работу и прийти к соглашению.

## Модели и методы для реализации сетецентрического подхода

Система построена на базе мультиагентного подхода [9]. Каждому элементу реальной конструкции и оборудования ставится в соответствие программный агент, выступающий от имени своего элемента. Задачи, возникающие на различных этапах ЖЦИ, должны быть запланированы и затем выполнены в реальном времени. Таким задачам также ставятся в соответствие агенты. При выполнении задач используются разнообразные ресурсы. Все сообщество агентов может быть реализовано в виде динамической сети задач и ресурсов, представляющей собой сеть потребностей и возможностей [10]. Поведение мультиагентных систем не определяется одним детерминированным алгоритмом, а формируется эволюционным путем как результат взаимодействия составляющих ее агентов.

В основе мультиагентной PLM-системы лежит концептуальная модель изделия на основе онтологии, которая состоит из элементов, организованных в системы, где выход одного элемента или системы является входом другого элемента или системы, при этом формируются функциональные связи [11]. Все элементы и системы связаны также пространственными отношениями, по которым можно выявить развитие износа, отказов и аварийных ситуаций. Например, если какой-то элемент начал нагреваться и температура начала повышаться, то по пространственным отношениям можно определить, на работоспособность каких элементов, находящихся рядом, это может повлиять.

Концептуальная модель предполагает, что каждое изделие, исходя из этапов его жизненного цикла, имеет различные характеристики, позволяющие описывать его состояние в каждый момент времени, отслеживать происходящие с ним изменения посредством обработки информации, поступающей из других систем, и осуществлять поддержку принятия решения о необходимости выполнения каких-либо операций над изделием в целях повышения его надежности.

## Пример возможной реализации и взаимодействия систем управления ЖЦИ

Пусть имеется концептуальная модель ЛА и среды его эксплуатации, на основе которой можно отслеживать различные ситуации. Так, два ЛА одной серии могут начинать свою жизнь практически идентичными, но вследствие их эксплуатации в различных условиях, различной динамики отказов и периодической замены выходящих из строя узлов и агрегатов их характеристики со временем начнут существенно

отличаться, требуя индивидуальных подходов в техническом обслуживании. Например, один ЛА эксплуатируется в северных регионах с пониженной температурой, а другой ЛА — в южных регионах с повышенной температурой и песчаной почвой. Агенты всех деталей постоянно проверяют условия, в которых они эксплуатируются, вычисляют риски поломки или преждевременного выхода из строя и предлагают действия по обслуживанию или замене детали, что приводит к перепланированию в системе. Если в определенных условиях эксплуатации одна и та же деталь постоянно выходит из строя, эта информация передается в подсистему Smart Design для изменения требований к узлам и условиям их эксплуатации и для запуска процессов перепроектирования.

При наступлении событий агенты деталей активизируются, рассчитывают свои риски и вероятность отказа, затем передают эту информацию агентам соседних деталей, которые в ответ либо смягчают риски, корректируя планы действий, либо усиливают их и передают сообщения своим соседям. Если у ЛА, который эксплуатируется на севере при низких температурах, происходит ускоренная деградация масла, агент масла учитывает температуру внешней среды и продолжительность эксплуатации, предлагая заменить масло раньше, чем при эксплуатации в условиях нормальных температур.

При этом в системе возникает волнообразный процесс расчета вероятностей отказа соседних устройств под влиянием обнаруженной локальной проблемы, развивающийся по связям семантической сети онтологии, и определяются необходимые действия по корректировке ситуации. В системе отображается статистика по возможным рискам, наиболее критичные из них выводятся на первый план (планирование и выработка рекомендаций по ним выполняется в первую очередь), а менее критичные учитываются системой позднее (имеют меньший приоритет при планировании). При этом планирование и возвращение ситуации к равновесию происходит на всех уровнях.

На основании этой информации в системе возможно предсказывать отказы и заранее строить планы по обслуживанию и предотвращению возникновения нештатных и аварийных ситуаций. Анализируя вероятность возникновения проблемы по онтологическим связям и ее распространение на другие системы, можно проследить, как возникающие события влияют на общие характеристики ЛА, и сформировать план по своевременному предотвращению потенциально опасных ситуаций.

Новое решение в плане пользовательского интерфейса заключается в том, что рядом с реальным ЛА постоянно «летит» его компьютерная киберфизическая модель, которая подсказывает,

какие операции необходимо выполнить для обеспечения требуемого уровня надежности. В интерфейсе системы пользователи смогут на основе трехмерной модели ЛА увидеть проблемный элемент или систему, выделенные подсветкой, и проследить критические функциональные, пространственные и другие связи с рассчитанными вероятностями распространения текущей проблемы.

Если при постоянных условиях эксплуатации один и тот же узел постоянно выходит из строя, можно сделать заключение о наличии изъянов в его конструкции. После того как в системе Smart Maintenance сделано такое заключение, вся информация об изделии, условиях его эксплуатации и отказах передается в систему Smart Design, где может оказаться целесообразным осуществить полное или частичное перепроектирование изделия в целях получения на выходе новой модификации, не подверженной столь частым отказам в заданных условиях эксплуатации.

Выработанные решения доступны в системе Smart Design через общую шину стратегического планировщика Smart Strategic Planner, который включается в планирование и функционирование Smart Maintenance при невозможности достижения консенсуса в системе, когда полученные планы противоречат планам и функционированию других систем.

Далее стратегический планировщик направляет соответствующие запросы в различные системы планирования (Smart Design, Smart Maintenance и др.), которые взаимодействуют между собой на основе сетецентрического подхода. При этом перестраиваются все планы различных уровней для возвращения ситуации к норме. Система постепенно переходит в новое состояние равновесия, соответствующее новому распределению потребностей и возможностей или новым планам использования ресурсов. Например, необходимо произвести замену отказавшего блока при очередном сеансе технического обслуживания, а если его нет в наличии, требуется срочно доставить новый блок на базу обслуживания и ремонта, изменив планы работ наземных служб по доставке. Нарушение текущих планов, их изменение и корректировка стоят дополнительных временных и денежных затрат, в результате чего должны быть скорректированы стратегические планы и выполняемые работы.

## Заключение

Разрабатываемая система может как полностью автономно использоваться, так и интегрироваться с существующими системами управления жизненным циклом, что значительно расширяет рынок сбыта для конечного продукта.

Предлагаемая многоярусная структура распределенной сети взаимодействующих интеллектуальных систем управления жизненным циклом позволит на практике реализовать холонический подход к управлению предприятиями аэрокосмической отрасли, создав такую архитектуру, которая полностью соответствует структуре самого предприятия.

В предлагаемом подходе будет реализовано взаимодействие мультиагентных систем, показывающее коэволюцию самоорганизующихся систем. Создание такого рода новых интеллектуальных систем для перехода к реальному времени при управлении ЖЦИ аэрокосмической промышленности, позволяющих работать в условиях неопределенности и высокой динамики изменений, когда ни динамика будущих отказов, ни условия обслуживания ЛА заранее не известны, когда необходимо согласование бизнес-процессов баз технического обслуживания, находящихся на расстоянии в тысячи километров и в разных часовых поясах, будет достигнуто впервые в мире, заместив устаревшие в этом отношении компоненты традиционных систем, ориентированных на классические «пакетные» формы обработки.

Данный подход обеспечивает такие важные преимущества разрабатываемой системы, как повышение качества и эффективности решений по управлению ЖЦИ, открытость к поэтапному подключению к общей системе новых центров внедрения и эксплуатации, высокую оперативность, гибкость и производительность, надежность и живучесть, масштабируемость и высокий уровень интеграции всей PLM-системы, сокращает расходы на использование и сопровождение системы, а также уменьшает риски ее внедрения.

Ожидается, что результатом проводимых исследований и разработок станет создание целого ряда интеллектуальных систем управления ЖЦИ нового поколения, не имеющих аналогов в мире, обеспечивающих существенный рост в 15–40 % эффективности работы предприятий по управлению изделиями на всех этапах жизненного цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ.

## Литература

1. Колчин А. Ф., Овсянников М. В., Стрекалов А. Ф., Сумароков С. В. Управление жизненным циклом продукции. — М.: Анахарсис, 2002. — 304 с.
2. Гореткина Е. В. Что такое PLM? // PCWeek. Russian Edition. 2003. № 34. <http://www.pcweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=65311> (дата обращения: 01.12.2014).

3. Краснухин А. А. Team PDM. Система управления жизненным циклом, которую действительно можно внедрить // САПР и графика. 2001. № 7. <http://www.smarteam.ru/publications/article3/article3.htm> (дата обращения: 05.12.2014).
4. Скобелев П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». 2013. № 1. С. 1–32.
5. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity. — WIT Press, 2014. — 198 p.
6. Судов Е. В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции: Принципы. Технологии. Методы. Модели. — М.: MBM, 2003. — 240 с.
7. Новая концепция создания интеллектуальных систем управления жизненным циклом на принципах сетцентрического управления, онтологий и мультиагентных технологий / В. И. Баклашов, В. А. Комаров, О. И. Лахин, Е. В. Полончук, П. О. Скобелев, В. Ф. Шпилевой // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1(5). С. 1296–1298.
8. Абрамов Д. В., Андреев В. В., Симонова Е. В., Скобелев П. О. Разработка средств построения и использования онтологий для поддержки процессов принятия решений // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. VII Междунар. конф., Самара, 27 июня–1 июля 2005 г. / СНЦ РАН. Самара, 2005. С. 435–440.
9. Мультиагентные технологии для разработки сетцентрических систем управления/ А. В. Иващенко, О. В. Карсаев, П. О. Скобелев, А. В. Царев, Р. М. Юсупов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2011. № 3. С. 11–23.
10. Виттих В. А., Скобелев П. О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребителей и возможностей в открытых системах // Автоматика и Телемеханика. 2003. № 1. С. 177–185.
11. Распределенные онтологии и их применение в решении задач интеграции данных/ В. А. Виттих, Д. В. Волхонцев, А. Н. Гинзбург, М. А. Караваев, П. О. Скобелев, О. Л. Сурнин, М. А. Шамашов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. VIII Междунар. конф., Самара, 24–28 июня 2006 г. / СНЦ РАН. Самара, 2006. С. 451–459.

UDC 658.512.6

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.4

**Complexity Theory and Challenges of Aerospace Products Lifecycle Management**Lakhin O. I.<sup>a</sup>, Project Manager, [lakhin@yandex.ru](mailto:lakhin@yandex.ru)Polnikov A. S.<sup>b</sup>, Analyst, [polnikov@smartsolutions-123.ru](mailto:polnikov@smartsolutions-123.ru)Simonova E. V.<sup>a, b</sup>, PhD, Associate Professor, Leading Analyst, [simonova@smartsolutions-123.ru](mailto:simonova@smartsolutions-123.ru)Skobelev P. O.<sup>a, b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, Chief Executive Officer, [petr.skobelev@gmail.com](mailto:petr.skobelev@gmail.com)<sup>a</sup>Software Engineering Company «Smart Solutions», 17, Moskovskoe St., 443013, Samara, Russian Federation<sup>b</sup>Samara State Aerospace University, 34, Moskovskoe St., 443086, Samara, Russian Federation

**Purpose:** All the existing product lifecycle management systems use different techniques and their knowledge is poorly structured. For that reason, newly introduced systems are used only partially and often just at the early stages of the product lifecycle. A novel network-centric approach to complex aerospace product lifecycle management is discussed in this article. **Methods:** An intelligent network-centric system Smart PLM (which is a superstructure over the traditional PLM systems) is proposed. Smart PLM consists of interconnected systems of control over separate lifecycle stages in which all the occurring problems are solved locally whenever possible and globally otherwise. **Results:** A network-centric architecture concept was developed for control over traditional systems of product lifecycle management. Benefits of the proposed approach were shown on the example of complex aerospace products. The basic components of Smart PLM were described along with their interaction mechanism. The decision was justified to use ontologies for the domain area description and multi-agent approach for building up a demand-resource network for the scheduling of all stages of the product lifecycle. Logical architecture of a distributed multi-agent system was designed. The developed models, methods and algorithms of decision-making support in separate system components help to provide an appropriate response to any events which occur through all the stages of the aerospace products lifecycle. **Practical relevance:** The developed system architecture can be applied either autonomously or through the integration in a single complex with the existing PLM systems. The proposed adaptive approach to the lifecycle management of aerospace products will help to increase their reliability and reduce the operating costs through timely interaction and considering the requirements of all the participants at various lifecycle stages.

**Keywords** — Product Lifecycle, Lifecycle Management, PLM-System, Decision-Making Support, Adaptive Management, Network-Centric Architecture, Multi-Agent Technology, Strategic Scheduling, Domain Ontology, Cyber-Physical Model.

**References**

1. Kolchin A. F., Ovsiannikov M. V., Strekalov A. F., Sumarokov S. V. *Upravlenie zhiznennym tsiklom produktsii* [Management of the Product Lifecycle]. Moscow, Anakharsis Publ., 2002. 304 p. (In Russian).
2. Goretkina E. V. *Chto takoe PLM?* [What is PLM?]. *PCWeek. Russian Edition*, 2003, no. 34(400). Available at: <http://www.pcweek.ru/industrial/article/detail.php?ID=65311> (accessed 1 December 2014).
3. Krasnukhin A. A. *Team PDM. Sistema upravleniia zhiznennym tsiklom, kotoruiu deistvitel'no mozjno vnedrit'* [Team PDM. Lifecycle Management System, Which Can Be Really Integrated]. *SAPR i grafika*, 2001, no. 7.

- Available at: <http://www.smarteam.ru/publications/article3/article3.htm> (accessed 5 December 2014) (In Russian).
4. Skobelev P. O. Intelligent Systems for Real Time Resource Management: Principles, Experience and Perspectives. *Prilozhenie k teoreticheskomu i prikladnomu nauchno-tekhnicheskomu zhurnalu «Informacionnye Tehnologii»*, 2013, no. 1, pp. 1–32 (In Russian).
  5. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity. WIT Press, 2014. 198 p.
  6. Sudov E. V. *Integririvannaia informatsionnaia podderzhka zhiznennogo tsikla mashinostroitel'noi produkcii: Printsipy. Tekhnologii. Metody. Modeli* [Integrated Information Lifecycle Support of Engineering Products: Principles. Technology. Methods. Models]. Moscow, MVM Publ., 2003. 240 p. (In Russian).
  7. Baklashov V. I., Komarov V. A., Lakhin O. I., Polonchuk E. V., Skobelev P. O., Shpilevoy V. F. The New Concept of Creation the Life Cycle Intellectual Control Systems on the Principles of Network-Centric Management, Ontologies and Multi-Agent Technologies. *Izvestiia Samarshogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no. 1(5), pp. 1296–1298 (In Russian).
  8. Abramov D. V., Andreev V. V., Simonova E. V., Skobelev P. O. *Razrabotka sredstv postroeniia i ispol'zovaniia ontologii dlia podderzhki protsessov priniatiia reshenii* [Development of Tools for Ontologies Design and Application for Decision-Making Processes Support]. *Trudy VII Mezhdunarodnoi konferentsii “Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh”* [Proc. VII Intern. Conf. “Problems of Control and Modeling in Complex Systems”]. Samara, 2005, pp. 435–440 (In Russian).
  9. Ivaschenko A. V., Karsaev O. V., Skobelev P. O., Tzarev A. V., Usupov R. M. Multi Agent Technology for Development of Network-Centric Control Systems. *Izvestiya IuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 3(116), pp. 11–23 (In Russian).
  10. Vittikh V. A., Skobelev P. O. Multi-Agent Interaction Models for Constructing the Needs-and-Means Networks in Open Systems. *Avtomatika i Telemekhanika*, 2003, no. 1, pp. 177–185 (In Russian).
  11. Vittikh V. A., Volkhontsev D. V., Ginzburg A. N., Karavaev M. A., Skobelev P. O., Surnin O. L., Shamashov M. A. *Raspredelemnnye ontologii i ikh primenenie v reshenii zadach integratsii dannykh* [Distributed Ontologies and their Application to Data Integration Problems Solving]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii “Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh”* [Proc. VIII Intern. Conf. “Problems of Control and Modeling in Complex Systems”]. Samara, 2006, pp. 451–459 (In Russian).

#### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 004.042+004.274

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.13

## МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ПУЛОВ В ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**В. В. Грызунов<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в процессе эксплуатации информационно-вычислительных систем военного назначения возможно как резкое увеличение объема решаемых задач, так и деградация систем по причинам естественных отказов и (или) целенаправленного воздействия противника. Такие ситуации характеризуются дефицитом ресурсов информационно-вычислительных систем и в общем случае нестохастической средой функционирования. Целью исследования является решение проблемы распределения ресурсов под задачи в нестохастической среде методами теории адаптивного управления. **Методы:** формализация информационно-технических воздействий противника для описания возможностей противника по изменению структуры информационно-вычислительной системы, что позволяет создавать модель системы непосредственно в ходе управления; формирование пула (агрегирование ресурсов) в процессе решения модифицированной задачи об упаковке контейнеров. Оперативность решения достигается многошаговым сужением множества альтернатив и применением принципа постепенного распространения задач по системе. **Результаты:** предложен метод, адаптирующий текущую структуру распределенной гетерогенной информационно-вычислительной системы, содержащей стационарные и мобильные элементы, таким образом, чтобы собрать пулы, достаточные для решения поставленных задач. Пул собирается из вычислительных устройств, каналов связи, устройств ввода-вывода, накопителей. Изначально пул включает в себя точку входа задачи, т. е. элемент, на котором начинается выполнение задачи. Затем пул расширяется элементами, ему смежными. Процедура расширения пула повторяется до тех пор, пока не будут исчерпаны все ресурсы системы или не будет сформирован пул с требуемыми характеристиками. Сформированный пул не является оптимальным, однако время его формирования близко к реальному. Доказаны сходимость и завершаемость предлагаемого метода; приведен пример и показаны условия применения метода. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть использованы при создании единого информационного пространства различных министерств и служб, в автоматизированных системах военного назначения.

**Ключевые слова** — формирование пулов, адаптация структуры информационно-вычислительной системы, дефицит ресурсов.

### Введение

Информационно-вычислительные системы (ИВС) военного назначения обеспечивают решение большого количества разноплановых задач: от обработки изображений заданных районов и селекции целей до предоставления услуг оперативной и высококачественной связи. Объем и требуемые сроки решения задач зависят от сложившейся обстановки и могут изменяться скачкообразно. Другая особенность ИВС обусловлена тем, что они являются приоритетным объектом информационно-технических воздействий (ИТВ), а значит, могут разрушаться в процессе решения поставленных задач. Таким образом, в ходе эксплуатации ИВС неизбежно возникают следующие проблемы, связанные с дефицитом ресурса:

- структура ИВС сохранена, но интенсивности потоков задач существенно возрастают;
- часть ИВС разрушена, а интенсивности потоков решаемых задач изменяются слабо;
- часть ИВС разрушена и интенсивности потоков задач существенно возрастают.

Интенсивности потоков решаемых задач возрастают, например, при переводе войск в высшие

степени боевой готовности. При определенных ограничениях такие потоки могут быть описаны как стохастические процессы.

Причинами разрушения ИВС выступают естественные сбои и (или) отказы элементов ИВС, которые описываются стохастическими процессами, а также ИТВ, которые в общем случае описать в виде стохастических процессов невозможно [1].

Поскольку ИВС как система, работающая со стохастическими потоками отказов и восстановления, а также со стохастическими потоками задач и обслуживания, достаточно хорошо изучена, заострим внимание лишь на работе ИВС в условиях ИТВ.

### Модель информационно-технических воздействий

Под ИТВ будем понимать целенаправленные разрушающие воздействия на процесс генерации, обработки, хранения и передачи данных в ИВС. Приведенное определение охватывает довольно широкий класс воздействий — от сугубо компьютерных (внедрение вирусов, атаки DoS, IP Spoofing и т. д.) до физических воздействий

на элементы инфраструктуры ИВС (уничтожение канала связи, подрыв серверов, воздействие электромагнитными импульсами и т. д.). Возможности ИТВ по воздействию на ИВС будут выглядеть следующим образом:

$\Psi_S$  — множество операций разрушения структурного элемента;

$\Psi_F$  — множество операций разрушения функционального элемента.

В результате ИТВ может быть разрушен какой-то узел ИВС, канал связи, изменено количество связей, которое может образовать узел.

Разрушение одного структурного элемента обязательно влечет за собой изменение возможностей ИВС по реализации одной или более функций (обнаружить объект, предоставить или зарезервировать канал связи и т. д.):  $\Psi_S = 1 \rightarrow \Psi_F \geq 1$ .

Таким образом, интересующая нас модель ИТВ описывает возможности противника по воздействию на ИВС в следующем виде:  $\Psi = \{\Psi_S, \Psi_F\}$ .

Из модели следует, что ИТВ приводит к изменению свойств ИВС и дефициту ресурсов. Формализовав модель ИТВ подобным образом, рассмотрим ИВС как распределенные системы, содержащие как стационарные, так и мобильные элементы.

Объектами ИТВ в ИВС выступают следующие ресурсы: вычислители (бортовые и наземные вычислительные комплексы), каналы связи (спутниковые, проводные, оптические и т. д.), накопители данных (накопители на борту космических аппаратов и в вычислительных центрах), устройства ввода-вывода данных (стандартные: клавиатура, монитор, принтер; расширенные: оптико-электронные, радиоэлектронные системы и т. д.).

### Формализация задачи адаптивного управления информационно-вычислительной системой

Выделим отличительные особенности ИВС:

— интенсивности потоков поступления и обработки задач слабо прогнозируемы, что влечет за собой неопределенность в использовании ресурсов ИВС;

— структура ИВС является недетерминированной и динамично изменяемой. Основными причинами изменения структуры выступают:

- перемещение мобильных элементов ИВС: космических аппаратов на околоземных орбитах, самолетов на маршрутах патрулирования и т. д. (могут описываться закономерностями детерминированных или стохастических процессов); мобильных комплексов управления, маневрирующих летательных аппаратов и т. п. (являются нестохастическими процессами [1]);

- отказы и сбои элементов ИВС по естественным причинам (стохастические процессы) и (или)

в случаях информационно-технических воздействий противника (нестохастические процессы [1]).

Наиболее полно модели и методы, описывающие работу ИВС с изменяемой (программируемой) структурой, приведены в работе [2]. Однако сфера применения изложенных в этой работе методов и моделей ограничена стохастической средой, что лишь частично отражает особенности ИВС.

Названные особенности могут быть учтены при адаптивном изменении структуры ИВС. Пример такого изменения — динамическое объединение ресурсов в соответствующие пулы. Пул — временное объединение ресурсов, предназначенное для решения какой-то задачи (группы задач). Пул существует в период решения задачи, после решения задачи пулы могут быть расформированы. Отметим, что с точки зрения динамического формирования пулов проблемы, названные в начале статьи и связанные с дефицитом ресурса, идентичны. Примером статичного пула из вычислителей служит кластер, пула из каналов связи — транк. Пул формируется на уровне логической структуры (УЛС) ИВС. Требования к пулу задаются на уровне программного обеспечения (УПО). Детально модель ИВС как иерархической системы с обратными связями между уровнями представлена в работе [3].

Типовые методы формирования пулов реализованы в следующих технологиях:

— кластерах на базе *Windows Server 2012*. Кластер задается статически, что не соответствует особенностям ИВС;

— *Dynamic Trunking Protocol (DTP)*, разработанном компанией Cisco для формирования транков (пулов из каналов связи). Транки могут создаваться в реальном масштабе времени. Полную информацию о работе протокола найти не удалось, возможности протокола по формированию пулов из вычислителей, накопителей и устройств ввода-вывода неизвестны;

— пуле ресурсов *Sun Solaris 11.x*, наиболее подходящем для решения задач ИВС, так как он создается динамически. Однако каждый ресурс привязывается к конкретному приложению заранее, т. е. фактически в Sun Solaris производится выбор подходящей конфигурации пула, но сами конфигурации задаются администратором заранее.

Предложим метод формирования пулов, свободный от указанных выше недостатков. Допустим, что нам известны состояния и возможности всех элементов ИВС. Будем утверждать, что семантическое наполнение решаемых в ИВС задач при формировании пула несущественно, что для ИВС важны такие характеристики, как представление данных задачи (плавающая/фиксированная

точка, количество разрядов и т. п.), объем и скорость ввода/вывода данных, процент допустимых потерь, требуемое время реакции ИВС и т. п. Фактически, основное назначение ИВС — удовлетворить требования выполняемой задачи по производительности. Следовательно, любая задача может быть представлена в ИВС в виде набора требуемых для ее решения производительностей, и главное назначение пула — создать требуемую производительность. Рассмотрим производительность как количество задач, решенное в единицу времени. Любая ИВС имеет в своем составе вычислители, каналы связи, устройства ввода-вывода и память. Основное назначение вычислителей — проводить вычисления (выполнять команды/операции), назначение каналов связи — передавать данные, устройств ввода-вывода — вводить/выводить данные, накопителей — запоминать данные. Производительностью вычислителей, зачастую, называют количество выполняемых операций в секунду, производительностью каналов — пропускную способность. Текущей производительностью  $\Omega$  будем считать производительность, доступную для решения задачи, т. е. производительность, которая может быть выделена задаче. Требуемой производительностью  $\Omega^{\text{треб}}$  назовем производительность, которую необходимо предоставить задаче, чтобы она была решена с требуемой точностью за заданное время.

Формирование пула является комбинаторной задачей, которая может быть сведена к модифицированной задаче об упаковке контейнеров, где:

$N^{\text{треб}}$  — требуемое количество пулов (количество контейнеров);

$N$  — текущее (доступное) количество пулов;

$\Omega_i^{\text{треб}}$  — требуемая производительность  $i$ -го пула (размер контейнера);

$\Omega_i$  — текущая производительность  $i$ -го пула;

$\omega_j \in \cup_{i=1}^N \Omega_i, j=1, \text{card}(V)$  — текущая производительность  $j$ -го элемента (размер упаковываемого объекта);

$V$  — множество элементов ИВС (множество упаковываемых объектов).

Требуется найти функцию со свойствами

$$f^{\text{OEÑ}} : \left( \Delta \Omega_j = \Omega_j^{\text{доб}} - \Omega_j \rightarrow 0, \Delta N = N^{\text{доб}} - N \rightarrow 0 \right), \\ i = \overline{1, N}$$

при ограничениях  $\Omega_j \geq \Omega_j^{\text{доб}}, N = N^{\text{доб}}$ .

Найденная функция позволит компенсировать дефицит производительности путем реконфигурации ИВС.

### Решение задачи

Количество возможных комбинаций элементов в пуле нелинейно увеличивается с удалением от точки входа задачи (элемента ИВС, на котором

начинается выполнение задачи). Вместе с тем ИВС должна формировать пулы в реальном или близком к реальному масштабу времени, поэтому существует необходимость снижения количества возможных комбинаций, которые должна проанализировать система управления пулами  $f^{\text{УЛС}}$ . Снижение количества возможных комбинаций может быть реализовано посредством применения принципа постепенного распространения задач по ИВС, предполагающего формирование пула из элементов ИВС, которые:

1) подходят для этого (обладают минимально допустимой производительностью);

2) находятся на минимальном расстоянии от точки входа задачи. В качестве расстояния могут выступать различные величины: *hop*; число связей, образованных элементом; число путей, проходящих через элемент, и т. п.

Принцип постепенного распространения задач по ИВС лежит в основе метода динамического формирования пулов.

Введем следующие обозначения:

$\omega_i^{\text{min}} > 0$  — минимальная допустимая производительность элемента в  $i$ -м пуле;

$r_{\omega_j}$  — радиус  $j$ -го элемента в  $i$ -м пуле:

$$r_{\omega_j} = \frac{\omega_i^{\text{min}}}{\omega_j}$$

$V_r \subset V$  — множество элементов, из которых формируются пулы;

$V$  — множество элементов ИВС;

$V_r$  — упорядоченное множество элементов-кандидатов, которые могут участвовать в формировании пулов;

$V_{\Omega_j}$  — множество элементов, запланированных в  $i$ -й пул;

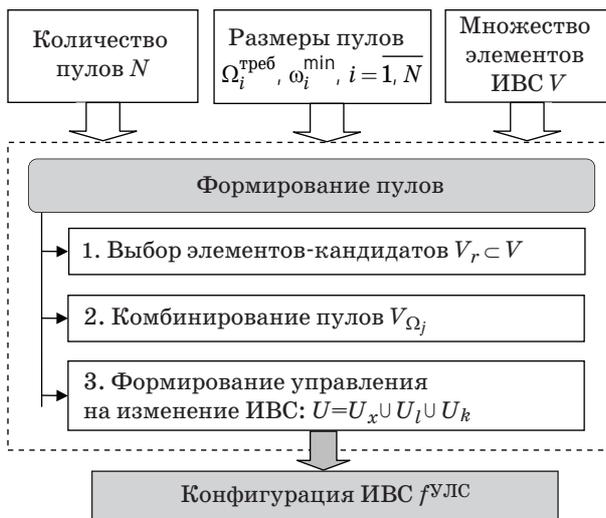
$x_j$  — количество физических связей  $j$ -го элемента;

$U_x$  — множество команд на образование физических связей. Физическая связь — связь на физическом уровне или MAC-подуровне канального уровня модели OSI;

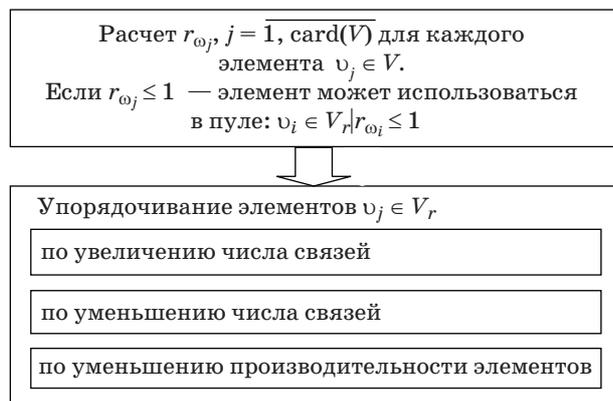
$U_l$  — множество команд на образование логических связей. Логическая связь — связь, образованная на LLC-подуровне канального уровня, сетевом или транспортном уровнях модели OSI;

$U_k$  — множество команд на физическое перемещение элементов.

Входными данными для предлагаемого метода динамического формирования пула являются: количество пулов  $N$ ; размеры пулов  $\Omega_j^{\text{доб}}, j=1, N$ ; минимально возможная производительность элемента в  $i$ -м пуле  $\omega_i^{\text{min}} > 0$ , текущая производительность  $j$ -го элемента  $\omega_j > 0$ . Схема метода приведена на рис. 1. На первом шаге производится сужение множества возможных комбинаций путем выбора и упорядочивания элементов-кандидатов, подходящих для формирования пула.



■ Рис. 1. Схема метода динамического формирования пулов



■ Рис. 2. Шаг 1 метода формирования пулов

**Шаг 1.** Выбор элементов-кандидатов (рис. 2).

Выбор подходящих элементов производится на основании значения радиуса элемента  $r_{\omega_j}$ . Если  $r_{\omega_j} \leq 1$ , значит элемент обладает необходимой минимальной производительностью и может использоваться в пуле. Элементы, для которых  $r_{\omega_j} \leq 1$ , составляют множество  $V_r$ . После отбора элементов производится их упорядочивание. Правило упорядочивания может быть различным, например, по уменьшению текущей производительности элемента  $\omega_j$ .

По итогам работы первого шага метода получаем упорядоченное множество элементов-кандидатов  $V_r$ , которые могут участвовать в формировании пула. Это множество служит исходными данными для второго шага метода.

**Шаг 2.** Комбинирование пула (рис. 3).

На втором шаге производится дополнительное сужение множества возможных комбинаций, отбираются элементы ИВС, смежные с точкой

входа решаемой задачи (расстояние до точки входа 1).

Точка входа  $v^*$  — элемент, на котором начинается выполнение задачи. В общем случае точка входа может быть неизвестна.

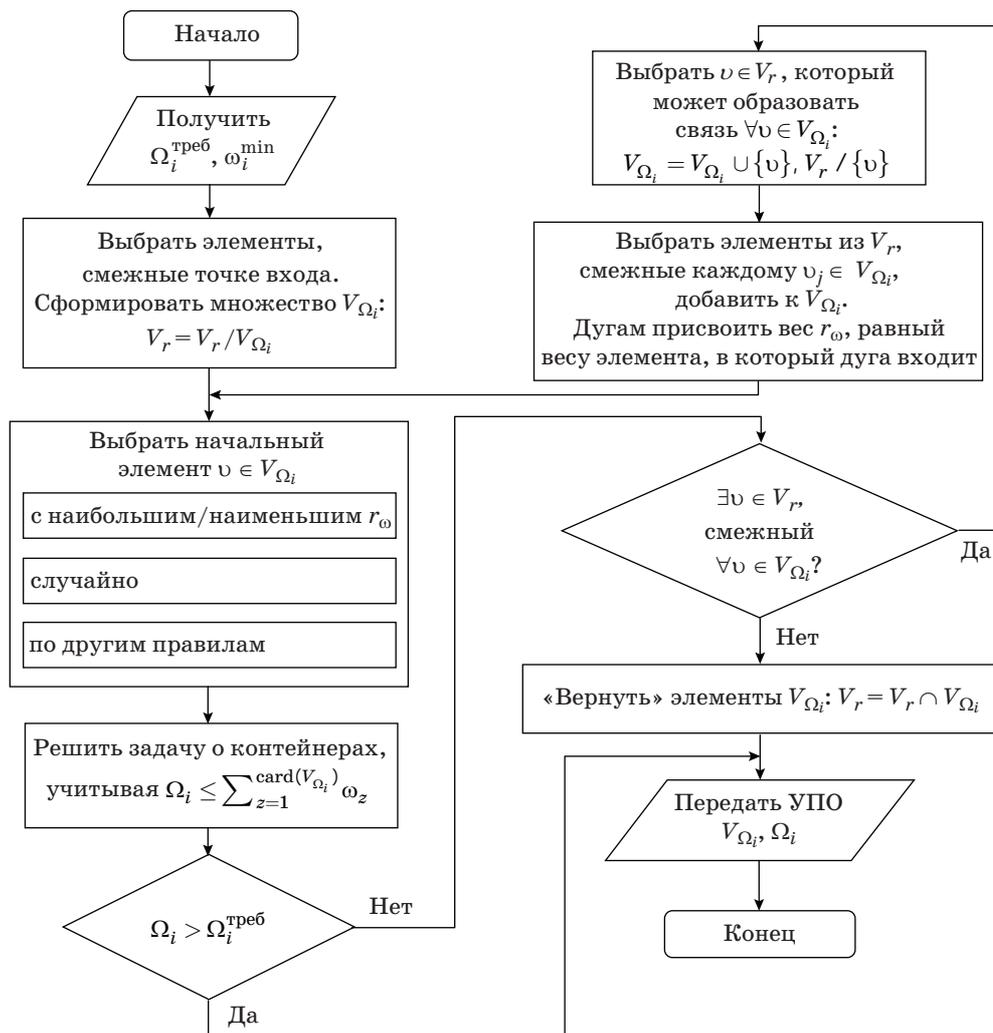
После отбора смежных элементов решается модифицированная задача по упаковке контейнеров. Если пул с требуемой производительностью не может быть скомбинирован на элементах, смежных с точкой входа решаемой задачи, то производится попытка скомбинировать пул с использованием элементов ИВС, смежных с теми, которые уже входят в комбинацию (расстояние до точки входа 2). Далее производится проверка на соответствие скомбинированного пула предъявляемым требованиям. Если скомбинирован пул с требуемой производительностью, то переходим к шагу 3, иначе повторяются действия по комбинированию пула с использованием элементов, уже входящих в пул (расстояние до точки входа 3). И так далее, до тех пор, пока не будет скомбинирован пул с требуемой производительностью или не будут исчерпаны все элементы, имеющие физическую связь. Если пул так и не был скомбинирован, то производится попытка образовать комбинации с использованием элементов, между которыми может быть установлена физическая связь, например, с мобильными перемещаемыми устройствами (беспилотными летательными аппаратами, подвижными центрами обработки данных и т. п.). Затем выполняются операции по комбинированию пула согласно правилам шага 2. Результаты комбинирования пула передаются системе управления задачами, запросившей ресурс, т. е. на УПО, где принимается решение о целесообразности использования скомбинированного пула. Если пул целесообразно использовать, выдаются команды на его формирование, т. е. на физическое перемещение/коммутацию элементов ИВС (шаг 3), образование физических и (или) логических связей.

**Шаг 3.** Формирование управления на изменение (рис. 4).

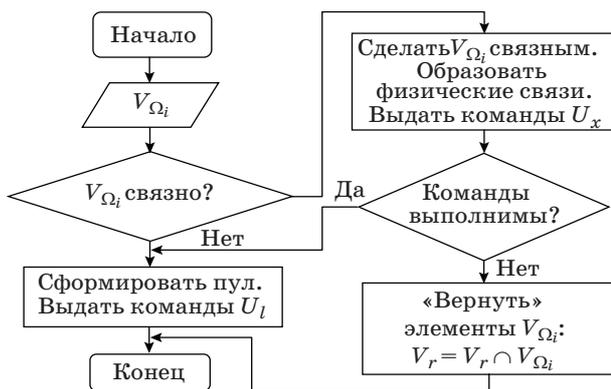
На данном шаге выполняется проверка на физическую связность комбинаций, созданных на шаге 2. Если между всеми элементами ИВС, входящими в комбинацию, существует физическая связь, то реализуется формирование пула, т. е. образуются требуемые логические связи. Иначе по специальному алгоритму формируются новые связные сегменты.

В случае нескольких возможных вариантов формирования пула могут предъявляться дополнительные требования к структуре, например, по максимизации живучести [4].

После формирования  $i$ -го пула шаги 1–3 метода повторяются для  $i + 1$  пула.



■ Рис. 3. Шаг 2 метода формирования пулов



■ Рис. 4. Шаг 3 метода формирования пулов

Предлагаемый метод целесообразно применять в случае, если производительность существующего пула  $\Omega_i$  меньше требуемой  $\Omega_i^{обд\ddot{a}a}$ :

$$\Omega_j < \Omega_j^{обд\ddot{a}a}, \Omega_j^{обд\ddot{a}a} = \text{const.}$$

Если в ходе выполнения метода был изменен поток задач, вызвавший изменение требований к пулам ( $\Omega_j^{обд\ddot{a}a}, \omega_j^{min}, j = \overline{1, M}$ ), либо произошли ИТВ, изменившие состав ИВС ( $V$ ), то на уровне программного обеспечения может быть принято решение выполнить метод сначала.

Очевидно, метод целесообразно использовать для распараллеливаемых задач. Задача, которая не может быть распараллелена, представляется в виде единственного пула с минимальной допустимой производительностью  $\Omega$ .

Предлагаемый метод оптимизирует функцию  $\Omega_i \leq \sum_{z=1}^{card(V_{\Omega_i})} \omega_z$ . Элементы ИВС, на базе которых формируются пулы, обладают  $\omega_z > 0$ , следовательно, на каждом шаге метода (при каждом добавлении элемента, обладающего производительностью  $\omega_z$ ) происходит положительное приращение (монотонное возрастание)  $\Omega_i$ . Следовательно, метод сходится, а  $\Omega_i$  стремится к  $\Omega_{max}$ .

Метод выполняется, пока  $\Omega_j < \Omega_j^{обд\ddot{a}a}$  либо пока  $V_r \neq \emptyset$ . На каждом шаге увеличивается  $\Omega_i$

и уменьшается  $V_r = V_r/\{v\}$ . Так как  $V_r$  и  $\{v\}$  ограничены и замкнуты, следовательно,  $\text{card}(V_r) < \infty$ , а значит, метод завершаем.

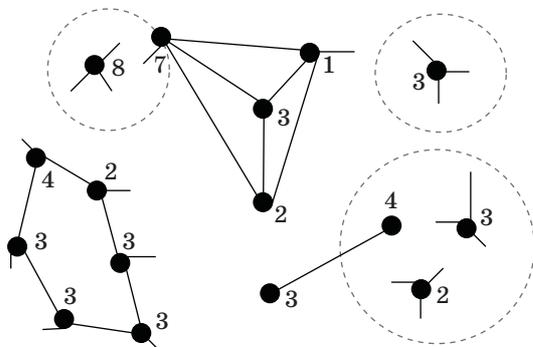
Работоспособность предложенного в статье метода проверена путем построения имитационной модели в среде MatLab 7.0 [5].

### Пример применения метода динамического формирования пулов

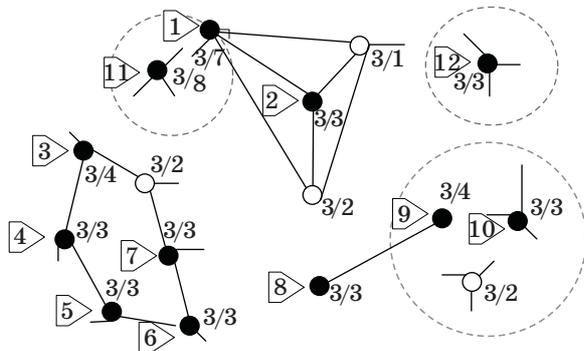
Приведем пример применения предложенного метода для формирования пулов  $\Omega = \{ \langle \Omega_i, \omega_i^{\min} \rangle \} = \{ \langle 16, 3 \rangle, \langle 18, 3 \rangle, \langle 3, 3 \rangle, \langle 4, 3 \rangle \}$  в произвольной ИВС, обладающей структурой, представленной на рис. 5. Цифрами на рисунке отмечены производительности элементов  $\omega_j$ , измеряемые в условных единицах. Штрихпунктиром обозначены «видимости» элементов ИВС. Если элементы находятся внутри пунктирной линии, значит, между ними может быть установлена физическая связь.

Формируем первый пул с характеристиками  $\Omega = \{ \langle \Omega_1, \omega_1^{\min} \rangle \} = \{ \langle 16, 3 \rangle \}$ :

— рассчитываем радиусы элементов  $r_\omega$  и формируем множество  $V_r$  (рис. 6). Множество сформировано элементами, обозначенными закрашенными кругами;



■ Рис. 5. Структура ИВС и производительности элементов  $\omega_j$



■ Рис. 6. Формирование множества  $V_r$

— производим упорядочивание элементов  $V_r$  по числу существующих физических связей. Порядковые номера элементов множества  $V_r$  отмечены цифрами в указателях. Множество  $V_r = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ .

Ограничение для примера: предположим, что производительность каналов связи (пропускная способность) и производительность любого элемента достаточны для передачи данных (элемент способен выполнять транзит данных).

На втором шаге производим *комбинирование пула*.

1. Предположим, что точка входа для задачи  $v_1$  — элемент с номером 1, поэтому сразу включаем его в  $V_{\Omega_1}$ :

$$V_r = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}, V_{\Omega_1} = \{1\}, \Omega_1 \leq 7 < 16.$$

2. Добавляем в  $V_{\Omega_1}$  ближайший элемент с наименьшим номером, физически связанный с элементом 1:

$$V_r = \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\},$$

$$V_{\Omega_1} \{1, 2\}, \Omega_1 \leq 7 + 3 = 10 < 16.$$

3. Поскольку не осталось элементов из  $V_r$ , физически связанных с элементами 1 и 2, берем элемент, ближайший к элементу 1, имеющий наименьший номер:

$$V_r = \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12\},$$

$$V_{\Omega_1} = \{1, 2, 11\}, \Omega_1 \leq 10 + 8 = 18 \geq 16.$$

4. Пул  $\langle \Omega_1, \omega_1^{\min} \rangle = \langle 16, 3 \rangle$  скомбинирован.

Аналогично повторяем для остальных пулов.

Комбинируем пул  $i=2$ ,  $\langle \Omega_2, \omega_2^{\min} \rangle = \langle 18, 3 \rangle$ .

Точка входа — вершина № 3.

$$1. V_r = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12\}, V_{\Omega_2} = \{3\}, \Omega_2 \leq 4 < 18.$$

$$2. V_r = \{5, 6, 7, 8, 9, 10, 12\}, V_{\Omega_2} = \{3, 4\}, \Omega_2 \leq 4 + 3 < 18.$$

3. Элементы 5 и 7 имеют одинаковое расстояние до точки входа, равное двум. Мы берем элемент с меньшим номером — 5,  $V_r = \{6, 7, 8, 9, 10, 12\}$ ,  $V_{\Omega_2} = \{3, 4, 5\}$ ,  $\Omega_2 \leq 7 + 3 = 10 < 18$ .

$$4. V_r = \{6, 8, 9, 10, 12\}, V_{\Omega_2} = \{3, 4, 5, 7\}, \Omega_2 \leq 10 + 3 = 13 < 18.$$

$$5. V_r = \{8, 9, 10, 12\}, V_{\Omega_2} = \{3, 4, 5, 7, 6\}, \Omega_2 \leq 13 + 3 = 16 < 18.$$

6. Максимум производительности второго пула  $\Omega_{2\max}$  меньше требуемой на две единицы. Поскольку отсутствуют элементы, с которыми могут быть образованы физические связи, то комбинирование пула заканчивается выдачей сообщения на уровне программного обеспечения о том, что пул с требуемыми характеристиками не может быть скомбинирован. Предположим, что на уровне программного обеспечения принято решение о нецелесообразности использования

такого пула. Удаляем созданную комбинацию и возвращаем элементы в  $V_r$ .

Комбинируем пул  $i = 3$ ,  $\langle \Omega_3, \omega_3^{\min} \rangle = \langle 3, 3 \rangle$ . Точка входа — вершина № 8.

1.  $V_r = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12\}$ ,  $V_{\Omega_3} = \{8\}$ ,  $\Omega_3 \leq 3 \geq 3$ .

2. Пул  $\langle \Omega_3, \omega_3^{\min} \rangle = \langle 3, 3 \rangle$  скомбинирован.

Комбинируем пул  $i = 4$ ,  $\langle \Omega_4, \omega_4^{\min} \rangle = \langle 4, 3 \rangle$ . Точка входа — вершина № 9.

1.  $V_r = \{10\}$ ,  $V_{\Omega_4} = \{9\}$ ,  $\Omega_4 \leq 4 \geq 4$ .

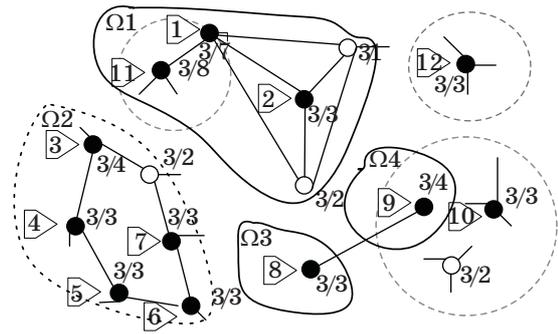
2. Пул  $\langle \Omega_4, \omega_4^{\min} \rangle = \langle 4, 3 \rangle$  скомбинирован.

После выполнения шага 3 и выдачи соответствующих управляющих воздействий ИВС приобретет структуру, показанную на рис. 7. Неудавшийся пул обозначен жирной пунктирной линией. Элементу 11 были выданы команды на перемещение, чтобы появилась возможность установить физическую связь с элементом 1.

Предложенный метод может использоваться для формирования транков, для этого необходимо вершинам графа сопоставить каналы связи. В этом случае  $\omega$  — пропускная способность канала,  $\Omega$  — пропускная способность транка.

При применении метода для создания пулов из устройств ввода-вывода и накопителей данных необходимо вместо закономерности  $\Omega_j \leq \sum_{z=1}^{\text{card}(V_{\Omega_j})} \omega_z$ , связывающей производительности пулов и отдельных элементов, представить другие закономерности, адекватные для устройств ввода-вывода и накопителей.

Физическим воплощением предложенного в статье метода (выделением ресурсов ИВС для возникающих задач) должен заниматься распределенный гипервизор, части которого присут-



■ Рис. 7. Структура ИВС после изменений

ствуют на каждом элементе ИВС. Это позволит реализовать описанный в статье принцип постепенного распространения задач по ИВС, снизить накладные расходы на управление, а главное — продолжать решение задач даже в том случае, когда ИВС «развалится» на несвязные сегменты. Ближайшим централизованным прототипом может выступить система управления кластерами LSF. Идентификацию ресурсов ИВС целесообразно возложить на механизмы, подобные реализованным в сетях Netsukuku, Hyperboria, дополненные механизмами блокировок запрошенных ресурсов и усиленные процедурами аутентификации.

### Заключение

Таким образом, применение метода динамического формирования пулов позволяет решать поставленные задачи в случаях, когда потребности задач превышают доступные ресурсы отдельных элементов ИВС, путем адаптации структуры ИВС, существующей в период решения задачи.

### Литература

1. Калинин В. Н. Теоретические основы системных исследований: краткий авторский курс лекций для адъюнктов академии. — СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. — 278 с.
2. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 520 с.
3. Грызунов В. В. Аналитическая модель целостной информационной системы // Доклады ТУСУР. 2009. № 1(19). Ч. 1. С. 226–230.

4. Грызунов В. В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С. 28–35.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ РФ № 2013617271. Программный комплекс моделирования работы единого информационного пространства в части формирования пулов / В. В. Грызунов, Э. Г. Хамзин (РФ). — № 2013615037; зарег. 07.08.2013.

UDC 004.042+004.274

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.13

**Dynamic Aggregation of Pools in Military Computing Systems**Gryzunov V. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, viv1313r@mail.ru<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Military computing systems can face situations when the amount of the tasks drastically increases, or when the systems degrades owing to natural failures and/or adversary's impact. In these situations, the computing system resources are usually insufficient and the functional environment is generally non-stochastic. This research is devoted to the problem of resource distribution for tasks in a non-stochastic environment using adaptive control theory methods. **Methods:** The informational and technical impact is formalized to specify adversary's opportunities in changing the computing system structure. This helps to create a computing system model in real time during the control process. The pool (assembled resources) is created during the solution of a modified bin packing problem. To speed it up, the set of alternatives is narrowed down step by step, and the tasks are distributed over the system on a phased basis. **Results:** A method was proposed which adapts the current structure of a distributed heterogeneous computing system with stationary and mobile elements in order to assemble pools appropriate for the tasks. A pool is assembled from processors, links, input-output facilities and storage units. Originally, a pool has an entry-point for the task, i.e. the initial element for the task execution. Later the pool is expanded by adjacent elements. The expanding procedure repeats until all the system resources are used up or until a pool with necessary characteristics is assembled. The obtained pool is not optimal but its assembly time is close to real. Convergence and termination of the proposed method were proved. An example was given, and the conditions of using the method were shown. **Practical relevance:** The results of the research can be used for building an integrated informational environment of various governmental services using military automated systems.

**Keywords** — Aggregation of Pools, Computing System Structure Adaptation, Deficit of Resources.

**References**

1. Kalinin V. N. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy: kratkii avtorskii kurs lektsiya dlya ad'yunktov akademii* [The Theoretical Bases of The System Research: Short Author's Course for Advanced Students in Military Academy]. Saint-Petersburg, VKA im. A. F. Mozhaiskogo Publ., 2011. 278 p. (In Russian).
2. Khoroshevskii V. G. *Arkhitektura vychislitel'nykh sistem* [Architecture of The Computer Systems]. Moscow, MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2008. 520 p. (In Russian).
3. Gryzunov V. V. The Analytical Model of the Whole Information System. *Doklady TUSUR*, 2009, no. 1(19), ch. 1, pp. 226–230 (In Russian).
4. Gryzunov V. V. The Estimation of the Survivability of Heterogeneous Structure. *Vestnik SibGUTI*, 2011, no. 1, pp. 28–35 (In Russian).
5. Gryzunov V. V., et al. *Programmnyi kompleks modelirovaniia raboty edinogo informatsionnogo prostranstva v chasti formirovaniia pulov* [Software Modeling Work the Integrated Area of Information in a Part of Assembles Pools]. Patent RF, no. 2013617271, 2013.

УДК 621.383.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.21

## ОБНАРУЖЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АНАЛИЗИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ И ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

И. А. Козин<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** разработка метода обнаружения изменения локальных свойств сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования в интересах решения прикладных задач обработки информации и анализа динамики систем. **Методы:** использование инвариантности относительно сдвига и масштабирования и частотно-временной локализации. **Результаты:** представлено формализованное описание метода обнаружения локальных свойств произвольных сигналов с использованием многомасштабного вейвлет-анализа. Основными операциями обработки сигналов при обнаружении их локальных свойств (особенностей) является анализ вейвлет-коэффициентов малых масштабов и определение интервала корреляции функции, описывающей сигнал. Линии локальных максимумов, объединяющие вдоль оси масштаб на частотно-временной плоскости точки, в которых модули коэффициентов вейвлет-преобразования имеют локальные максимумы, сходятся к некоторым точкам, в которых присутствует особенность. Путем исследования характера изменения локальных максимумов вейвлет-преобразования на различных масштабах определяется расположение и характер локальных особенностей анализируемых сигналов и процессов. Представлен пример использования вейвлет-преобразования спектральных образов наблюдаемых объектов для выбора наиболее информативных спектральных каналов в многоспектральных системах дистанционного зондирования Земли. **Практическая значимость:** представленное математическое описание разработанного метода может быть положено в основу алгоритмов обработки сигналов и процессов. Метод может быть использован при обработке данных, полученных системами сбора информации, такими как системы дистанционного зондирования, телеметрии, контроля технологических процессов.

**Ключевые слова** — локальные свойства сигнала, вейвлет-преобразование, обработка данных, спектральный образ.

### Введение

Задача обнаружения изменения локальных свойств (особенностей) сигналов и динамики систем является одной из широко распространенных задач анализа и обработки информации [1–5]. К ней сводятся многие прикладные задачи обработки данных, полученных системами сбора информации, такими как системы дистанционного зондирования, телеметрии, контроля технологических процессов. Под особенностью процесса в общем случае понимается резкий скачок, перепад, узкий пик, локальный максимум или минимум, кратковременный всплеск, разрыв функции, описывающей анализируемый процесс. Обнаружение изменения свойств анализируемого сигнала является составной частью анализа описываемых ими процессов и динамических систем, оно составляет основу алгоритмов распознавания образов, контроля и технической диагностики, а также дополняет адаптивные процедуры идентификации состояния систем со сложной динамикой.

При анализе свойств процессов различной природы, поиска точного положения особенности процесса и оценки характера этой особенности широкое распространение получают интегральные преобразования и ряды Фурье. При фурье-анализе в качестве основных базисных функций

используются тригонометрические функции (синус, косинус) и комплексные экспоненты. Однако синусоида, как базисная функция, будучи плавной функцией, не позволяет обнаружить резкие перепады сигналов. По составляющим спектра практически невозможно оценить характер особенности сигнала и точное положение (координату) этой особенности на оси координат, используемой для представления анализируемого сигнала. Поэтому для решения задач локализации особенностей сигнала необходимо использовать другие базисные функции. В качестве таких базисных функций в настоящей статье рассматриваются так называемые вейвлет-функции, или вейвлеты [5, 6].

### Вейвлеты в задачах исследования локальных свойств сигналов

В настоящее время использование вейвлетов получает широкое распространение для фильтрации и предварительной обработки данных при обработке и синтезе различных сигналов, сжатии и обработке изображений, решении задач анализа состояния, прогнозирования, распознавания образов [6, 7]. Понятие вейвлета охватывает широкий класс непрерывных и дискретных базисных функций. Разложение исходной функции (оригинала) в базисе вейвлет-функций

осуществляется с помощью вейвлет-преобразования, имеющего общее и частные представления для различных вейвлетов и обладающего рядом полезных свойств для обнаружения особенностей анализируемых сигналов. Так, оно может «фокусироваться» на локальных структурах сигнала с помощью процедуры приближения и удаления объектов (зум-процедуры) при преобразовании, которая постепенно уменьшает масштабный параметр некоторой базисной функции-прототипа. Локальная особенность сигнала характеризуется убыванием амплитуды преобразования с уменьшением масштаба. Особенности и перепады выделяются исследованием локальных максимумов преобразования при малых масштабах.

Свойства вейвлет-преобразования позволяют путем последовательного увеличения (огрубления) или уменьшения (уточнения) масштаба выявлять локальные особенности анализируемого сигнала и подразделять их по интенсивности. Тем самым обнаруживается динамика изменения сигнала в зависимости от масштаба, не всегда уловимая при анализе свойств сигнала «невооруженным глазом». Если резкие скачки (изменение гладкости функции, описывающей сигнал) во многих случаях визуально легко различимы, то взаимодействие событий на мелких масштабах, перерастающих в крупномасштабные явления, визуально обнаружить очень сложно. И наоборот, сосредоточившись только на мелких деталях, можно не заметить явлений, происходящих на глобальном уровне.

Идея применения вейвлетов для многомасштабного анализа заключается в том, что разложение сигнала производится по базису, образованному сдвигами и разномасштабными копиями вейвлета, являющегося базисной функцией-прототипом. Вейвлеты имеют вид коротких волновых пакетов с нулевым средним значением, локализованных по оси аргументов (независимых переменных), инвариантных к сдвигу и линейных к операции масштабирования (сжатия/растяжения). По локализации во временном и частотном представлении вейвлеты занимают промежуточное положение между гармоническими функциями, локализованными по частоте, и  $\delta$ -функцией Дирака, локализованной во времени. Таким образом, каждый вейвлет имеет некоторую область локализации, и свертка с ним сигнала позволяет выделить характерные особенности сигнала в этой области локализации, причем чем больший масштаб имеет вейвлет, тем более широкая область сигнала будет оказывать влияние на результат свертки.

Принцип неопределенности Гейзенберга не позволяет одновременно точно определить временные и частотные характеристики сигнала. Данный принцип выявляет «проблему разрешения» при частотно-временном представлении

сигнала [5, 6]. Так, при оконном преобразовании Фурье [5] сигнал локализуется во времени, но теряется точность его представления в частотном диапазоне. Вейвлет-преобразование также подчиняется принципу неопределенности Гейзенберга, но обладает свойствами многомасштабности. Оно имеет хорошее разрешение по времени и плохое по частоте на высоких частотах и плохое разрешение по времени и хорошее по частоте на низких частотах. Это позволяет эффективно использовать вейвлет-преобразование для анализа сигналов во всем частотно-временном диапазоне. Таким образом, для низкочастотных компонентов сигнала, имеющих большой масштаб, мы можем точно определить частотный состав, а для высокочастотных компонентов, имеющих малый масштаб и, как правило, характеризующих особенности сигнала, более точно определить время появления. Следует отметить, что большинство реальных сигналов обладают как раз такими свойствами, а именно имеют плавно изменяющиеся низкочастотные компоненты с наложением высокочастотных особенностей, появляющихся локально во времени.

Базисными функциями вейвлет-преобразований могут быть самые различные функции с компактным носителем: модулированные импульсами синусоиды, функции со скачками уровня и другие непрерывные на интервале определения и дискретные функции. Вейвлеты могут быть ортогональными, полуортогональными и биортогональными, симметричными, асимметричными и несимметричными, с компактной областью определения и не имеющие таковой, а также иметь различную степень гладкости [5]. Некоторые функции имеют аналитическое выражение, другие — быстрый алгоритм вычисления вейвлет-преобразования. Для качественного анализа сигналов и локальных особенностей в сигналах могут применяться различные ансамбли вейвлет-функций, которые позволяют оценить информационное содержание сигналов и динамику изменения этой информации. При соответствующем выборе базисных функций вейвлет-преобразование обеспечивает хорошее отображение свойств сигналов с локальными особенностями, в том числе со скачками, разрывами и перепадами значений с большой крутизной [5].

К вейвлетам относятся локализованные функции, которые конструируются из одного базисного (материнского) вейвлета  $\Psi(t)$ , определенного по некоторой координате  $t$ , в качестве которой может выступать как время, так и любая другая переменная. Базисный вейвлет должен удовлетворять следующим требованиям [6, 7]: быть непрерывным, интегрируемым, иметь компактный носитель, быть локализованным по анализируемой координате, иметь нулевое среднее (равен-

ство нулю нулевого момента) и быть ограничен-  
ным:  $\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty$ .

Простейшими вейвлетами являются дискретные функции Хаара — короткие прямоугольные колебания на интервале  $[0,1]$ , первое упоминание о которых появилось еще в начале прошлого века. Функции Хаара и другие дискретные функции, которые могут использоваться в качестве базисных функций вейвлет-преобразований, систематизированы в работе [6]. Эти функции находят широкое применение при анализе временных рядов, цифровой обработке сигналов и изображений [5–8]. Для конструирования вейвлетов часто используются непрерывные функции, являющиеся производными функции Гаусса [6], которые имеют наилучшую локализацию как во временной, так и в частотной областях.

**Определение локальных особенностей сигнала с использованием многомасштабного вейвлет-анализа**

Рассмотрим дискретную функцию, представленную совокупностью дискретных отсчетов  $f(m)$ ,  $m = 1, \dots, M$ . Вейвлет-преобразование является частным случаем ортогонального преобразования анализируемой функции  $f(m)$ . Рассмотрим возможности описания свойств функции  $f(m)$  с помощью ортогонального преобразования

$$f(m) = \sum_k c_k \Psi_k(m), \quad (1)$$

где  $\Psi_k(m)$  — базисная функция, спектр которой некоторым образом локализован в окрестности частоты  $\omega_k$ . Если использовать базисную функцию  $\Psi_k(m) = \exp(-j\omega_k m)$ , то преобразование (1) сводится к преобразованию Фурье с предельной локализацией в частотной области гармонических колебаний с частотами  $\omega_k$  в виде  $\delta$ -функций. Если же использовать базисную  $\delta$ -функцию  $\Psi_k(m) = \delta(m)$ , то в результате преобразования (1) получаем предельно четкую локализацию в области номеров  $m$  анализируемых составляющих, но она не несет информации о локальных свойствах частотных составляющих, присутствующих в спектре функции  $f(m)$ .

Частично локальное описание спектра дискретной функции  $f(m)$  в классе преобразований Фурье можно осуществить с помощью оконного дискретного преобразования Фурье вида

$$Y(\omega, b) = \sum_{m=1}^M f(m) \Psi(m-b) \exp(-j\omega m), \quad (2)$$

в котором окно  $\Psi(m-b)$  сдвигается по оси отсчетов  $m$  для вычисления дискретного преобразова-

ния Фурье  $Y(\omega, b)$  с центром в позиции  $b$ . Ортогональное преобразование вида (2) становится независимым от позиции (номера) составляющей анализируемой функции, и в результате получается описание функции  $f(m)$  как в области частот  $\omega$ , так и в области номеров отсчетов  $m$ . Выбирая ширину окна, можно повысить точность описания локальных свойств функции  $f(m)$ .

Для обеспечения частотной локализации, определяемой сжатиями и растяжениями базисной функции, нужно ввести второй аргумент — масштабный коэффициент  $a$ , представляющий собой аналог частоты  $\omega$ . Тогда базисная функция  $\Psi(m)$  примет вид  $\Psi\left(\frac{m-b}{a}\right)$ . Базисная функция  $\Psi\left(\frac{m-b}{a}\right)$  является вейвлетом и в обобщенном спектральном анализе занимает промежуточное положение между гармоникой и  $\delta$ -функцией. Для описания локальных свойств функции применяют совокупность таких вейвлетов.

Семейство нормированных вейвлетов с параметрами сдвига и сжатия, образованных базисной функцией (материнским вейвлетом)  $\Psi\left(\frac{m-b}{a}\right)$ , имеет вид

$$\Psi_I(a, b, m) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{m-b}{a}\right). \quad (3)$$

Базисные функции (3) рассматриваются как масштабированные и сдвинутые версии функции окна. Параметр  $b$  показывает сдвиг функции вдоль оси номеров спектральных каналов, а масштабный параметр обеспечивает частотную локализацию, определяемую сжатием и растяжением  $a$  материнской функции. Большие значения  $a$  соответствуют низким частотам, малые значения  $a$  — высоким частотам  $\omega$ . Параметр  $a$  подвергается масштабированию не только параметр  $m$ , но и переменную сдвига  $b$ , так что при растяжении и сжатии материнской функции сохраняется отношение  $b/a = \text{const}$ .

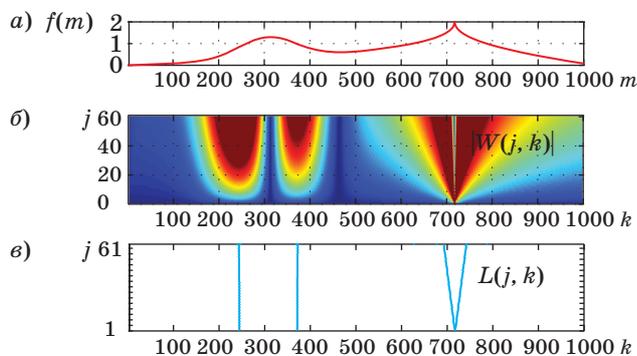
Дискретизация переменных  $a$  и  $b$  для вейвлет-анализа дискретных функций осуществляется по индексам  $j$  и  $k$  следующим образом [6]:  $a_0 = 2$ ,  $a_j = a_0^j$ ,  $b_{jk} = ka_0^j$ . В этом случае вейвлет-функция в общем виде определяется выражением  $\Psi_{Ijk}(m) = a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} m - k)$ , где осуществлен переход от переменных  $a$  и  $b$  к индексам  $j$  и  $k$ , которые определяют, соответственно, уровень и позицию вейвлета. С учетом введенных обозначений вейвлет-преобразование масштаба  $j$  дискретной функции  $f(m)$  производится по формуле

$$W(j, k) = \sum_{m=1}^M a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} m - k) f(m). \quad (4)$$

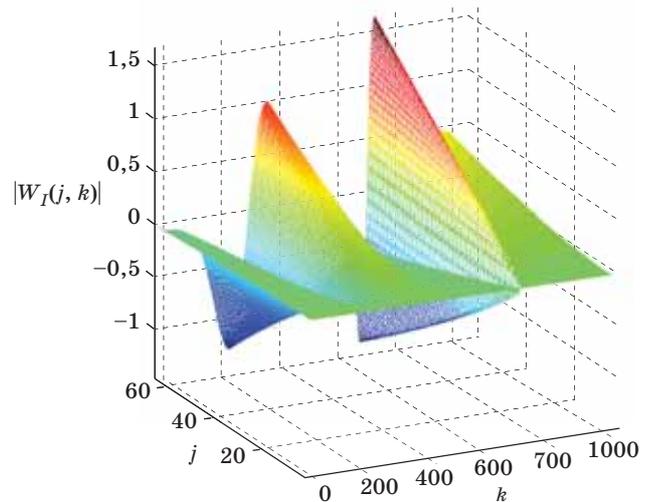
Вейвлет-преобразование (4) обладает свойством инвариантности к масштабу и сдвигу. Благодаря

этому свойству можно определить наличие и характер особенностей анализируемой функции. По значениям вейвлет-коэффициентов на малых масштабах можно судить о регулярности анализируемой функции в конкретной точке [5]. Поскольку с ростом масштаба базисная вейвлет-функция увеличивается, захватывая все больший диапазон значений  $m$  (диапазон суммирования), коэффициент в точке  $(j, k)$  будет зависеть от значений части составляющих  $f(m)$ . Диапазон этот тем больше, чем больше масштаб, поэтому высокочастотная информация вычисляется на основе малых отрезков значений функции  $f(m)$ , а низкочастотная информация — на основе больших. При анализе локальных изменений функции основной интерес представляет высокочастотная информация, поэтому практически необходимо анализировать не все вейвлет-коэффициенты, а коэффициенты, соответствующие вейвлет-функциям малого масштаба. В этом состоит основное отличие рассматриваемого приложения вейвлет-анализа от сжатия данных и изображений, когда анализируются, прежде всего, крупномасштабные составляющие разложения, имеющие наибольший вес [7].

Результат вейвлет-преобразования можно интерпретировать как поверхность в трехмерном пространстве. На рис. 1, а приведен пример исходной анализируемой функции  $f(m)$ , на рис. 1, б в виде проекции на плоскость переменных  $a$  и  $b$  представлены абсолютные величины вейвлет-коэффициентов  $|W(j, k)|$  (по оси абсцисс отложен индекс параметра сдвига  $k$ , по оси ординат — индекс масштаба  $j$ , градицией цвета показаны значения вейвлет-коэффициентов по модулю). Наиболее важная информация о вейвлет-преобразовании содержится в линиях локальных экстремумов  $L(j, k)$  поверхности модулей вейвлет-коэффициентов, поиск которых проводится на каждом масштабе  $j$  (рис. 1, в). На рис. 2 показана поверхность трехмерного представления вейвлет-преобразо-



■ **Рис. 1.** Исходная анализируемая функция (а); вейвлет-коэффициенты в виде проекции на плоскость переменных  $a$  и  $b$  (б); линии локальных экстремумов поверхности вейвлет-коэффициентов (в)



■ **Рис. 2.** Поверхность трехмерного представления вейвлет-преобразования функции  $f(m)$  с базисным вейвлетом  $\Psi(m)$  типа вейвлета Хаара

вания функции  $f(m)$ , изображенной на рис. 1, а, с базисным вейвлетом  $\Psi(m)$  типа вейвлета Хаара.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 1 и 2, показывает, что, анализируя вейвлет-коэффициенты на малых масштабах  $j$ , можно судить о регулярности анализируемой функции в каждой ее точке. Наиболее значимые вейвлет-коэффициенты являются наибольшими по абсолютной величине  $|W(j, k)|$  и свидетельствуют о наличии существенного изменения анализируемой функции в позиции, определяемой значением индекса  $k$ . Сравнивая абсолютные величины вейвлет-коэффициентов  $|W_I(j, k)|$  с некоторым порогом, можно определить наиболее значимые существенные изменения функции. Также возможно одновременно оценивать сумму абсолютных величин вейвлет-коэффициентов  $|W_I(j, k)|$ , рассчитываемых для разных масштабов  $j$  при заданной позиции вейвлета  $k$ . Сравнение вейвлет-коэффициентов на нескольких уровнях вейвлет-преобразования расширяет возможности обнаружения скачков различных масштабов и уменьшает влияние шумовых выбросов.

**Пример использования свойств вейвлет-преобразования для определения наиболее информативных спектральных каналов при обработке многоспектральных данных**

Одной из областей применения вейвлет-преобразования для поиска последовательности локальных особенностей анализируемой функции является анализ данных многоспектрального дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В современных авиационных и космических системах ДЗЗ широкое применение находят многоспектральные и гиперспектральные датчики с числом

спектральных каналов до нескольких тысяч [9]. Распознавание наблюдаемых объектов по таким данным осуществляется корреляционным методом по зарегистрированным спектральным образам [9, 10]. Многоспектральные данные характеризуются большими объемами (десятками гигабайт), что плохо согласуется с невысокой пропускной способностью большинства радиолиний передачи данных ДЗЗ. В таких условиях для оперативной обработки и передачи данных ДЗЗ необходимо выбирать так называемые наиболее информативные спектральные каналы, соответствующие областям существенных изменений спектральных образов [11].

Рассмотрим пример применения вейвлет-преобразования для выбора наиболее информативных спектральных каналов многоспектральной системы ДЗЗ. В данном случае в качестве анализируемой функции  $f(m)$  выступает спектральный образ наблюдаемого объекта или подстилающей поверхности  $I(\lambda)$ , представленный в виде дискретных составляющих — значений коэффициента спектральной яркости, регистрируемой в  $M$  спектральных каналах, каждый со средней длиной волны  $\lambda_m$  и спектральным разрешением  $\Delta\lambda_m$ ,  $m = 1, \dots, M$ . При корреляционном распознавании по спектральным образам [4] наибольший вклад в величину коэффициента корреляции дают спектральные составляющие, соответствующие участкам наиболее быстрого изменения анализируемого спектрального образа  $I(\lambda)$ , на которых функция, описывающая спектральный образ, имеет некоторые локальные особенности и существенные изменения в характере поведения.

В рассматриваемом случае задача обнаружения изменения свойств анализируемого процесса переносится в частотную область (координатой изменения процесса является длина волны  $\lambda$ ). При этом постановка задачи определения участков существенных изменений анализируемых спектральных образов полностью соответствует задаче обнаружения изменения свойств сигналов с использованием вейвлетов. Вейвлет-преобразование дискретной функции спектрального образа  $f(m)$  производится в соответствии с выражением (4).

В общем случае анализа вейвлет-коэффициентов  $|W(j, k)|$  выбранных масштабов  $j_1, j_2, \dots, j_L$  оценка координаты  $\lambda_k$  наиболее информативного спектрального канала, задаваемой ее номером  $k$ , имеет вид

$$\tilde{k} = \arg \max_k \left| \sum_{j=1}^L |W(j, k)| \right|, \quad (5)$$

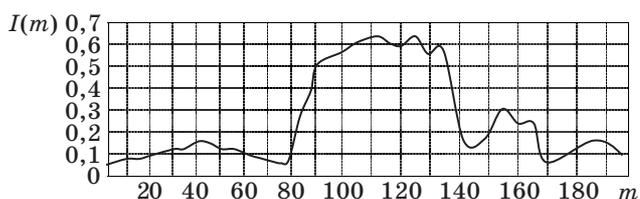
где  $L$  — число учитываемых масштабов. Решающее правило для оценки координаты скачка  $\tilde{k}$  определяется выражением

$$g_k = \max_k \left| \sum_{j=1}^L |W(j, k)| \right| \geq \delta. \quad (6)$$

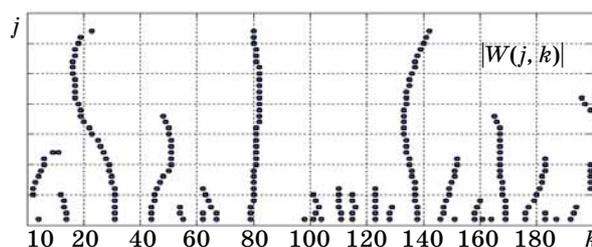
В качестве наиболее информативных выбираются те спектральные каналы, для которых абсолютные значения соответствующих их позициям вейвлет-коэффициентов  $|W_I(j, k)|$  или их сочетаний превышают уровень порога  $\delta$ . При  $L = 1$  анализируются вейвлет-коэффициенты одного масштаба. При этом за счет выбора модификации вейвлет-функции и анализируемого масштаба достигается уменьшение влияния шума на результаты выбора спектральных каналов.

В общем случае процедуру выбора наиболее информативных спектральных каналов можно построить путем выполнения операций оптимального оценивания координат существенных изменений анализируемой функции спектрального образа [4, 11]. Алгоритм оптимального оценивания координат существенных изменений анализируемой функции включает операции определения ее приращений (скачков) и сравнение найденных приращений с настраиваемым порогом. К данным операциям могут быть сведены операции настройки параметров вейвлет-преобразования и сравнения с порогом локальных экстремумов модулей вейвлет-коэффициентов, что позволяет рассматривать представленный алгоритм обнаружения локальных свойств анализируемых сигналов и процессов с использованием вейвлет-преобразования как квазиоптимальный алгоритм по отношению к оптимальному алгоритму.

Пример исходной анализируемой функции спектрального образа  $f(m) = I_m$  приведен на рис. 3. Линии локальных экстремумов поверхности абсолютных величин коэффициентов  $|W_I(j, k)|$ , полученных с помощью вейвлет-преобразования исходной функции  $f(m)$  с базисным вейв-



■ Рис. 3. Пример исходной анализируемой функции спектрального образа



■ Рис. 4. Линии локальных экстремумов поверхности коэффициентов вейвлет-преобразования спектрального образа  $I(m) = I_m$

летом типа вейвлета Гаусса первого порядка

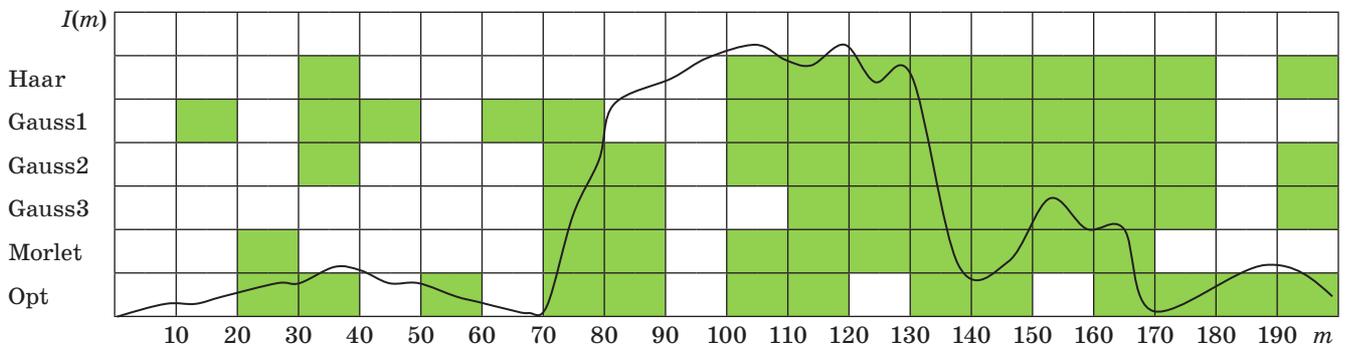
$$\Psi(m) = \frac{m}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{m^2}{2}\right), \text{ показаны на рис. 4.}$$

При вейвлет-преобразовании функция  $|W(j, k)|$  является регулярной даже при нерегулярной анализируемой функции  $f(m)$ . Вся информация о возможных особенностях функции  $f(m)$ , включая локализацию скачков  $k = m_0$ , заключена в асимптотическом поведении коэффициентов  $|W(j, k)|$  при малых  $j$ . Если коэффициенты на малых масштабах расходятся, то функция  $f(m)$  имеет особенность в точке с номером  $m_0$ . Если коэффициенты  $|W(j, k)|$  близки к нулю в окрестности точки  $m_0$  на малых масштабах, то функция  $f(m)$  является регулярной в этой точке. Анализ выделенных линий локальных экстремумов или локальных максимумов модулей вейвлет-коэффициентов позволяет анализировать особенности функции  $f(m)$ . Локальные максимумы модулей вейвлет-преобразования  $|W(j, k)|$  будут иметь наибольшие значения в тех точках анализируемой функции  $f(m)$ , в которых она претерпевает наиболее существенные изменения (скачки). При анализе многоспектральных данных, ранжируя значения локальных максимумов модулей вейвлет-преобразования  $|W(j, k)|$  и отбрасывая наименьшие из них, можно определить спектраль-

ные каналы, в которых анализируемая функция спектрального образа  $f(m) = I_m$  имеет существенные изменения. При этом количество  $M_1$  выбираемых наиболее информативных спектральных каналов соответствует количеству отобранных значений локальных максимумов модулей вейвлет-преобразования  $|W(j, k)|$ , а расположение этих вейвлет-коэффициентов соответствует расположению выбираемых спектральных каналов.

Сводные результаты выбора наиболее информативных спектральных каналов для спектрального образа, приведенного на рис. 3, с использованием рассмотренного алгоритма на основе вейвлет-преобразования для различных базисных вейвлет-функций и алгоритма оптимального выбора наиболее информативных спектральных каналов, описанного в работе [4], представлены на рис. 5.

Здесь показана функция спектрального образа  $I_m$  и приведена сводная таблица с результатами выбора наиболее информативных спектральных каналов для вейвлет-преобразования с различными вейвлет-функциями (функцией Хаара — Haar; гауссианами 1-, 2- и 3-го порядка — Gauss1, Gauss2, Gauss3; вейвлетом Морле — Morlet) и метода оптимального выбора наиболее информативных спектральных каналов (Opt). На графике функции спектрального образа в виде диаграммы помечены группы спектральных каналов, ко-



Haar			31			79			102	111 115	123 128	138	146	151 158	169	176		192
Gauss1	13		31	45		64	80		102	110 115	123	137	148	160	169	179		
Gauss2			36			74	85		107	113 119	126	133	141	154	166	172		190 198
Gauss3						70	90			110 116	123 129	138	144	158	164 169	174		192
Morlet		29				73	81		109	113	121	133 137	145 149	157	169			
Opt		29	33		53	80	86		101	112		137 138	148		168 169	178 172	188	198 195

■ Рис. 5. Примеры выбора наиболее информативных спектральных каналов с использованием алгоритма на основе вейвлет-преобразования для различных базисных вейвлет-функций и алгоритма оптимального оценивания

торые выделяются как наиболее информативные всеми рассматриваемыми алгоритмами.

Анализ сводной таблицы показывает, что при соответствующем выборе параметров вейвлет-преобразования имеет место хорошее совпадение результатов выбора наиболее информативных спектральных каналов с рассмотренным и оптимальным алгоритмами. При использовании оптимального алгоритма выбора спектральных каналов и алгоритма на основе вейвлет-функций Гаусса 1-го порядка имеет место достаточно равномерное выделение областей наиболее существенных изменений анализируемой функции спектрального образа. При использовании алгоритма выбора спектральных каналов на основе вейвлет-функций Хаара имеет место преимущественное выделение спектральных каналов в областях, где функция спектрального образа претерпевает многочисленные непродолжительные скачки, и пропуски спектральных каналов в областях длительных скачков функции спектрального образа с небольшой амплитудой.

Представленный алгоритм, основанный на вейвлет-преобразовании спектрального образа, позволяет выделять в качестве наиболее информативных в ряде случаев совпадающие или, по крайней мере, близкие группы спектральных каналов. Работа алгоритма зависит от типа выбранной вейвлет-функции. Вейвлет Хаара позволяет выделять более резкие, шумоподобные составляющие функции спектрального образа. Уровень масштаба  $j$  сказывается на чувствительности алгоритма к шумоподобным скачкам анализируемой функции  $f(m)$ . На масштабе  $j = 1$ , как видно из рис. 4, локальных максимумов вейвлет-преобразования больше и они соответствуют тем участкам спектрального образа, где проявляется более высокочастотная составляющая спектра. Следовательно, на самых малых масштабах алгоритм определяет спектральные каналы, соответствующие более высокочастотным (шумоподобным) участкам анализируемого спектрального образа.

## Заключение

Исследование показало, что благодаря таким свойствам, как инвариантность относительно сдвига и растяжения (сжатия) и способности к частотно-временной локализации, вейвлет-преобразование, в отличие от преобразования Фурье, позволяет обнаруживать особенности сигналов не только в частотной, но и во временной области. Обнаружение изменения локальных свойств анализируемых сигналов и процессов осуществляется с использованием ортогональных базисных вейвлет-функций, построение которых связано с представляющей собой многомасштабный анализ системой вложенных пространств, отличающихся друг от друга только перемасштабированием независимой переменной. Линии локальных максимумов, объединяющие вдоль оси масштабов на частотно-временной плоскости точки, в которых модули коэффициентов вейвлет-преобразования имеют локальные максимумы, сходятся к некоторым точкам, в которых присутствует особенность. Исследуя характер изменения локальных максимумов вейвлет-преобразования на различных масштабах, можно определять расположение и характер локальных особенностей анализируемых сигналов и процессов.

Благодаря использованию вейвлет-преобразования для анализа и обработки сигналов и процессов возможно решение широкого круга прикладных задач обработки данных, полученных системами сбора информации, такими как системы дистанционного зондирования, телеметрии, контроля технологических процессов, телекоммуникации. Представленное описание метода может быть положено в основу алгоритмов обработки широкого круга сигналов и процессов. В качестве примера представлено использование вейвлет-преобразования для выбора наиболее информативных спектральных каналов системы ДЗЗ и показана его работоспособность.

## Литература

1. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. — М.: Наука, 1983. — 200 с.
2. Жиглявский А. А., Красковский А. Е. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. — 224 с.
3. Бассвиль М., Вилски А., Банвенист А. и др. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 280 с.
4. Козинев И. А., Мальцев Г. Н. Модифицированный алгоритм обнаружения разладки случайного про-

цесса и его применение при обработке многоспектральных данных // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. С. 9–17.

5. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: пер. с англ. — М.: Мир, 2005. — 671 с.
6. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. — М.: Солон-Р, 2002. — 448 с.
7. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображения и звука: пер. с англ. — М.: Техносфера, 2004. — 368 с.
8. Мальцев Г. Н., Стогов Г. В. Двумерное преобразование Хаара и особенности его вычисления при обработке оптических изображений // Информационно-управляющие системы. 2008. № 3. С. 2–4.

9. Мальцев Г. Н., Козинов И. А., Данилкин А. П. Космические системы и технологии многоспектрального дистанционного зондирования Земли // Информатика и космос. 2010. № 1. С. 148–158.
10. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. — М.: Логос, 2001. — 264 с.

11. Мальцев Г. Н., Козинов И. А., Фатеев В. Ф. Методы выбора наиболее информативных спектральных каналов при дистанционном зондировании Земли с малых КА // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. № 6. С. 23–31.

UDC 621.383.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.21

### Detecting Local Characteristic of Analyzed Signals and Processes Using Wavelet Transformation

Kozinov I. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Assistant Professor, garry-spb@yandex.ru

<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Developing a method of detecting changes in local characteristics of signals and processes using wavelet transformations in the context of concerns of applied problems of information processing and system dynamics analysis. **Methods:** Using invariance under shift and scaling, along with frequency-time localization. **Results:** A formalized description is given for the method of detecting local characteristics of arbitrary signals using multiresolution wavelet analysis. The main operations of the signals processing when detecting their local characteristics are the analysis of small-scaled wavelet coefficients and the determination of the signal-describing function correlation interval. Local maxima lines along the scale axis on the time-frequency plain unite the points in which the modules of the coefficients of the wavelet transformation have local maxima. These lines converge to certain points with singularities. Studying how the local wavelet transformation maxima change at different scales help determine the location and nature of the local singularities of the analyzed signals and processes. An example is given of using a wavelet transformation for spectral images of observed objects for choosing the most informative spectral channels in systems of multispectral remote flexing of the Earth. **Practical relevance:** The presented mathematical description of the proposed method can be a base of processing algorithms for signals and processes. The method also can be used in the processing of data obtained by information collection systems of remote flexing, telemetries or control over technological processes.

**Keywords** — Local Characteristics of a Signal, Wavelet Transformation, Data Processing, Spectral Image.

### References

1. Nikiforov I. V. *Posledovatel'noe obnaruzhenie izmeneniia svoistv vremennykh riadov* [Consequent Finding of the Characteristic Change of the Temporary Rows]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 200 p. (In Russian).
2. Zhigliavskii A. A., Kraskovskii A. E. *Obnaruzhenie izmeneniia svoistv signalov i dinamicheskikh sistem* [Detection of the Change-Point in Random Processes in Problems of Radio Engineering]. Leningrad, LGU Publ., 1988. 224 p. (In Russian).
3. Basseville M., Vilski A., Banveniste A., at al. *Detection of Abrupt Changes in Signals and Dynamical Systems*. New York, Springer-Verlag, 1985. 278 p.
4. Kozinov I. A., Maltsev G. N. Modified Algorithm of the Detection of Abrupt Changes in Casual Process and its use for Processing of Multispectral Data. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2012, no. 3, pp. 9–17 (In Russian).
5. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Paris, Academic Press, 1999. 671 p.
6. D'iakonov V. P. *Veivlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From Theory to Practical]. Moscow, Solon-R Publ., 2002. 448 p. (In Russian).
7. Salomon D. *Data Compression Methods*. New York, Springer-Verlag, 2002. 368 p.
8. Maltsev G. N., Stogov G. V. Two Dimensional Haar Transform and Specifics of its Calculation While Processing Optical Image. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2008, no. 3, pp. 2–4 (In Russian).
9. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Danilkin A. P. Space Systems and Technologies Interned for Multispectral Remote Sensing of the Earth. *Informatsiia i kosmos*, 2010, no. 1, pp. 148–158 (In Russian).
10. Kashkin V. B., Suhinin A. I. *Distantionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaia obrabotka izobrazhenii* [Space Remote Flexing of the Earth. Digital Processing of the Images]. Moscow, Logos Publ., 2001. 264 p. (In Russian).
11. Maltsev G. N., Kozinov I. A., Fateev V. F. Methods of Choice of the Most Informational Spectral Channels under Remote Flexing of the Earth from Small Spacecrafts. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2007, no. 6, pp. 23–31 (In Russian).

УДК 519.673: 004.9

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.29

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПРЯМЫМ ЛОГИЧЕСКИМ ВЫВОДОМ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ДИСКРЕТНЫМИ ДОМЕНАМИ ПЕРЕМЕННЫХ

**А. Я. Фридман<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**Б. А. Кулик<sup>б</sup>**, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник

**В. Г. Курбанов<sup>б</sup>**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

<sup>а</sup>Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, Апатиты, РФ

<sup>б</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** в гибких дискретных системах (экспертных, информационно-аналитических и др.) существует проблема остановки процесса вычислений, т. е. выявления шага обработки, после которого необходимо изменить режим работы системы (например, выдать сигнал ошибки или изменить направление логического вывода). В настоящей работе предлагается применить для этого универсальные эвристические индикаторы хода вывода, которые можно конкретизировать для реальных типов данных. Такие индикаторы позволяют оценить успешность продвижения к цели вывода и принять решение о его прекращении или продолжении. **Результаты:** предложен метод управления ходом прямого логического вывода в гибких дискретных интеллектуальных системах, основанный на эвристических теоретико-множественных индикаторах хода вывода, которые анализируют текущие подмножества возможных, истинных и ложных значений переменных и прекращают цепочку вывода в случае ее неперспективности (невозможности сузить уже полученный диапазон возможных значений целевой переменной) или возникновения конфликта, например получения пустого множества возможных значений. Разработанный метод управления выводом использует интегральные оценки успешности процедур вывода по критериям «здравого смысла», к которым можно отнести коэффициенты уверенности, расчет мер доверия и недоверия (шансов) к гипотезам с учетом использованных и еще не использованных свидетельств, идеи ДСМ-метода и т. п. **Практическая значимость:** представленные в работе правила обработки продукции и эмпирические индикаторы хода логического вывода в гибких дискретных системах позволяют оценить успешность продвижения к цели вывода и принять решение о его прекращении или продолжении.

**Ключевые слова** — дискретная переменная, гибкая дискретная система, логический вывод, управление применением продукции, эвристический индикатор хода вывода.

### Введение

Во многих компьютерных системах обработки информации переменные величины могут принимать только значения из дискретных конечных множеств (аналогично спискам). Так поступают либо в целях использования комбинаторных алгоритмов [1–3], либо для того, чтобы избежать вычислительных проблем, связанных с малыми изменениями количественных переменных, и обеспечить поддержку совместной расчетно-логической обработки данных любых типов [4]. Согласно работе [5], подобные схемы и устройства относятся к гибким дискретным системам, поскольку предназначены для реагирования на дискретные события и работы в меняющейся обстановке.

В гибких дискретных системах существует проблема остановки процесса вычислений, т. е. выявления шага обработки, после которого необходимо изменить режим работы системы (например, выдать сигнал ошибки или изменить направление логического вывода). В настоящей работе предлагается применить для этого универсальные индикаторы хода вывода, которые можно конкретизировать для реальных типов

данных. Без потери общности анализ таких индикаторов ведется на примере системы ситуационного моделирования (ССМ) [4, 6].

### Постановка задачи управления ходом прямого вывода

В ССМ имеются интерфейсы для ввода-вывода данных различных типов, но их внутреннее представление унифицировано: реальные значения кодируются натуральными числами, соответствующими положению этих значений в списке допустимых значений, который формируется при первичном декларировании данного. Данные со строковыми значениями называются параметрами, а имеющие числовые значения — переменными, и над ними можно выполнять определенные математические операции. Когда результат вычислений представляет собой значение переменной, он округляется до ближайшего значения из списка допустимых значений. В дальнейшем, если сказанное относится к данным любого разрешенного в ССМ типа (и к переменным, и к параметрам), употребляется термин «данное».

Назовем атомарным факт простейшего возможного в ССМ формата:

$$\langle \text{имя} \rangle = \langle \text{значение} \rangle, \quad (1)$$

где  $\langle \text{значение} \rangle$  — одно из значений данного с именем  $\langle \text{имя} \rangle$  из списка его допустимых значений. Поскольку все значения каждого данного предполагаются взаимно не пересекающимися, то область истинности факта (1) есть единственное значение из области определения этого данного. Общая форма записи факта в ССМ такова:

$$\langle \text{имя} \rangle \langle \text{знак} \rangle \langle \text{подписок\_значений} (n) \rangle, \quad (2)$$

где в угловые скобки взяты названия, вместо которых подставляются их допустимые значения (нотация формы Бэкуса — Наура, БНФ);  $\langle \text{подписок\_значений} (n) \rangle$  имеет длину  $n$  и состоит из допустимых значений данного. Если  $N$  — общая длина списка допустимых значений, то всегда  $n < N$ .

Допустимые в ССМ  $\langle \text{знаки} \rangle$  и соответствующие способы обработки  $\langle \text{подписка\_значений} \rangle$  сведены в таблицу.

Экспертная система ССМ поддерживает продукционные правила такого формата:

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ } E_1 [\& E_2 \dots], \\ & [\text{ТО } T_1 [c P(T_1/*)], [\& T_2 [c P(T_2/*)] \dots]], \\ & [\text{ИНАЧЕ } I_1 [c P(I_1/*)], [\& I_2 [c P(I_2/*)] \dots]], \end{aligned} \quad (3)$$

■ Интерпретация сложных фактов в ССМ

Тип данного	Знак	$n$	Способ обработки
Любой (параметр / переменная)	=	$<N$	Факт истинен, если данное принимает хотя бы одно значение из $\langle \text{подписка\_значений} (n) \rangle$ (связка значений по ИЛИ)
	≠	$<N - 1$	Факт истинен, если данное принимает любое значение, кроме указанных в $\langle \text{подписке\_значений} (n) \rangle$
Переменная	∈	2	Факт истинен, если данное принимает любое значение из интервала $[n1, n2]$
	∉	2	Факт истинен, если данное принимает любое значение вне интервала $[n1, n2]$
	≤	1	Факт истинен, если данное принимает любое допустимое значение, меньшее или равное указанному
	≥	1	Факт истинен, если данное принимает любое допустимое значение, большее или равное указанному

*Примечание.* При работе с интервалами значений переменных (знаки ∈ и ∉) граничные значения включаются в интервал.

где  $E_i, T_j, I_k$  — условия типа (2), определенные на списке значений одного параметра или переменной;  $P(*/*)$  — условные вероятности следствий при истинности их предпосылок (задаются при вероятностном выводе); & — логическая связка И; в квадратные скобки взяты необязательные части правила (нотация БНФ).

В каждом правиле должна быть часть ЕСЛИ и хотя бы одна из частей ТО или ИНАЧЕ. В любой части правила допускается произвольное количество логических условий  $E_i, T_j, I_k$ . При обработке они считаются связанными по И, т. е.:

— при наличии части ТО всем входящим в нее условиям присваивается значение «истина» (а всем условиям части ИНАЧЕ, при ее наличии, — значение «ложь»), если истинны все условия части ЕСЛИ;

— при наличии части ИНАЧЕ всем входящим в нее условиям присваивается значение «истина» (а всем, еще не определенным как истинные, условиям части ТО, при ее наличии, — значение «ложь»), если ложно хотя бы одно из условий части ЕСЛИ.

При появлении истинных следствий правило, их породившее, считается сработавшим и в дальнейшей экспертизе не анализируется.

Логические условия могут иметь форму (2) или, при использовании вероятностного механизма вывода, следующую форму:

$$p_1 < P(\langle \text{имя} \rangle \langle \text{знак} \rangle \langle \text{подписок\_значений} (n) \rangle) < p_2, \quad (4)$$

где основные обозначения совпадают с (2), а  $P(*)$  — текущая (апостериорная) вероятность нахождения аргумента в заданном интервале вероятности  $[p_1, p_2]$ .

В начале экспертизы все допустимые значения данных считаются возможными. Различные значения каждого данного рассматриваются как взаимоисключающие. Поэтому по мере срабатывания правил (3) из списка возможных значений в базе данных значений исключаются те значения, которые противоречат частям ТО или ИНАЧЕ сработавших правил. Может сработать только правило, у которого часть ЕСЛИ одновременно истинна или ложна для всех возможных на этот момент значений данного. Если на текущей итерации экспертизы предпосылка анализируемого правила истинна для некоторых из возможных значений данного и ложна для других возможных значений, истинность этой предпосылки не фиксируется. Противоречие в данных фиксируется в двух случаях: либо при появлении фактов за уже исключенное из списка допустимых значение данного, либо если на некоторой итерации в списке новых фактов появляются свидетельства как за истинность, так и за ложность предпосылки какого-либо правила.

Пусть набор переменных  $x_i$ , которые могут быть результатами логического вывода, задан в универсуме

$$U = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n,$$

где  $X_i$  — домены (множества допустимых значений) соответствующих переменных.

Тогда с помощью таблицы любой факт формата (2) можно представить в виде свидетельства «за» некоторые допустимые значения:

$$x_i \in \Phi_i^+ \subseteq X_i, \quad (5)$$

либо в виде свидетельства «против» некоторых допустимых значений:

$$x_i \notin \Phi_i^- \subseteq X_i. \quad (6)$$

Обозначим  $X_i^t$  — множество возможных (в данной цепочке логического вывода) значений переменной;  $X_i^f$  — множество ее невозможных (ложных) значений;  $X_i^v$  — множество ее неопределенных значений (их ложность или допустимость еще не выяснена). Эти множества попарно не пересекаются. Очевидно, в начале вывода (вторым нижним индексом обозначен номер шага вывода  $k$ )

$$X_{i0}^f = \emptyset; \quad X_{i0}^v = X_{i0}^t = X_i. \quad (7)$$

На любом шаге логического вывода должно выполняться соотношение

$$X_{ik}^v \cup X_{ik}^t \cup X_{ik}^f = X_i. \quad (8)$$

По мере срабатывания тех или иных правил в ходе некоторой цепочки прямого вывода области  $X_i^t$ ,  $X_i^f$  и  $X_i^v$  пересчитываются в зависимости от вновь появившихся (истинных) фактов, содержащихся в частях ТО или ИНАЧЕ сработавших правил.

Основная идея управления ходом вывода состоит в том, чтобы прекращать цепочку вывода в случае ее неперспективности (невозможности сузить уже полученный диапазон возможных значений переменной) или возникновения конфликта (например, получения пустого множества возможных значений). Семантике анализа данных и знаний посвящены многие работы, в том числе [7–9].

Сужение диапазона возможных значений некоторой переменной недостижимо, если еще не сработавшие правила не запрещают никакие значения из текущего множества возможных значений.

Критерии останова зависят от типа вывода, поэтому рассмотрим их особенности для детерминированного и вероятностного выводов, реализованных в ССМ, а также для нечеткого вывода. Однако вначале введем несколько определений.

**Определение 1.** Множество истинности данного  $x_i$  — подмножество его допустимых значе-

ний, за которое свидетельствуют все сработавшие до текущего момента продукции:

$$T(x_i) ::= \bigcap_m T(\Phi_{im}), \quad (9)$$

где  $m$  — номера сработавших правил, содержащих следствия, в которые входит  $i$ -е данное.

**Определение 2.** Множество ложности данного  $x_i$   $F(x_i)$  есть подмножество его допустимых значений, которые не являются истинными на текущий момент и не могут стать истинными в ходе дальнейшего вывода.

**Определение 3.** Множеством потенциально возможных значений данного  $x_i$   $P^*(x_i)$  назовем подмножество его допустимых значений, которые могут стать истинными в ходе дальнейшего вывода.

Очевидно, в это множество входят все допустимые значения данного из областей истинности следствий еще не сработавших продукций:

$$P^*(x_i) ::= \bigcup_q T(\Phi_{iq}), \quad (10)$$

где  $q$  — номера еще не сработавших продукций, содержащих следствия, в которые входит  $i$ -е данное.

**Определение 4.** Множеством потенциально истинных значений данного  $x_i$   $T^*(x_i)$  назовем подмножество его допустимых значений, за которые свидетельствуют все еще не сработавшие на текущий момент продукции:

$$T^*(x_i) ::= \bigcap_q T(\Phi_{iq}). \quad (11)$$

Анализируя введенные в данном разделе множества, можно предложить алгоритм управления выводом, представленный ниже.

### Управление детерминированным выводом

Очевидно, при детерминированной обработке информации по закону исключенного третьего для любой переменной  $x_i$  на любом шаге вывода  $k > 0$  нет неопределенных значений, т. е. из (7), (8) имеем

$$X_{ik}^v = \emptyset; \quad X_{ik}^t \cup X_{ik}^f = X_i. \quad (12)$$

При появлении новых фактов множество возможных значений не может расширяться, а множество ложных значений не может сужаться. Они перевычисляются по формулам:

— для свидетельства «за» (5)

$$X_{i(k+1)}^t = X_{ik}^t \cap \Phi_i^+; \quad X_{i(k+1)}^f = X_{ik}^f \cup (X_i \setminus \Phi_i^+); \quad (13)$$

— для свидетельства «против» (6)

$$X_{i(k+1)}^t = X_{ik}^t \setminus \Phi_i^-; \quad X_{i(k+1)}^f = X_{ik}^f \cup \Phi_i^-. \quad (14)$$

Из (9)–(11) и (13) нетрудно видеть, что при использовании детерминированного механизма

вывода условия, при выполнении которых гарантируется отсутствие конфликта при выводе, имеют вид (см. рисунок)

$$\begin{aligned} X_i^f &= \overline{T(x_i)} ::= X_i \setminus T(x_i); \\ T^*(x_i) &\subseteq T(x_i) \subseteq P^*(x_i), \end{aligned} \quad (15)$$

причем в начале вывода выполняются соотношения

$$P^*(x_i) = X_i; \quad T(x_i) = X_i^f = \emptyset. \quad (16)$$

Условие (15) выполняется всегда ввиду (12). Контроль выполнения первого из условий (16) входит в контроль адекватности базы знаний ССМ.

Цепочка вывода считается неуспешной, если у какого-либо данного множество возможных значений стало пустым:

$$X_{i(k+1)}^t = \emptyset. \quad (17)$$

Продолжение вывода нецелесообразно, если известно целевое данное  $x_g$  и еще не сработавшие правила (3) не могут сузить множество его возможных значений. Для этого в частях ТО, ИНАЧЕ таких правил не должно быть свидетельств «против» значений из множества возможных, а множества возможных значений во всех свидетельствах «за» должны быть шире текущего  $X_{gk}^t$ . Таким образом, признак останова вывода имеет вид

$$X_{gk}^t \cap \left( \bigcup_p \Phi_{ip}^+ \right) = \emptyset, \quad (\forall p) X_{gk}^t \subseteq \Phi_{ip}^-, \quad (18)$$

где индекс  $p$  пробегает все значения номеров еще не сработавших правил.

Вывод завершается успешно, если получено единственное возможное значение целевого данного:

$$|X_{gk}^t| = 1. \quad (19)$$

Порядок преобразования определенных выше множеств при детерминированном выводе формулируется следующим образом. Если установлена истинность предпосылки некоторого продукционного правила, для каждого данного  $x_i$ , входящего в часть ТО этого правила:

— области истинности и ложности перевычисляются по формулам (13) или (14), проверяется выполнение соотношения (12);

— из множества  $P^*(x_i)$  (10) исключаются те значения данного, истинность которых подтверждает сработавшее правило;

— перевычисляется множество (11) без учета сработавшей продукции.

Такие же преобразования производятся при доказательстве ложности предпосылки некоторого продукционного правила для всех данных, входящих в часть ИНАЧЕ этого правила.

Множества (11) непосредственно не используются в ходе вывода, но могут служить обобщенным показателем шансов на получение результата: если для целевого данного в ходе вывода это множество не пусто или в процессе вывода в нем появляются значения данного, то ход вывода можно считать успешным.

### Управление вероятностным и нечетким выводом

При таких типах вывода закон исключенного третьего для допустимых и недопустимых значений данных не выполняется, поэтому необходимо анализировать характеристические функции (ХФ) множеств  $X_{ik}^t, X_{ik}^f$  и пересчитывать значения этих функций по ходу вывода. Например, в ССМ здесь используются вероятности из (4).

Вместо формул (10), (11) используются следующие:

— для свидетельства «за» (5)

$$X_{i(k+1)}^t = X_{ik}^t \cup \Phi_i^+; \quad X_{i(k+1)}^f = X_{ik}^f; \quad (20)$$

— для свидетельства «против» (6)

$$X_{i(k+1)}^t = X_{ik}^t; \quad X_{i(k+1)}^f = X_{ik}^f \cup \Phi_i^-. \quad (21)$$

Во множество  $X_{ik}^v$  включаются те значения каждого данного, которые не входят ни во множество  $X_{ik}^t$ , ни во множество  $X_{ik}^f$ .

Очевидно, что если в множествах  $X_{ik}^t$  и  $\Phi_i^+$  в (20) и множествах  $X_{ik}^f$  и  $\Phi_i^-$  в (21) имеются одинаковые значения, то соответствующие им значения ХФ должны пересчитываться в сторону увеличения, а если одинаковые значения встречаются во множествах  $\Phi_i^+$  и  $X_{ik}^f$  в (20) или во множествах  $X_{ik}^t$  и  $\Phi_i^-$  в (21), их значения ХФ должны уменьшаться. Формулы пересчета значений ХФ аналогичны формулам вычисления коэффициентов уверенности Шортлиффа и достаточно разработаны как для вероятностного, так и нечеткого вывода [10, 11], они здесь не рассматриваются ввиду очевидности и некоторой громоздкости. Для ускорения вывода, как это принято в экспертных системах, целесообразно установить нижние пороговые значения ХФ для элементов множеств  $X_{ik}^t$  и  $X_{ik}^f$ . Если ниже порогового уровня опускается значение ХФ некоторого элемента множеств  $X_{ik}^t$  или  $X_{ik}^f$ , этот элемент переносится во множество  $X_{ik}^v$  и возвращается во множества  $X_{ik}^t$  или  $X_{ik}^f$  при появлении значимых (по ХФ) свидетельств (5) или (6) соответственно.

Разумеется, и при недетерминированном выводе применимо условие останова (17), но форма признаков типа (18) и (19) существенно зависит от конкретных типов данных и способов пересчета ХФ. В общем случае необходимо разработать схему интерпретации ХФ целевого данного,

позволяющую принять решение об успешном или неуспешном завершении текущей цепочки вывода. При этом, кроме признаков типа (17) и (18), следует анализировать возможность еще одного конфликта — противоречия между ХФ множеств  $X_{gk}^t$  и  $X_{gk}^f$ , когда одни и те же значения переменной получают высокие значения ХФ в обоих этих множествах.

Следующее определение имеет смысл только для вероятностного механизма вывода (или другого механизма, допускающего наличие неоднозначности свидетельств).

**Определение 5.** Множеством возможных значений данного  $x_i$   $P(x_i)$  называется подмножество его допустимых значений, за которые были факты в ходе вывода:

$$P(x_i) ::= \bigcup_{\rho} \Phi_{i\rho}^+ \quad (22)$$

причем из множества (22) исключаются значения переменной, для которой ХФ падает ниже пороговой величины.

При доказательстве истинности или ложности предпосылки некоторого продукционного правила  $\Pi_n$  множества (22) для данных, входящих в истинные следствия этого правила, перевычисляются по формулам (20) или (21).

К начальным условиям (16) при вероятностном выводе добавляется условие  $P(x_i) = \emptyset$ .

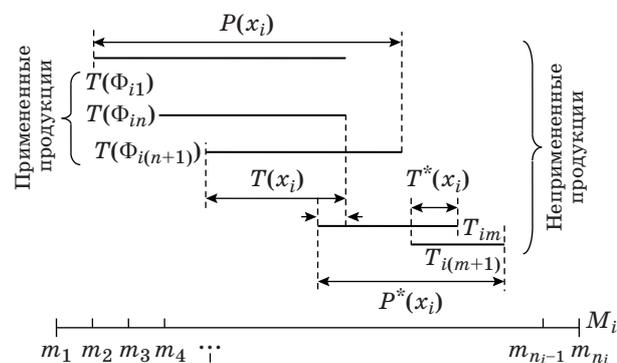
Расположение введенных множеств относительно всего множества  $X_i ::= \{x_{ik}\}, k=1, n_i$  допустимых значений данного  $x_i$  иллюстрируется на рисунке.

Аналогичный (18) индикатор нецелесообразности продолжения вывода при вероятностном выводе можно предложить в виде

$$(T^*(x_i) = \emptyset) \wedge (X_{ik}^V \cap P^*(x_i) = \emptyset), \quad (23)$$

а индикатором неопределенности «мнения» базы знаний о значениях некоторого данного может служить соотношение

$$(T^*(x_i) = \emptyset) \wedge (T(x_i) = \emptyset). \quad (24)$$



■ Использование подмножеств значений данного при контроле вывода

Выполнение двух условий (23) и (24) одновременно для целевого данного дает достаточное обоснование для прекращения вывода ввиду его неуспешности.

Процедуры формирования перечисленных подмножеств значений данных в ССМ не требуют больших машинных ресурсов из-за принятого формата хранения правил (каждое предусловие хранится в отдельной записи базы данных) и использования специальных индексов экспертной системы.

## Заключение

Описанные выше теоретико-множественные индикаторы хода вывода носят эмпирический и эвристический характер, но находятся в рамках распространенных тенденций поиска интегральных оценок успешности процедур вывода по критериям «здравого смысла», к которым можно отнести, например, коэффициенты уверенности, расчет мер доверия и недоверия (шансов) к гипотезам с учетом использованных и еще не использованных свидетельств, идеи ДСМ-метода и т. п. Эмпирические подходы неплохо зарекомендовали себя в прикладных системах искусственного интеллекта и заслуживают внимания, по крайней мере, до появления аксиоматической теории систем, основанных на знаниях, к которым можно отнести и ССМ. В последней указанные индикаторы используются в режиме проведения имитации для предупреждения пользователя. В режиме обучения системы подобные индикаторы применяются также для оценки эффективности управления логическим выводом.

Представленные в работе правила обработки продукции и эмпирические индикаторы хода логического вывода в гибких дискретных системах позволяют оценить успешность продвижения к цели вывода и принять решение о его прекращении или продолжении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-07-00256-а, 14-07-00257-а, 14-07-00205-а, 13-07-00318-а, 12-07-00689-а, 12-07-000550-а, 12-07-00302-а) и Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 16).

## Литература

1. Закревский А. Д. Решение больших систем логических уравнений. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2009. — 96 с.
2. Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis. Mathematical Foundations. — Springer Verlag, 1996. — 17 p.
3. Кулик Б. А., Зуенко А. А., Фридман А. Я. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. — 235 с.

4. Фридман А. Я., Фридман О. В., Зуенко А. А. Ситуационное моделирование природно-технических комплексов. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. — 436 с.
5. Перовская Е. И. Основы гибкой автоматизации/ЛИАП. — Л., 1986. — 32 с.
6. Фридман О. В., Фридман А. Я. Ситуационное моделирование сложных природно-технических объектов с учетом аспектов безопасности // Вестник КНЦ РАН. 2013. Вып. 3. С. 71–79.
7. Цаленко М. Ш. Моделирование семантики в базах данных. — М.: Наука, 1989. — 288 с.
8. Вальковский В. А. Семантика манипуляций с базой данных интеллектуальных систем // НТИ. 1984. Сер. 2. № 3. С. 14–19.
9. Кулик Б. А., Курбанов В. Г., Фридман А. Я. Теория отношений как инструмент семантического анализа данных и знаний// Вестник Санкт-Петербургского университета. 2010. Сер. 10. Вып. 4. С. 1–11.
10. Попов Э. В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. — М.: Наука, 1987. — 288 с.
11. Алгоритм перевода коэффициентов нечеткой логики в коэффициенты уверенности при разработке экспертной системы в среде GURU. [http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/3480/1/Zaitseva%20T.V\\_Computer.pdf](http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/3480/1/Zaitseva%20T.V_Computer.pdf) (дата обращения: 06.09.2013).

UDC 519.673:004.9

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.29

## Course Indicators for Forward Logical Inference upon List Variables

Fridman A. Ya<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, fridman@iimm.ruKulik B. A<sup>b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Leading Researcher, ba-kulik@yandex.ruKurbanov V. G<sup>b</sup>, PhD, Phys.-Math., Senior Researcher, vugar\_borchali@yahoo.com<sup>a</sup>Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of RAS, 24A, Fersman St., 184209, Apatity, Murmansk Region, Russian Federation<sup>b</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bolshoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Flexible discrete systems (expert systems, information systems, etc.) often face the problem of a processing halt, i.e. detection of a processing step demanding a change in the system operation mode (for example, generating a failure signal or inverting the direction of logical inference). This paper introduces some universal heuristic indicators to control the course of logical inference in such systems. These indicators can be specified for real data types and used for the estimation of success in advancing to the inference goal in order to make a decision regarding the termination or prolongation of the inference. **Results:** A technique is proposed to control forward logical inference in flexible discrete intelligent systems, using heuristic set-theoretic indicators to analyze the current subsets of possible, false and true values of variables, terminating an inference chain if it looks unpromising or containing a conflict. A chain is unpromising when there are no ways to narrow down a current subset of possible values for the goal variable within this chain. An example of a conflict is obtaining an empty set of possible values for a variable. The developed method uses integrated output management ratings success inference procedures according to the criteria of "common sense", which include coefficients of confidence, calculation of trust and confidence (chance) in respect to hypotheses considering used and not yet used evidences, JSM method ideas, etc. **Practical relevance:** In flexible discrete systems, the introduced rules of productions application and empirical indicators of logical inference course let you estimate the progress in moving to the inference goal and make a decision whether to terminate or to resume the inference chain.

**Keywords** — List Variable, Flexible Discrete System, Logical Inference, Control Over Productions Application, Heuristic Indicator of Logical Inference Course.

## References

1. Zakrevskii A. D. *Reshenie bol'shikh sistem logicheskikh uravnenii* [Solving Big Systems of Logical Equations]. Minsk, Ob"edinennyi institut problem informatiki (OIP) NAN Belarusi Publ., 2009. 96 p. (In Russian).
2. Ganter B., Wille R. *Formal Concept Analysis. Mathematical Foundations*. Springer Verlag, 1996. 17 p.
3. Kulik B. A., Zuenko A. A., Fridman A. Ya. *Algebraicheskie podkhod k intellektual'noi obrabotke dannykh i znaniy* [Algebraic Approach to Intelligent Processing of Data and Knowledge]. Saint-Petersburg, Politehnicheskii universitet Publ., 2010. 235 p. (In Russian).
4. Fridman A. Ya., Fridman O. V., Zuenko A. A. *Situatsionnoe modelirovanie prirodno-tekhnicheskikh kompleksov* [Situational Modelling of Nature-Technical Complexes]. Saint-Petersburg, Politehnicheskii universitet Publ., 2010. 436 p. (In Russian).
5. Perovskaya E. I. *Osnovy gibkoi avtomatizatsii* [Basics of Flexible Automation]. Leningrad, LIAP Publ., 1986. 32 p. (In Russian).
6. Fridman O. V., Fridman A. Ya. Situational Modelling of Complex Nature-Technical Complexes Considering Safety Matters. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, no. 3, pp. 71–79 (In Russian).
7. Tsalenko M. Sh. *Modelirovanie semantiki v bazakh dannykh* [Modelling of Semantics in Databases]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 288 p. (In Russian).
8. Val'kovskii V. A. Semantics of Manipulations with Database of Intelligence Systems. *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya*, 1984, ser. 2, no. 3, pp. 14–19 (In Russian).
9. Kulik B. A., Kurbanov V. G., Fridman A. Ya. Relations Theory as a Tool for Semantic Data Analysis and Knowledge. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, 2010, ser. 10, no. 4, pp. 1–11 (In Russian).
10. Popov E. V. *Ekspertnye sistemy: Reshenie neformalizovannykh zadach v dialoge s EVM* [Expert Systems: Computer-Aided-Dialogue Solving of Non-Formalized Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 288 p. (In Russian).
11. *Algoritm perevoda koeffitsientov nechetkoi logiki v koeffitsienty uverenosti pri razrabotke ekspertnoi sistemy v srede GURU* [An Algorithm to Translate Coefficients of Fuzzy Logic into Confidence Coefficients during Development of an Expert System by Means of the GURU Shell]. Available at: [http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/3480/1/Zaitseva%20T.V\\_Computer.pdf](http://dspace.bsu.edu.ru/bitstream/123456789/3480/1/Zaitseva%20T.V_Computer.pdf) (accessed 6 September 2013).

УДК 510.6:683.3:531

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.35

## КОМБИНИРОВАННОЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОЕ И ЛИНГВИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

А. Е. Городецкий<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

И. Л. Тарасова<sup>б</sup>, канд. техн. наук, доцент

В. Ю. Зиняков<sup>а</sup>, аспирант

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** рассмотрение логико-вероятностного моделирования отказов блоков сложной системы различного типа с учетом связей между блоками, основанного на логико-лингвистическом подходе. **Результаты:** описана процедура моделирования, сочетающая логико-вероятностный и логико-лингвистический методы моделирования процессов изменения во времени параметров блоков сложной системы в процессе ее эксплуатации. Разработана модель, реализующая упрощенный подход к проблеме учета связей между блоками сложной системы с использованием логико-вероятностного и лингвистического метода моделирования. Реализован алгоритм моделирования изменения во времени вероятности отказа сложной системы в виде компьютерной программы в среде C#. **Практическая значимость:** предложенный подход к проблеме учета связей между блоками сложной системы при моделировании изменения во времени вероятностей их отказа позволяет повысить точность прогнозирования вероятности отказа как для одного блока, так и для связанных с ним других блоков, что приводит к отказу всей системы. Полученная модель может быть применена для управления живучестью сложной системы, например гидроэлектростанции. Результаты, полученные при моделировании, открывают возможности для дальнейших исследований, таких как адаптация алгоритма, для моделирования большого множества объектов, а также создания в будущем экспертной системы, позволяющей обслуживать сложные системы и предотвращать аварии и катастрофы. По результатам эксплуатации и прогнозирования отказов конкретных систем можно провести коррекцию вводимых в процессе моделирования коэффициентов связи и интервалов квантования фазифицируемых данных, за счет чего может быть повышена достоверность и точность моделирования.

**Ключевые слова** — логико-вероятностное моделирование, логико-лингвистическое моделирование, теория вероятности, экспертные системы, случайные процессы.

### Введение

При эксплуатации любого блока системы существует воздействие на него различных факторов, из-за чего происходит изменение (ухудшение) во времени его технического состояния, что приводит к увеличению вероятности отказа как отдельного блока, так и системы в целом. Особенностью этих факторов является их колебание во времени, носящее стохастический характер. К наиболее существенным факторам относятся технологические нагрузки, прочностные характеристики материала детали, ее геометрические размеры. Кроме них целесообразно выделить также соблюдение условий технологического процесса, качество технического обслуживания, ремонт и др. [1]. Указанные факторы являются случайными и, соответственно, сроки отказов тоже представляют собой случайную величину. Поэтому анализ изменения во времени вероятности отказа сложной системы и прогнозирование ее отказов целесообразно осуществлять на основе математического и компьютерного моделирования.

При моделировании обычно выделяют четыре типа исходной информации: статистика ре-

монтов, данные о технологических нагрузках, оценки ресурса, статистика диагностик [2]. Это позволяет разделить имеющиеся модели на четыре вида, а именно: ресурсная модель, основанная на данных о сроках ремонта; силовая модель, основанная на прочностных и геометрических характеристиках блоков и статистики технологических нагрузок; диагностическая модель, основанная на данных диагностики, и экспертная модель, основанная на экспертных оценках ресурсов блоков системы. При использовании любой из перечисленных моделей изначально определяются параметры к прогнозированию, а затем выполняется процедура прогнозирования.

Экспертная модель наиболее простая из всех параметризирующих моделей. Ее параметры определяются на основании экспертных оценок ресурсов блоков системы. Совокупность исходных данных для этой модели представляется как «Экспертные оценки». Использование данной модели рационально на ранней стадии эксплуатации оборудования, когда нет достаточного количества статистической информации о ремонтах и техническом обслуживании оборудования.

Одним из перспективных направлений при создании экспертных моделей является разра-

ботка логико-вероятностных методов, математическая сущность которых заключается в использовании функций алгебры логики (ФАЛ) для аналитической записи условий работоспособности системы, и строгих способов перехода от ФАЛ к вероятностным функциям, объективно выражающим надежность этой системы [3–7]. Привлекательность логико-вероятностных методов для инженеров заключается в основном в их исключительной четкости, однозначности и больших возможностях при анализе влияния любого элемента на надежность всей системы. Однако существуют и трудности на пути активного использования этих методов. В частности, для сложных задач и структур, описываемых ФАЛ произвольной формы, непосредственный переход к вероятности истинности ФАЛ не прост.

При алгебраизации ФАЛ путем представления ее в виде полинома Жегалкина вычисление вероятности полученной сложной логической функции (СЛФ) легко формализуется [8]. Однако СЛФ, описывающая отказ сложной системы, содержащей большое число блоков, будет содержать большое число слагаемых. Соответственно, еще большее число слагаемых будет в формуле вычисления ее вероятности, поскольку число слагаемых в выражении для вероятности СЛФ возрастает по экспоненте от числа составляющих ее логических слагаемых. Вряд ли можно ожидать, что будет найден алгоритм, принципиально уменьшающий экспоненциальную сложность вычислительных процедур. В случае приведения СЛФ к ортогональному виду (совершенной дизъюнктивной нормальной форме) число ее слагаемых также имеет экспоненциальную зависимость от исходной размерности. Поэтому вычисление вероятности логической функции «в лоб», без предварительных приближенных оценок числа «удерживаемых» членов, приводит к неоправданно большим затратам машинного времени или памяти ЭВМ [9].

Тем не менее можно значительно сократить объем вычислений, если оценивать погрешности, вносимые составляющими, входящими в группу удаленных от начала полинома вероятности слагаемых, слабо влияющих на величину вычисляемой вероятности. Это позволит существенно уменьшить объем вычислений путем «отсечения хвостов», дающих малый вклад в значение вероятности СЛФ, описывающей отказ системы [9]. При расчете вероятности СЛФ полином вероятности которой содержит, например, 45 слагаемых, достаточно учитывать 10–15 первых, тогда выигрыш во времени будет более чем в 3 раза [10]. Кроме того, лексикографическое упорядочение фундаментального вектора СЛФ обеспечивает независимое вычисление слагаемых в полиномиальном выражении для ее вероятности, что

дает возможность при проведении вычислений контролировать вычислительный процесс и принимать решение о его прекращении при достижении требуемой точности [10]. Недостатком данного подхода к вычислению вероятности отказа сложной системы является необходимость выполнять требования независимости логических переменных, входящих в СЛФ, характеризующую отказ системы.

Вычисление вероятности отказа сложной системы можно также проводить на основе ортогонализации в алгебре кортежей [4]. Это является весьма трудоемкой операцией, однако разработанные методы сокращения ее трудоемкости [5], которые во многих случаях позволяют существенно уменьшить время вычисления для формул с большим числом переменных. В частности, если результат вычисления предназначен для многократного применения с изменяющимися значениями вероятностей событий, то затраты времени для получения окончательной формулы являются оправданными. Существенно сократить число вычислительных операций можно в тех случаях, когда исходная логическая формула последовательно изменяется в силу того, что изменяется структура исследуемой системы [5]. Кроме того, в алгебре кортежей получение расчетной формулы для точного вычисления вероятности может быть выполнено и для случаев, когда в дизъюнкции составные подформулы не являются взаимно независимыми [6]. Однако при оценке изменения во времени СЛФ, описывающей отказ системы с учетом связей между блоками, за исключением простейших схем, возникают определенные сложности и неоднозначности [3, 7]. В данной статье рассматриваются возможные пути решения проблемы моделирования изменения во времени вероятности отказа сложной системы с учетом связей между блоками.

### Вычисление вероятностей отказов сложной системы

При использовании изложенного в работах [1, 3, 7] метода алгебраизации ФАЛ получаемую СЛФ, описывающую отказ системы, содержащей  $n$  блоков, можно записать в виде

$$Y = AF, \quad (1)$$

где  $A$  — прямоугольная двоичная матрица, содержащая идентификационные строки  $C_j$   $j$ -отказов, имеющие размерность  $N = 2^n - 1$  и состоящие из нулей и единиц;  $F$  — фундаментальный вектор логической системы неисправностей блоков  $\varphi_i$  ( $\varphi_i = 1$  означает отказ  $i$ -го блока системы) также размерностью  $N = 2^n - 1$ .

Фундаментальный вектор  $F$  представляет собой упорядоченное множество элементов декар-

тового произведения базисного вектора отказов блоков системы:

$$\Phi^T = \langle \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n \rangle. \quad (2)$$

Поэтому

$$F^T = \langle \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_1, \varphi_3, \dots, \varphi_{n-1}, \varphi_n, \dots, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_{n-1}, \varphi_n \rangle. \quad (3)$$

Естественно, что расположение нулей и единиц в идентификационных строках  $C_j$   $j$ -отказов должно соответствовать физически реализуемым неисправностям системы. Например, при  $n = 4$  и учете отказов только первого и второго блоков системы строка может быть следующей:

$$C_j = \langle 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 \rangle. \quad (4)$$

Это означает, что  $(\varphi_1 = 1 \vee \varphi_2 = 1)$  или  $(\varphi_1 = 1 \wedge \varphi_2 = 1)$ , а все остальные члены равны 0. Следовательно, в зависимости от типа отказа  $Y_j$  будут те или иные сочетания единиц и нулей в идентификационной строке  $C_j$ . Тогда вид отказа будет определяться следующей формулой:

$$Y_j = C_j F. \quad (5)$$

Если известны вероятности отказов  $i$ -х блоков системы  $P_{oi} \{x_i = 1\}$ , то при независимости их отказов вероятности тех или иных  $j$ -х видов отказов системы  $P_{cj} \{Y_j = 1\}$  можно вычислить приближенно, используя следующую полиномиальную формулу [2]:

$$P_{nj} = (-1)^0 \sum_{\gamma=1}^r P_{\gamma} + (-1)^1 \sum_{\gamma\eta} P_{\gamma} P_{\eta} + \dots + (-1)^{r-1} \prod_{\gamma=1}^r P_{\gamma}, \quad (6)$$

где  $r$  — размерность  $Y_j$  или число единиц в строке  $C_j$ ;  $j \neq \eta$  — номера членов полинома (5);  $P_i$  — вычисленные либо заданные значения вероятности  $i$ -го члена полинома (5). При этом следует задаться требуемой точностью вычисления  $\Delta P_{cj}$ , и процесс вычисления, начиная с первого члена полинома (6), продолжать до тех пор, пока добавка будет меньше  $\Delta P_{cj}$ . В результате вычислений мы получим вектор вероятностей отказов системы

$$P_c^T = \langle P_{c1} P_{c2} \dots P_{cj} \dots P_{cM} \rangle, \quad (7)$$

где  $M$  — число  $j$ -идентификационных строк системы.

Очевидно, что надежность системы следует оценивать по максимальной вероятности из всех  $P_{cj}$ , которая будет соответствовать идентификационной строке  $C_j$ , содержащей одни единицы.

С течением времени  $T$  эксплуатации сложной системы (обычно  $T = \max\{t_{ik}\}$ ) вероятности безотказной работы ее блоков  $P_{oi}(t_{ik})$ , где  $t_{ik}$  —  $k$ -й мо-

мент времени эксплуатации  $i$ -го блока, убывают с разной скоростью, кроме того, у разных блоков  $t_{ik}$  может быть различным. Последнее требует периодического в процессе эксплуатации системы переычисления всех  $P_{cj}$  и переоценки текущей надежности системы. Чаще всего время эксплуатации блоков  $t_{ik}$  совпадает с временем работы  $T$  системы в целом. Однако могут быть и другие ситуации. Например, какие-либо  $i$ -е блоки системы могут иметь резервные блоки, которые включаются в работу только по сигналу  $v_i$  отказа резервируемого блока. В системе могут быть  $j$ -е блоки, промежутки эксплуатации  $\Delta t_{jk}$  которых во время эксплуатации  $T$  системы жестко заданы. В системе также могут быть  $s$ -е блоки, которые включаются и выключаются по внешним сигналам  $\theta_s$ , например, иницируемым оператором. Кроме того, могут быть  $q$ -е блоки, надежность которых характеризуется не временем наработки на отказ и вероятностью безотказной работы, а числом включений и выключений  $g_{qk}$ , как, например, различные переключатели. В последнем случае необходимо в течение времени эксплуатации  $T$  системы следить за числом включений таких блоков и в зависимости от этого числа уменьшать вероятность его безотказной работы по заданному.

Далее будем считать, что убывание вероятности  $P_{oi}(t_{ik})$  безотказной работы каждого блока происходит, как это обычно бывает, по экспоненциальному закону [8]

$$D_{ai}(t_{ik}) = \exp(-\alpha_{ik} t_{ki}), \quad (8)$$

где  $\alpha_{ik}$  — коэффициент убывания вероятности безотказной работы, соответствующий  $k$ -му моменту времени эксплуатации  $i$ -го блока [для  $q$ -х блоков в уравнении типа (8) вместо  $t_{ik}$  надо подставлять  $g_{qk}$ ]. Начальный коэффициент  $\alpha_{i0}$  может быть найден из уравнения вида (8), если для блоков системы заданы наработка на отказ  $t_i$  и вероятность безотказной работы  $P_{oi}(t_i)$  в этот момент времени. Как правило, указанные параметры блоков приводятся в их технических характеристиках. Аналогично можно вычислить значения  $\alpha_{q0}$  и для  $q$ -х блоков. Поэтому оценка текущей надежности блоков, а также системы в целом при независимости отказов ее блоков не вызывает затруднений, так как в этом случае можно считать, что коэффициенты убывания вероятностей безотказной работы всех блоков не зависят от времени.

В случае если какая-либо вероятность  $P_{cj}$  неизвестна либо нет уверенности в независимости отказов блоков системы, предложенный подход к вычислению отказов системы может дать значительные погрешности [4]. В ряде случаев вычисление вероятности отказа сложной системы можно проводить на основе ортогонализации в алгебре кортежей. Однако при этом значительно

усложняется процесс получения ФАЛ, описывающей отказы системы, и сами вычисления. Указанную задачу можно решить приближенно при использовании предлагаемого упрощенного учета связей между блоками системы.

**Упрощенный подход к проблеме учета связей между блоками сложной системы**

В случае если о системе известно только наличие или отсутствие связей между блоками, т. е. известна ее топология, но характеристики связей не известны, точность моделирования изменения во времени вероятности отказа такой системы можно повысить за счет предлагаемой процедуры упрощенного учета влияния изменения параметров одних блоков на параметры связанных с ними блоков и, следовательно, на значения вероятностей отказов этих блоков. Это будет означать, что в уравнении (6) для расчета вероятностей отказов системы будут использоваться вероятности, приближенно соответствующие значениям условных вероятностей.

Убывание вероятностей отказов блоков с течением времени связано, прежде всего, с уходом их параметров. Например, с течением времени происходит изменение размеров деталей за счет трения. Это вызывает увеличение амплитуды вибраций. Соответственно увеличивается вероятность отказа такого блока. Таким образом, вероятность отказа связана с математическим ожиданием (МО) параметра блока. При нормальном распределении указанная связь может быть описана следующим широко известным соотношением [9]:

$$P_i(t_{ik}) = 1 - \Phi((b_i - m_i(t_{ik})) / \sigma_i) + \Phi((-b_i - m_i(t_{ik})) / \sigma_i) = 1 - P_{\bar{a}i}(t_{ik}), \quad (9)$$

где  $b_i$  — предельно допустимое значение параметра  $i$ -го блока;  $m_i(t_{ik})$  и  $\sigma_i$  — его МО и среднеквадратическое отклонение (СКО) соответственно;  $\Phi(x)$  — интеграл вероятности Гаусса, который не выражается через элементарные функции, но существует таблицы его значений [9] либо его приближенные выражения в виде ряда с убывающими членами, например в виде [10]

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( x - \frac{x^3}{1!3} + \dots + \frac{(-1)^l}{l!(2l+1)} x^{2l+1} + \dots \right). \quad (10)$$

Поскольку обычно для каждого блока известны начальные значения МО их параметров  $m_i(t_{i0})$  и значения  $t_i$ ,  $P_{\bar{a}i}(t_i)$ ,  $b_i$ , то величина СКО  $\sigma_i$  для каждого блока может быть вычислена из соотношений вида (9) с использованием либо таблицы значений  $\Phi(x)$  [9], либо упрощенного выражения  $\Phi(x)$  в виде ряда (10).

Величина СКО  $\sigma_i$  конкретного параметра каждого блока связана с физическими процессами в этом блоке, которые слабо изменяются в ходе эксплуатации исправно работающего блока. Поэтому будем считать, что СКО  $\sigma_i$  не зависят от времени исправно работающего блока, хотя это и снижает несколько точность моделирования. Кроме того, для каждого  $i$ -го блока могут быть вычислены начальные значения их коэффициентов убывания  $\alpha_{i0}$  из уравнения вида (8).

В связи с этим перед началом моделирования изменения во времени вероятности отказа сложной системы, содержащей  $n$  связанных определенным образом блоков, необходимо составить таблицу связей между блоками системы, исходя из ее топологии, задать зависимости времен работы каждого блока  $t_{ik}$  от времени работы системы, например в виде таблиц. Затем для каждого блока по известным значениям наработки на отказ и вероятности безотказной работы по уравнению вида (8) вычислить начальные значения их коэффициентов убывания  $\alpha_{i0}$  и, задав предельно допустимые значения их параметров  $b_i$  и начальные значения их МО  $m_i(t_{i0})$ , вычислить их СКО  $\sigma_i$  из соотношений вида (9) с использованием таблицы значений  $\Phi(x)$  или ряда (10).

В системе могут быть блоки, которые:

- во время  $T$  работы системы работают все время  $t_{ik}$  (табл. 1);
- во время работы  $T$  системы работают эпизодически (табл. 2);
- имеют резервные. Тогда основной блок за время работы  $T$  системы работает до тех пор, пока вероятность его отказа  $P_{oi}(t_{ik})$  меньше допустимой вероятности  $P_{oi}^p$ , а после этого включается резервный блок и вероятность его отказа  $P_{oi}^p(t_{ik}^p)$  начнет расти по экспоненциальному закону (табл. 3), где  $t_{ik}^p$  — время работы резервного блока;
- во время работы  $T$  системы включаются и выключаются в зависимости от наличия или отсутствия внешнего сигнала  $\theta_i$  (табл. 4).

Кроме того, в процессе моделирования средние значения параметров блоков  $M_i(t_{ik})$  с течением времени эксплуатации  $t_{ik}$ , изменяясь, будут

■ Таблица 1

$k$	1	2	3	4	5	6	...	$K$
$t_{ik}$ , ч	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	...	$T$

■ Таблица 2

$k$	1	2	3	4	5	6	...	$K$
$t_{2k}$ , ч	$10^4$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	...	$T$
$t_{3k}$ , ч	0	$10^4$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	...	$T - 10^4$

■ Таблица 3

$k$	1	2	3	4	5	6	...	$K$
$P_{o4}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$\geq P_{o4}^{\Delta}$	$\geq P_{o4}^{\Delta}$	...	$\geq P_{o4}^{\Delta}$
$t_{i4}, \text{ч}$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	0	...	0
$P_{i4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	$<P_{o4}^{\Delta}$	...	$<P_{o4}^{\Delta}$
$t_{i4}^{\Delta}, \text{ч}$	0	0	0	0	0	$10^4$	...	$(K-5)\Delta T$

■ Таблица 4

$k$	1	2	3	4	5	6	7	...	$K$
$\theta_i$	0	0	1	1	0	0	1	...	1
$t_{ik}, \text{ч}$	0	0	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	...	$\left(\frac{K-1}{2}\right)\Delta T$

приближаться к опасному (критическому)  $d_i$ , которое перед началом моделирования должно быть задано, и тем более к предельно допустимому  $b_i$  значению. Очевидно, что такая ситуация сказывается на вероятности отказов этих и связанных с ними блоков. Например, изменение выходного напряжения блока питания естественно приводит к изменению коэффициента усиления связанного с ним блока усиления. Однако проблема учета влияния параметров одних блоков системы на параметры связанных с ними блоков при расчете вероятностей отказов до сих пор не имеет приемлемого для практики решения [10]. Соответственно, нет простого решения учета влияния на значения вероятностей отказов связанных блоков, что приводит к большим ошибкам при вычислении изменения во времени вероятности отказа сложной системы в процессе ее эксплуатации. Аналитический учет данного факта в сложной системе, даже если известны необходимые зависимости, носящие, как правило, стохастический характер, неизбежно приводит к весьма трудоемким вычислениям. Поэтому и предлагается упрощенный подход к данной проблеме.

Моделирование можно осуществлять дискретно с некоторым шагом  $\Delta T$ , который задается перед началом моделирования. Тогда время работы системы  $T = k\Delta T$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots, K$  и  $K$  — задаваемое перед началом моделирования конечное число шагов моделирования.

На первом шаге ( $k = 0$ ) моделирования значения МО параметров блоков известны, а на последующих шагах в моменты времени  $k\Delta T$  для каждого блока определяют их время работы  $t_{ik}$  и по уравнению (8) вычисляют вероятности безотказной работы  $P_{oi}(t_{ik})$  и соответствующие им вероятности отказов  $P_{oi}(t_{ik}) = 1 - P_{oi}(t_{ik})$ . Затем по уравнению (9) с использованием таблицы [9] либо

приближенного выражения  $\Phi(x)$  вычисляют значения МО их параметров  $m_i(t_{ik})$ .

В процессе моделирования на каждом шаге  $k$  для каждого  $i$ -го блока вычисляют  $H$  значений случайных параметров  $\xi_{ih}^n$  с нормальным распределением и известными значениями их математических ожиданий  $m_i(t_{ik})$  и СКО  $\sigma_i$ . Для этого можно, например, каждый параметр  $\xi_{ih}^n$  вычислять по формуле

$$\xi_{ih}^n = m_i(t_{ik}) + \sigma_i \left\{ \sum_{j=1}^{12} \xi_j - 6 \right\}, \quad (11)$$

где  $\xi_j$  — случайное число, распределенное по равномерному закону в интервале от 0 до 1, которое можно получить, используя стандартный генератор случайных чисел, имеющийся практически в любом компьютере.

После этого вычисляют средние значения этих параметров:

$$M_i(t_{ik}) = \left( \sum_{h=1}^H (\xi_{ih}^n) \right) / H. \quad (12)$$

При попадании среднего значения  $M_i(t_{ik})$  параметров какого-либо  $i$ -го блока в некоторый момент времени его эксплуатации  $t_i$  в опасную зону  $d_i \leq |M_i(t_{ik})| < b_i$  для этого блока устанавливаем коэффициенты связей  $w(i)$ , характеризующие состояния  $i$ -го оборудования, и  $u(i)$ , характеризующие удаленности  $i$ -го блока от аварийного или опасного. Эти параметры могут быть заданы следующим образом:

$w(i) = 0$  — аварийный,  $w(i) = 2$  — опасный,  $w(i) = 1$  — нормальный;

$u(i) = 0$  — удаленность более чем через один,  $u(i) = 1$  — удаленность через один,  $u(i) = 2$  — непосредственно связанный,  $u(i) = 3$  — непосредственно сам.

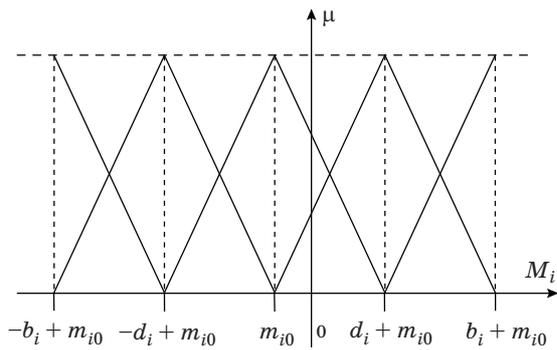
Тогда для данного  $i$ -го блока в рассматриваемый момент времени  $w(i) = 2$  и  $u(i) = 3$ .

После чего осуществляем сдвиг МО:

$$m_i^*(t_{ik}) = m_i(t_{ik}) + \sigma_i w(i) u(i) M_i(t_{ik}) \mu(M_i(t_{ik})), \quad (13)$$

где  $m_i^*(t_{ik})$  — сдвинутое МО  $i$ -го блока;  $\mu(M_i(t_{ik}))$  — функция принадлежности вычисленного среднего значения к тому или иному интервалу, которая определяется в соответствии со следующими правилами (рис. 1):

- 1) если  $-\infty \leq M_i(t_{ik}) < b_i + m_i(t_{i0})$ , то  $\mu(M_i(t_{ik})) = 1$ ;
- 2) если  $-b_i + m_i(t_{i0}) \leq M_i(t_{ik}) \leq -d_i + m_i(t_{i0})$ , то  $\mu(M_i(t_{ik})) = \max\{(M_i(t_{ik}) - m_i(t_{i0}) + d_i)/(d_i - b_i); (M_i(t_{ik}) - m_i(t_{i0}) + b_i)/(b_i - d_i)\}$ ;
- 3) если  $-d_i + m_i(t_{i0}) \leq M_i(t_{ik}) \leq m_i(t_{i0})$ , то  $\mu(M_i(t_{ik})) = \max\{(M_i(t_{ik}) + m_i(t_{i0}))/d_i; (M_i(t_{ik}) - m_i(t_{i0}) + d_i)/d_i\}$ ;
- 4) если  $m_i(t_{i0}) \leq M_i(t_{ik}) \leq d_i + m_i(t_{i0})$ , то  $\mu(M_i(t_{ik})) = \max\{(-M_i(t_{ik}) + m_i(t_{i0}) + d_i)/d_i; (M_i(t_{ik}) - m_i(t_{i0}))/d_i\}$ ;



■ Рис. 1. Фаззификация

- 5) если  $d_i + m_i(t_{i0}) \leq M_i(t_{ik}) \leq b_i + m_i(t_{i0})$ , то  $\mu(M_i(t_{ik})) = \max\{(M_i(t_{ik}) - m_i(t_{i0}) - b_i)/(d_i - b_i); (M_i(t_{ik}) - m_i(t_{i0}) - d_i)/(b_i - d_i)\}$ ;
- 6) если  $b_i + m_i(t_{i0}) \leq M_i(t_{ik}) \leq \infty$ , то  $\mu(M_i(t_{ik})) = 1$ .

Затем устанавливаем  $j$ -е номера блоков, непосредственно связанных с блоком, параметры которого попали в опасную зону, и для них устанавливаем значения коэффициентов связи  $w(j) = 1$ ,  $u(j) = 2$  и также осуществляем сдвиг МО, как в формуле (13), а  $\mu(M_j(t_{jk}))$  вычисляем по тем же правилам вида 1)–6).

После этого определяем номера  $q$ -х блоков, связанных с найденным  $i$ -м через один блок, и для них устанавливаем  $w(q) = 1$ ,  $u(q) = 1$  и также осуществляем сдвиг МО, как в формуле (13), а  $\mu(M_q(t_{qk}))$  вычисляем по тем же правилам вида 1)–6).

Если теперь на первом шаге моделирования ( $k = 0$ ), после сдвига МО, окажется, что абсолютное значение какого-то блока будет больше допустимого значения ( $|m_i(t_{ik})| > b_i$ ), то этот блок признается неработоспособным, вероятность его отказа приравнивается единице ( $P_{oi} = 1$ ) и, соответственно, приравнивается единице вероятность отказа всей системы ( $P_c = 1$ ). В противном случае следует вычислять, исходя из сдвинутых значений МО, значения вероятностей отказов всех блоков по формуле (9), что будет упрощенным эквивалентом расчета условных вероятностей. После этого можно вычислить вероятность отказа всей системы, используя, например, полиномиальную формулу (6). Точность расчета для конкретной системы можно повысить за счет настройки коэффициентов связей  $w$  и  $u$  по результатам экспериментов.

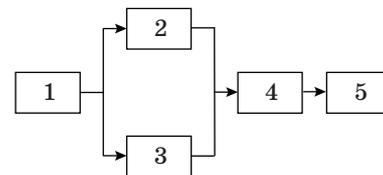
На следующих шагах моделирования ( $k > 0$ ) по вычисленным на предыдущем шаге значениям вероятностей отказов всех блоков и моментам времени их работы из уравнения вида (8) вычисляют новые значения коэффициентов убывания вероятностей их отказов  $\alpha_{ik}$ . Затем в следующий момент времени  $k\Delta T$  для каждого блока снова определяют их время работы  $t_{ik}$ , по уравнению (8) вычисляют их вероятности отказов  $P_{oi}(t_{ik})$ , по

уравнению (9) вычисляют значения МО их параметров  $m_i(t_{ik})$ , вычисляют новые  $H$  значений случайных  $\xi_{ih}^n$  и т. д. При этом если на каком-то шаге у какого-то блока его абсолютное значение  $m_i(t_{ik})$  будет больше допустимого ( $|m_i(t_{ik})| > b_i$ ), то этот блок признается неработоспособным, вероятность его отказа приравнивается единице ( $P_{oi} = 1$ ) и, соответственно, приравнивается единице вероятность отказа всей системы ( $P_c = 1$ ). В противном случае следует вычислить, исходя из сдвинутых значений МО, значения вероятностей отказов всех блоков по формуле (9), что будет упрощенным эквивалентом расчета условных вероятностей. После этого можно вычислить вероятность отказа всей системы, используя, например, полиномиальную формулу (6).

Таким образом, в предлагаемом варианте моделирования учет связей между блоками системы при наступлении опасной ситуации достигается за счет скачкообразного изменения МО параметров данного и связанных с ним блоков, что позволяет в первом приближении учесть взаимовлияния параметров блоков на изменения вероятности их отказов в процессе эксплуатации системы. Процедуру можно еще более упростить, если сразу скачком изменять значения коэффициентов убывания вероятностей их отказов  $\alpha_{ik}$ .

**Пример моделирования изменения во времени вероятности отказа сложной системы**

Рассмотрим, как изменяется во времени вероятность отказа системы, структура которой имеет вид, показанный на рис. 2. По результатам анализа этой структурной схемы получена таблица связей между блоками системы (табл. 5).



■ Рис. 2. Структурная схема системы

■ Таблица 5

Аварийный блок, $i$	Блоки, связанные с аварийным направую, $j$	Блоки, связанные с аварийным через один, $k$
1	2, 3	4
2	4	5
3	4	5
4	5	–
5	–	2, 3



ностном моделировании сложных систем // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 2. С. 125–136.

4. Кулик Б. А. Вероятностная логика на основе алгебры кортежей // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2007. № 1. С. 118–127.
5. Кулик Б. А., Зуенко А. А., Фридман А. Я. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. — 235 с.
6. Городецкий А. Е. Основы теории интеллектуальных систем управления. — Berlin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 314 с.
7. Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Экспертная система анализа и прогнозирования

аварийных ситуаций в энергетических установках // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4. С. 59–63.

8. Венцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.
9. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. — М.: Наука, 1974. — 297 с.
10. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. — СПб.: Политехника, 2000. — 248 с.

UDC 510.6:683.3:531

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.35

### Combined Logical-Probabilistic and Linguistic Modeling of Complex System Failures

Gorodetsky A. E.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, g27764@yandex.ru

Tarasova I. L.<sup>b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, g172651@yandex.ru

Zinyakov V. Y.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, vziniakov@gmail.com

<sup>a</sup>National Research University Saint-Petersburg State Polytechnical University, 29, Polytechnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bolshoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Logical-probabilistic modeling of failures happening to complex system units of various types, taking into account the links between the units and using the logical-linguistic approach. **Results:** A modeling procedure was described which combines logical-probabilistic and logical-linguistic methods of modeling temporal changes in the parameters of complex system units during their operation. A model was developed implementing a simplified approach to the problem of taking into account the links between the units using the logical-probabilistic and linguistic modeling method. An algorithm was proposed of modeling the temporal changes in the probability of failure of a complex system. This algorithm was implemented as a C# computer program. **Practical relevance:** The proposed approach can increase the accuracy of predicting the probability of failure either for a single unit or for other related units fraught with the danger of a general system failure. The obtained model can be used to control the survivability of a complex system, such as a hydroelectric power station. The results obtained in the simulation open up opportunities for further research, such as the adaptation of the algorithm for modeling large sets of objects, as well as creating an expert system for maintaining complex systems and preventing accidents and disasters. The reliability and accuracy of the simulation can be improved by correcting the coupling coefficients introduced in the simulation and the quantification intervals of the fuzzified data.

**Keywords** — Logical-Probabilistic Modeling, Logical-Linguistic Modeling, Probability Theory, Expert Systems, Random Processes.

### References

1. Gorodetsky A. E., Dubarenko V. V. Combinatorial Method for Calculating the Probability of Complex Logic Functions. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 1999, vol. 39, no. 7, pp. 1201–1203 (In Russian).
2. Gorodetsky A. E., Tarasova I. L. *Nechetkoe matematicheskoe modelirovanie ploho formalizuemyyh processov i sistem* [Fuzzy Mathematical Modeling Difficult to Formalize Processes and Systems]. Saint-Petersburg, Politekhnikeskii universitet Publ., 2010. 336 p. (In Russian).
3. Gorodetsky A. E., Kulik B. A. Probability Calculation Logic Functions with Logical-Probabilistic Modeling of Complex Systems. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2013, vol. 25, no. 2, pp. 125–136 (In Russian).
4. Kulik B. A. Probabilistic Logic Based on the Algebra of Tuples. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2007, no. 1, pp. 118–127 (In Russian).
5. Kulik B. A., Zuenko A. A., Friedman A. J. *Algebraicheskiy podhod k intellektual'noi obrabotke dannyh i znaniy* [Algebraic Approach to Data Mining and Knowledge]. Saint-Petersburg, Politekhnikeskii universitet Publ., 2010. 235 p. (In Russian).
6. Gorodetsky A. E. *Osnovy teorii intellektual'nyh sistem upravleniya* [Fundamentals of the Theory of Intelligent Control Systems]. Berlin, LAP LAMBERT Academic Publ., 2011. 314 p. (In Russian).
7. Gorodetsky A. E., Kurbanov V. G., Tarasova I. L. Expert System of Analysis and Forecasting Emergencies in Power Generating Systems. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy*, 2012, no. 4, pp. 59–63 (In Russian).
8. Vencel' E. S. *Teoriya veroyatnosti* [Probability Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p. (In Russian).
9. Bejtmen G., Jerdeji A. *Vysshie transcendentnye funktsii. Funktsii Besselja, funktsii parabolicheskogo cilindra, ortogonal'nye mnogochleny* [Higher Transcendental Functions. Bessel Functions, Parabolic Cylinder Functions, Orthogonal Polynomials]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 297 p. (In Russian).
10. Rjabinin I. A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnyh sistem* [Reliability and Safety of Structurally Complex Systems]. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 2000. 248 p. (In Russian).

УДК 681.52

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.43

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОИСКА ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧЕ СОКРАЩЕНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**В. Ю. Емельянов<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, профессор

**А. Н. Докучаева<sup>а</sup>**, ассистент

<sup>а</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** на основе результатов анализа известных методов сокращения трудоемкости статистического моделирования продемонстрирована актуальность решения задачи поиска эффективных методов построения упрощенной модели исследуемой системы. Необходимо разработать подход к поиску приближенного решения системы, позволяющего расширить применимость методов сокращения трудоемкости статистического моделирования. **Результаты:** обоснована актуальность проведения исследований в области поиска методов построения упрощенных систем, разработан подход к упрощенному моделированию. Для нахождения упрощенного решения системы предлагается использовать построение «карты высот», позволяющей снизить трудоемкость моделирования. Такой подход обладает высокой эффективностью и не требует предварительных исчерпывающих знаний о статистических свойствах моделируемой системы. Продемонстрирована высокая эффективность метода для систем, которые сложно описывать полиномиальными моделями. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы в задачах сокращения трудоемкости статистического моделирования для повышения их эффективности в условиях неизвестности статистических характеристик моделируемых систем.

**Ключевые слова** — статистическое моделирование, методы сокращения трудоемкости моделирования, построение упрощенных систем, поиск приближенного решения.

### Введение

Для исследования характеристик сложных систем со случайными и неопределенными параметрами часто прибегают к методу статистического имитационного моделирования. Основным его недостатком является избыточное число экспериментов, требуемых для соблюдения точности оценок параметров [1, с. 13–14]. Эффективное решение проблемы трудоемкости может быть построено на адаптивном принципе организации эксперимента на основе методов «выделения главной части» и «комбинированного метода В. Н. Пугачева» [2].

Оба названных метода предусматривают использование в процессе эксперимента, помимо основной исследуемой модели, рассматриваемой как «черный ящик», ее упрощенного аналога, называемого главной частью в рамках первого метода или упрощенной моделью в рамках второго. В общем случае для их выбора требуется проведение предварительного исследования основной модели. Адаптивный принцип [3] предусматривает построение такой упрощенной модели в некоторой универсальной форме (с заданной структурой) и подбор ее параметров (настройку модели) непосредственно в процессе эксперимента.

В работе [3] авторами предлагается в качестве упрощенной использовать модель в форме поли-

нома, аппроксимирующего функцию отклика основной модели на случайные факторы. В данной статье будет продемонстрировано существование моделей, при исследовании которых подобная форма не обеспечивает достаточного эффекта снижения трудоемкости, и предложен альтернативный способ построения упрощенных моделей.

Для статистического имитационного моделирования характерна жесткая зависимость точности результата от количества проведенных опытов. На практике для определения количества требуемых опытов используют соотношение [4]

$$n_{\text{доп}}^* = \frac{\alpha_{\text{доп}}^2 D_X^*}{\varepsilon_{\text{доп}}^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{доп}}$  — доверительный интервал, заданный для оценки искомой характеристики системы (чаще всего  $\alpha_{\text{доп}} = 3\sigma$ );  $D_X^*$  — оценочная дисперсия усредняемых результатов моделирования, высчитанная предварительно (по начальной проведенной серии опытов);  $\varepsilon_{\text{доп}}$  — допустимая погрешность оценки.

Отсюда следует, что для сокращения трудоемкости статистического эксперимента при заданных значениях  $\varepsilon_{\text{доп}}$  и  $\alpha_{\text{доп}}$  необходимо искать пути снижения оценочной дисперсии  $D_X^*$  [5, с. 114], на что и направлены рассматриваемые методы.

Пусть модель исследуемой системы задана в форме системы дифференциальных уравнений

$\dot{X}_i(t) = \varphi_i(\mathbf{X}(t), t, \mathbf{V}), i = 1, 2, \dots, n$ , где  $\mathbf{X}(t) = (X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))$  — вектор переменных состояния системы;  $\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_n)$  — вектор случайных параметров. Для характеристики качества системы используется значение переменной состояния  $X_1$  в некоторый конечный момент времени. Поэтому вся задача сводится к оценке математического ожидания  $m_X = M[X_1(t, \mathbf{V})]$  [4, с. 142].

В рамках стандартной схемы [4, с. 142] статистического моделирования математическое ожидание системы независимых случайных величин по результатам  $n$  опытов с моделью оценивается как [5, с. 75; 6, с. 117]

$$m_X^* = \bar{X}_n = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (2)$$

В соответствии с методом выделения главной части [5, 7] точное решение системы  $X_1(t, \mathbf{V})$  заменяют приближенным  $Y(t, \mathbf{V})$  — «главной частью», для которой искомые статистические характеристики могут быть найдены аналитически, и на основе подстановки  $X_1(t, \mathbf{V}) = Z(t, \mathbf{V}) + Y(t, \mathbf{V})$  выполняют в модели системы замену переменной  $X_1(t, \mathbf{V})$  на  $Z(t, \mathbf{V})$ . По результатам статистического эксперимента с модифицированной моделью оценивают  $m_Z^*$ . Искомый результат получают как  $m_X^* = m_Y + m_Z^*$ . Теперь количество необходимых опытов определяется оценкой дисперсии  $D_Z^*$  случайной величины  $Z(t, \mathbf{V})$ :

$$n_{\text{оддд}} = \frac{\alpha_{\text{ддд}}^2 D_Z^*}{\varepsilon_{\text{ддд}}^2}. \quad (3)$$

При удачном выборе  $Y(t, \mathbf{V})$   $D_Z^*$  может оказаться значительно меньше, чем  $D_X^*$ , и количество требуемых для обеспечения заданной точности опытов существенно сократится. Однако вопрос оптимального выбора приближенного по критерию сокращения трудоемкости решения автор метода оставляет открытым.

Более эффективным можно считать комбинированный метод, разработанный В. Н. Пугачевым [2]. Он также предусматривает построение упрощенной модели, в том числе исследуемой аналитически, которая будет обеспечивать менее трудоемкий статистический эксперимент в сравнении со стандартной схемой. При этом обязательно должна быть определенная аналогия между упрощенной и исходной моделями, оценивающаяся по корреляционной связи реакций систем на одинаковые реализации случайных входных сигналов.

Здесь требуемое количество опытов для получения оценки с погрешностью не выше  $\varepsilon_{\text{доп}}$  определяется как

$$n_{\text{оддд}} = \frac{\alpha_{\text{ддд}}^2 D_R^*}{\varepsilon_{\text{ддд}}^2} (1 - r_{RS}^{*2}), \quad (4)$$

где  $D_R^*$  — оценочная дисперсия переменных состояния исходной системы и  $r_{RS}^{*2}$  — коэффициент корреляционной связи выходной величины исходной и упрощенной моделей. При удачном выборе упрощенной модели ( $r_{RS}^{*2}$  близок к 1) количество требуемых опытов также существенно сокращается.

Из рассмотренных выше методов сокращения трудоемкости моделирования систем следует, что эффективность их применения определяется успешным решением задачи поиска такой упрощенной модели, которая была бы близка к исходной по своим статистическим характеристикам. Особенно актуален этот вопрос в условиях невозможности нахождения аналитических решений систем.

### Построение упрощенной модели в виде полинома второй степени

В работе [3] применен способ поиска приближенного решения системы  $Y(t, \mathbf{V})$  для метода поиска главной части в виде полинома второй степени, где количество членов находится в прямой зависимости от размерности вектора случайных параметров  $\mathbf{V}$ , например:

- 1)  $m = 1: Y(\mathbf{V}) = C_0 V_1^{*2} + C_1 V_1^*$ ;
- 2)  $m = 2: Y(\mathbf{V}) = C_0 V_1^{*2} + C_1 V_2^{*2} + C_2 V_1^* V_2^* + C_3 V_1^* + C_2 V_2^*$ ;
- 3)  $m = 3: Y(\mathbf{V}) = \sum_{i=0}^2 C_i V_{i+1}^{*2} + C_3 V_1^* V_2^* + C_4 V_2^* V_3^* + C_5 V_3^* V_1^* + \sum_{i=1}^3 C_{i+5} V_i^*$ .

При этом величина дисперсии  $D_Z^*$  вводимой переменной состояния  $Z(t, \mathbf{V})$  является функцией нескольких независимых переменных  $C_j$ . Для достижения наименьшей трудоемкости (минимизации дисперсии  $D_Z^*$ ) коэффициенты полинома оптимизируются методом последовательного спуска. Авторы отмечают, что решающую роль в этом вопросе играет выбор начальных приближений вектора  $\mathbf{C}$ , поскольку не исключена ситуация, когда небольшое изменение произвольного коэффициента приводит к существенному изменению минимизируемой величины. Предлагается нормировать элементы  $V_i^*$  вектора  $\mathbf{V}$  на интервал области определения  $C_j$   $[-1; 1]$ , что позволит в качестве начальной точки для спуска выбрать начало координат.

Нормирование на указанный интервал производится следующим образом:  $V_i^* = (V_i + \Delta_i)/\rho_i$ , где  $\Delta_i = (V_{i \text{ min}} + V_{i \text{ max}})/2$  и  $\rho_i = (V_{i \text{ min}} - V_{i \text{ max}})/2$ , причем  $V_{i \text{ min}}$  и  $V_{i \text{ max}}$  — минимальное и максимальное значения  $i$ -й компоненты случайного вектора  $\mathbf{V}$ .

Как отмечалось ранее, имеется требование близости приближенного решения системы  $Y(t, \mathbf{V})$  по статистическим характеристикам к точному решению  $X_1(t, \mathbf{V})$ . Возникает вопрос, насколько поиск решения в виде полинома второй степени удовлетворяет поставленному условию. Необходимо также отметить, что в начале моделирования систем с заранее неизвестной структурой сложно предсказать, полиномы какой степени необходимо использовать для поиска наиболее удачного приближенного решения (избыточная степень полинома, очевидно, станет причиной чрезмерного расходования вычислительных ресурсов, прежде всего, на реализацию процедуры оптимизации, а недостаточная степень может снизить достигаемый эффект).

Для пояснения озвученного тезиса необходимо привести несколько примеров моделируемых систем. Рассмотрим предложенный метод построения главной части в виде полинома второй степени при моделировании системы, имеющей точное решение вида  $X_1(t, \mathbf{V}) = e^{-V_1 t} + e^{-V_2 t}$ , где  $t = 1$ , а случайные параметры  $V_1, V_2 \in [0; 10]$  распределены по равномерному закону. Допустимую погрешность результата  $\epsilon_{\text{доп}}$  примем равной 0,01. Для краткости будем именовать этот объект моделирования системой «А». В качестве другого примера (система «Б») возьмем такую систему, что  $X_1(t, \mathbf{V}) = \sin(V_1 t) + \sin(V_2 t)$ ,  $t = 1$  и  $V_1, V_2 \in [0; 4\pi]$

распределены по равномерному закону. Внешний вид функции точного решения для обеих систем представлен на рис. 1, а и б.

Согласно предложенному подходу, для поиска оптимальной по трудоемкости главной части должен использоваться полином следующего вида:

$$Y(t, \mathbf{V}) = C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_1^2 + C_4 V_1 V_2 + C_5 V_2^2. \quad (5)$$

Для исследования влияния различных членов оптимального полинома на эффективность решения задачи сокращения трудоемкости общее количество слагаемых  $S_\Sigma$  будем увеличивать от 1 ( $Y(t, \mathbf{V}) = C_1 V_1$ ) до 5 (5). Полученные в процессе моделирования оценки трудоемкости и их соотношение  $W$ , характеризующее эффективность применения метода, представлены в табл. 1 и 2.

В целом для системы «А» поиск приближенного решения системы  $Y(t, \mathbf{V})$  в виде полинома второй степени оказывается достаточно эффективным.

Для системы «Б» поиск упрощенной модели в форме (5) демонстрирует существенно меньшую эффективность. Кроме того, по имеющимся результатам можно судить, что для данной системы трудоемкость моделирования максимально снижается уже при  $S_\Sigma = 3$  и дальнейшее усложнение формы искомого полинома можно было бы

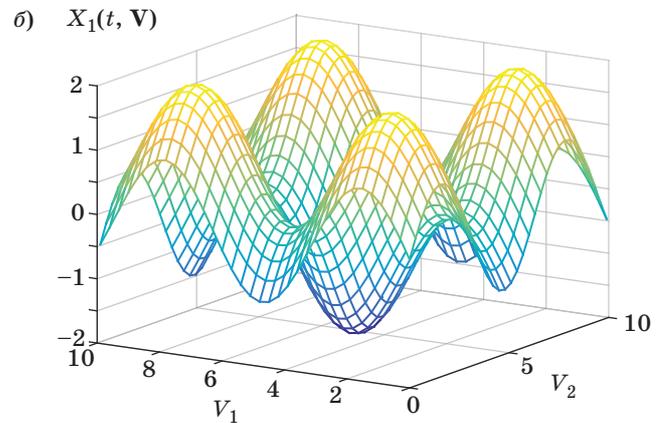
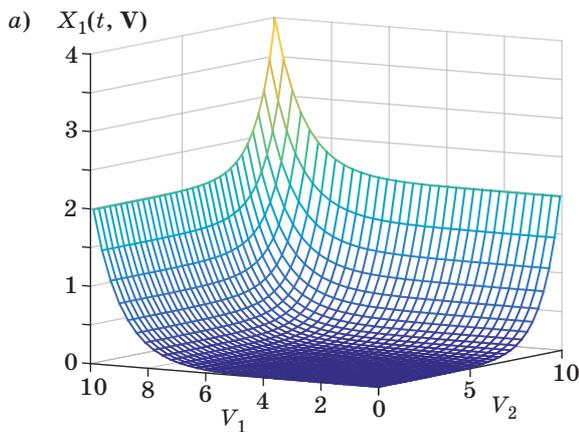


Рис. 1. Точные решения  $X_1(t, \mathbf{V})$  системы «А» (а) и системы «Б» (б)

Таблица 1. Моделирование системы «А» с применением стандартной схемы (метод 1) и метода выделения главной части (метод 2)

$S_\Sigma$	Оптимальный полином	Оценка требуемого числа опытов		$W$
		Метод 1	Метод 2	
1	$-0,243V_1$	8540	6793	1,26
2	$-0,250V_1 - 0,253V_2$	8756	4965	1,76
3	$-0,221V_1 - 0,241V_2 + 0,430V_1^2$	8510	3289	2,59
4	$-0,259V_1 - 0,247V_2 + 0,408V_1^2 + 0,027V_1V_2$	8680	3383	2,26
5	$-0,240V_1 - 0,228V_2 + 0,380V_1^2 + 0,004V_1V_2 + 0,379V_2^2$	7136	1887	3,78

■ Таблица 2. Моделирование системы «Б» с применением стандартной схемы (метод 1) и метода выделения главной части (метод 2)

$S_{\Sigma}$	Оптимальный полином	Оценка требуемого числа опытов		$W$
		Метод 1	Метод 2	
1	$-0,486V_1$	89 890	83 045	1,08
2	$-0,481V_1 - 0,393V_2$	89 740	78 212	1,15
3	$-0,409V_1 - 0,451V_2 - 0,103V_1^2$	90 146	76 645	1,18
4	$-0,449V_1 - 0,499V_2 + 0,005 V_1^2 + 0,024V_1V_2$	92 075	78 599	1,17
5	$-0,479V_1 - 0,544V_2 - 0,001V_1^2 - 0,071V_1V_2 + 0,030V_2^2$	89 572	76 241	1,17

не осуществлять. Тем не менее определить достаточное число слагаемых и их порядок до проведения эксперимента не представляется возможным.

**Построение упрощенной модели в виде карты высот**

Термин «карта высот» получил широкое распространение в разделах информатики, посвященных компьютерной графике и трехмерному моделированию [8, 9], а также в геодезии. В общем случае карта высот представляет собой поверхность  $P(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) = h(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ , где  $h(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$  — функция точки  $n$ -мерного евклидова пространства, характеризующая форму поверхности, определенной на  $(n - 1)$ -мерной координатной сетке.

Предлагается строить упрощенную модель системы путем аппроксимации карты высот функции отклика основной модели.

В стандартной схеме статистического моделирования, так же как и в упрощенных схемах, выделяют два этапа: инициализационную часть эксперимента — накопление начальной выборки, первичная оценка трудоемкости эксперимента и итеративную часть — последовательное уточнение трудоемкости и проведение недостающей части эксперимента. Для пояснения принципа формирования упрощенной модели системы в виде карты высот необходимо разделить всю выборку реализаций вектора случайных параметров  $\mathbf{V}$  на две части, соответствующие стандартной схеме: базовая выборка для формирования карты (основывается на инициализационной части эксперимента); выборка для приближенного расчета точек карты (соответствует итеративной части эксперимента).

Рассмотрим процедуру построения карты высот. На инициализационном этапе проводится небольшое количество экспериментов с исходной моделью  $X_1(t, \mathbf{V})$ , формирующих базовую выборку, причем  $X_1(V_1, V_2, \dots, V_m) = h(V_1, V_2, \dots, V_m)$  характеризует  $(m + 1)$ -мерное евклидово пространство, где значение функции  $h$  есть характеристика «возвышения» точного решения  $X_1(t, \mathbf{V})$  над

$m$ -мерным пространством реализаций вектора случайных параметров  $\mathbf{V}$  — своего рода координатной сеткой карты. Карта высот  $H = h(V_1, V_2, \dots, V_m) = X_1(t, \mathbf{V})$ , построенная на основе базовой выборки, используется при построении упрощенной модели для выборки, формируемой в результате итеративной части эксперимента.  $H$  является конечным множеством значений моделируемой статистической характеристики исходной системы (значений «высот» в данной терминологии) с мощностью, равной размерности базовой выборки.

На итеративном этапе моделирования подразумевается, что карта высот  $H$  уже сформирована. Значение приближенного решения системы для каждого элемента выборки, не входящего в начальную и являющегося реализацией вектора случайных параметров  $\mathbf{V}$ , вычисляется как усреднение высот двух (ближайших к рассматриваемой) точек, пропорциональное удалению от них. Поскольку рассматриваемое пространство является евклидовым, под близостью точек  $A(t, \mathbf{V})$  и  $B(t, \mathbf{V})$  с координатами  $(V_1^A, V_2^A, \dots, V_m^A)$  и  $(V_1^B, V_2^B, \dots, V_m^B)$  подразумевается соблюдение минимума расстояния между точками [10, с. 20]

$$R^{AB} = \sqrt{(V_1^B - V_1^A)^2 + (V_2^B - V_2^A)^2 + \dots + (V_m^B - V_m^A)^2} \quad (6)$$

Предположим, что необходимо найти значение приближенного решения упрощенной модели в точке  $C(t, \mathbf{V})$  с координатами  $(V_1^C, V_2^C, \dots, V_m^C)$ . Допустим, что ближайшими точками к  $C(t, \mathbf{V})$  в базовой выборке являются некоторые точки  $A(t, \mathbf{V})$  и  $B(t, \mathbf{V})$ , причем полученные при помощи (6) расстояния соотносятся следующим образом:  $R^{AC} < R^{BC}$ . Тогда в точке  $C(t, \mathbf{V})$  упрощенная модель будет иметь значение [10, с. 13]

$$H^C = h(V_1^C, \dots, V_m^C) = \frac{h(V_1^A, \dots, V_m^A)}{1 + R^{AC} / R^{BC}} + \frac{R^{AC} / R^{BC} \cdot h(V_1^B, \dots, V_m^B)}{1 + R^{AC} / R^{BC}} \quad (7)$$

Поясним смысл выражения (7) на примере 2-мерного евклидова пространства, где вектор случайных параметров  $\mathbf{V}$  — одномерный. Для наглядности допустим, что точные решения  $X_1(t, \mathbf{V})$  имеют разрывы первого и второго рода в точке  $V^0$  (рис. 2, а–в).

Очевидно, предложенный способ построения упрощенной модели применим как для метода снижения трудоемкости статистического моделирования В. Н. Пугачева, так и для выделения главной части [2, 11]. Кроме того, необходимо отметить, что имеется определенное влияние размерности базовой выборки на инициализационном этапе моделирования на вычисление приближенных значений посредством карты высот. Одним из направлений развития предлагаемого подхода может являться расширение классической схемы проведения эксперимента путем добавления промежуточного этапа: инициализационный этап, накопление достаточного объема выборки для построения карты высот, итеративный этап.

Как отмечалось ранее, метод выделения главной части подразумевает минимизацию дисперсии  $D_Z$ , где  $Z(t, \mathbf{V}) = X_1(t, \mathbf{V}) - Y(t, \mathbf{V})$ . Очевидно, что абсолютный минимум дисперсии будет до-

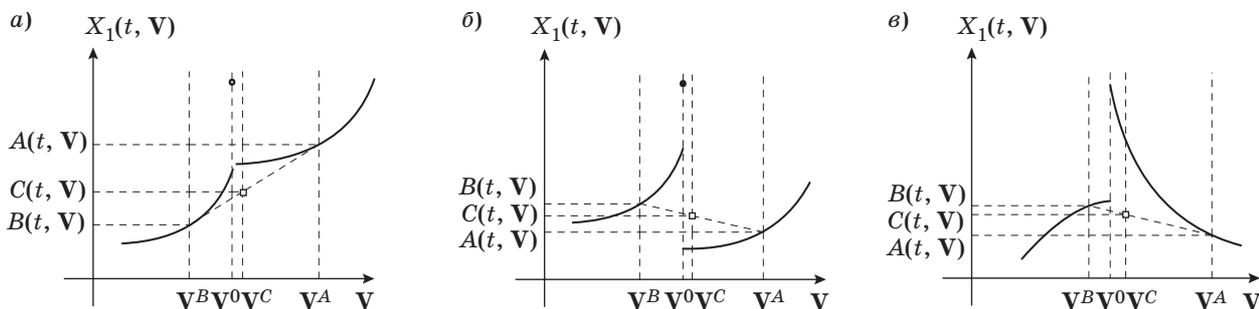
стигаться при  $X_1(t, \mathbf{V}) = Y(t, \mathbf{V})$ . Тогда приближенное решение для метода выделения главной части предлагается искать в виде  $Y(x_1, x_2) = X(x_1, x_2) + h$ , причем вместо точного значения  $X_1(x_1, x_2)$  будет использоваться приближенная карта высот  $X(x_1, x_2)$ , построенная на основе начальной выборки.

Проведем сравнительный анализ построения упрощенной модели для метода выделения главной части и комбинированного метода В. Н. Пугачева в виде полинома второй степени и в виде карты высот для модифицированной системы

«Б» (система «В»):  $X_1(t, \mathbf{V}) = \sum_{i=1}^5 \sin(tV_i)$ , где  $t = 1$

и  $\forall i \in [1; 5]: V_i \in [0; 4\pi]$  распределены по равномерному закону.

Результаты сравнения эффективности снижения трудоемкости при помощи полинома (метод 1) и карты высот (метод 2), реализованных в составе метода выделения главной части и комбинированного метода, представлены в табл. 3 и 4 соответственно. В таблицах обозначены:  $X_{\max}$  — максимальное значение  $X_1(t, \mathbf{V})$ , зафиксированное в базовой выборке;  $W_1$  — выигрыш метода 1 перед стандартной схемой;  $W_2$  — выигрыш метода 2 перед стандартной схемой.



■ **Рис. 2.** Вычисление координат точки  $C(t, \mathbf{V})$  упрощенной модели на основе карты высот (точки  $A(t, \mathbf{V})$  и  $B(t, \mathbf{V})$ ) при наличии разрывов первого рода в виде устранимого разрыва (а) и конечного скачка (б), а также при разрыве второго рода (в)

■ **Таблица 3.** Эффективность снижения трудоемкости моделирования системы «В» в рамках метода выделения главной части

$h$	Базовая выборка	Стандартная схема	Метод 1	Метод 2	$W_1$	$W_2$
0,99 $X_{\max}$	1000	233 339	195 746	120 359	1,19	1,94
1,99 $X_{\max}$	1000	232 409	193 513	120 748	1,20	1,92
3,99 $X_{\max}$	1000	233 835	193 079	121 379	1,21	1,93
3,99 $X_{\max}$	1500	224 083	195 273	108 561	1,15	2,06
3,99 $X_{\max}$	2000	225 638	193 309	95 244	1,17	2,37
3,99 $X_{\max}$	2500	236 519	198 711	85 781	1,19	2,76
3,99 $X_{\max}$	3000	224 807	191 694	80 023	1,17	2,81
3,99 $X_{\max}$	5000	228 094	191 439	61 384	1,19	3,71

■ **Таблица 4.** Эффективность снижения трудоемкости моделирования системы «В» в рамках комбинированного метода В. Н. Пугачева

$h$	Базовая выборка	Стандартная схема	Метод 1	Метод 2	$W_1$	$W_2$
0,99 $X_{\max}$	1000	233 339	194 291	114 514	1,20	2,04
1,99 $X_{\max}$	1000	232 409	192 934	114 651	1,20	2,03
3,99 $X_{\max}$	1000	233 835	192 319	114 720	1,22	2,04
3,99 $X_{\max}$	1500	224 083	194 891	104 613	1,15	2,14
3,99 $X_{\max}$	2000	225 638	193 146	92 363	1,17	2,44
3,99 $X_{\max}$	2500	236 519	198 742	82 525	1,19	2,87
3,99 $X_{\max}$	3000	224 807	191 657	78 268	1,17	2,87
3,99 $X_{\max}$	5000	228 094	191 291	60 102	1,19	3,80

По результатам сравнения эффективности можно утверждать, что поиск приближенного решения  $Y(t, \mathbf{V})$  в виде карты высот позволяет избежать поиска наиболее удачной формы функции. По количеству параметров для оптимизации подход также выигрывает у полиномиальной модели. Для карты высот такими параметрами являются коэффициент  $h$  и размер базовой выборки. Необходимо отдельно отметить чувствительность подхода, предложенного в работе [3], к выбору начальной точки и метода поиска глобального минимума  $D_Z$  при подборе коэффициентов полинома.

При увеличении объема базовой выборки, на основе которой строится карта высот, возрастает степень корреляционной связи приближенного и точного решения, которая учитывается в комбинированном методе. Убедиться в этом можно,

сопоставив сокращение разницы в значениях  $W_2$  в табл. 3 и 4.

### Заключение

Представленные результаты позволяют сделать вывод о перспективности способа построения приближенного решения моделируемых систем в виде карты высот для методов сокращения трудоемкости статистического моделирования, что определяется следующими его преимуществами:

1) в рассмотренных примерах достигнуто существенное повышение эффективности представленных методов;

2) данный способ обеспечивает значительное сокращение трудоемкости процедуры оптимизации упрощенной модели, необходимой при реализации адаптивного подхода.

### Литература

1. Борисов Ю. П., Цветнов В. В. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств. — М.: Радио и связь, 1985. — 176 с.
2. Пугачев В. Н. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. — М.: Сов. радио, 1973. — 256 с.
3. Емельянов В. Ю., Лихолет Н. О. Адаптивный алгоритм статистического моделирования // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2008. № 4(58). С. 54 — 57.
4. Емельянов В. Ю. Методы моделирования стохастических систем управления/ БГТУ. — СПб., 2004. — 167 с.
5. Ермаков С. М., Михайлов Г. А. Статистическое моделирование. — М.: Наука, 1982. — 296 с.
6. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. — Л.: Машиностроение, 1986. — 320 с.

7. Астапов Ю. М., Медведев В. С. Статистическая теория систем автоматического регулирования и управления. — М.: Наука, 1982. — 304 с.
8. Юсов Е. А., Турлапов В. Е. Эффективное кодирование адаптивной триангуляции рельефа в контексте иерархического вейвлет-сжатия сетки высот // Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 5(1). С. 209–219.
9. Lobao A. S., Evangelista B. P., Grootjans R. Beginning XNA 3.0 Game Programming: From Novice to Professional. — Apress Berkely, CA, 2009. — 437 p.
10. Гусак А. А. Высшая математика: в 2 т. Т. 1. Учебник для студентов вузов. — Минск: ТетраСистемс, 2004. — 544 с.
11. Емельянов В. Ю., Лихолет Н. О., Шаров С. Н. Возможности сокращения трудоемкости статистического моделирования корреляционно-экстремальных систем // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 13–20.

UDC 681.52

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.43

## Searching for Approximate Solutions in Statistical Modeling Complexity Reduction

Emeljanov V. Yu.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Professor, v.emeljanov@bk.ruDokuchaeva A. N.<sup>a</sup>, Assistant Professor, a.n.dokuchaeva@gmail.com<sup>a</sup>Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, 1, Krasnoarmeiskaia 1st St., 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Analysis of the available methods of statistical modeling complexity reduction shows how important it is to efficiently build a simplified model of the system in question. The goal of the paper is developing an approach to find an approximate solution of the system which would allow us to expand the applicability of statistical modeling complexity reduction methods. **Results:** The importance of searching for new methods of building simplified systems has been grounded. An approach to simplified modeling has been developed. To find a simplified solution of the system, it is proposed to use a heightmap which reduces the modeling laboriousness. This approach is highly efficient, with no need of prior exhaustive knowledge about the statistic properties of the system. The method has been shown to be highly efficient for systems which are difficult to describe by polynomial models. **Practical relevance:** The obtained results can be used for optimizing the efficiency of statistical modeling complexity reduction when the statistical characteristics of the modelled systems are unknown.

**Keywords** — Statistical Modeling, Modeling Complexity Reduction, Building Simplified Models, Approximate Solution.

## References

1. Borisov U. P., Tsvetnov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie radiotekhnicheskikh sistem i ustroistv* [Mathematical Modeling of the Radio Technical Systems and Devices]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1985. 176 p. (In Russian).
2. Pugachev V. N. *Kombinirovannye metody opredeleniia veroiatnostnykh kharakteristik* [Combined Approaches of the Stochastic Parameters Detection]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 256 p. (In Russian).
3. Emeljanov V. Yu., Likholet N. O. Adaptive Statistical Modeling Algorithm // *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*, 2008, no. 4(58), pp. 54—57 (In Russian).
4. Emeljanov V. Yu. *Metody modelirovaniia stokhasticheskikh sistem upravleniia* [Modeling Methods for the Stochastic Management Systems]. Saint-Petersburg, BSTU Publ., 2004. 167 p. (In Russian).
5. Ermakov S. M., Mihailov G. A. *Statisticheskoe modelirovanie* [Statistical Modeling]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 296 p. (In Russian).
6. Shaligin A. S., Palagin U. I. *Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniia* [Applied Approaches of the Statistical Modeling]. Saint-Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1986. 320 p. (In Russian).
7. Astapov U. M., Medvedev V. S. *Statisticheskaiia teoriia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia i upravleniia* [Statistical Theory of the Automated Management Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 304 p. (In Russian).
8. Yisov E. A., Turlapov V. E. Encoding Adaptive Terrain Triangulation in the Context of Hierarchical Wavelet-Based Elevation Map Compression. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo*, 2010, no. 5(1), pp. 209–219 (In Russian).
9. Lobao A. S., Evangelista B. P., Grootjans R. *Beginning XNA 3.0 Game Programming: From Novice to Professional*. Apress Berkely, CA, 2009. 437 p.
10. Gusak A. A. *Vysshaia matematika* [Advanced Mathematics]. Minsk, TetraSystems Publ., 2004. Vol. 1. 544 p. (In Russian).
11. Emeljanov V. Yu., Likholet N. O., Sharov S. N. On Possibilities of Computation of Cost Saving for Statistic Simulation of Correlation-Extremal Positioning Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2009, no. 3(40), pp. 13–20 (In Russian).

УДК 681.3.067

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.50

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА НАРУШИТЕЛЕЙ

**Г. Н. Мальцев<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**А. Н. Панкратов<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, докторант

**Д. А. Лесняк<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, начальник лаборатории

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** прогнозирование состояния защищенности информационной системы от несанкционированного доступа нарушителей для определения периодичности управления средствами защиты информации. **Методы:** использованы представление процессов возникновения и предотвращения угроз информационной безопасности в виде потоков случайных событий с заданными статистическими характеристиками и формализованное описание динамики изменения состояния защищенности информационной системы во времени вероятностной моделью конфликтного взаимодействия с нарушителем. **Результаты:** доказана необходимость использовать в условиях априорной неопределенности экспоненциальное распределение времени преодоления защиты нарушителем. Разработана модель, позволяющая обосновать необходимый период управления средствами защиты информации, а также описать изменение состояния защищенности информационной системы при заданных функциях распределения вероятностей обеспечения и преодоления защиты без наложения ограничений на вид этих распределений. **Практическая значимость:** на основе анализа изменения вероятностных характеристик защищенности информационной системы во времени может быть реализовано гибкое управление средствами защиты от несанкционированного доступа с учетом прогнозируемого уровня защищенности.

**Ключевые слова** — информационная безопасность, несанкционированный доступ, конфликтное взаимодействие, управление средствами защиты информации.

### Введение

В современных информационно-управляющих системах при передаче и обработке критической информации могут быть использованы различные методы защиты информации, обеспечивающие достижение определенного уровня информационной безопасности (ИБ) [1, 2]. В то же время в условиях информационного противоборства объективным свойством защищенности информационных систем является ее постепенное снижение при неизменном составе средств защиты или при фиксированных их параметрах [3]. Так, при перехвате зашифрованных сообщений и постоянном ведении криптоанализа нарушитель накапливает информацию об используемом методе шифрования, что в отсутствие смены ключей шифрования приводит к снижению уровня защищенности передаваемых сообщений и увеличению вероятности несанкционированного доступа (НСД) к ним нарушителя [4, 5]. В связи с этим необходимо с определенной периодичностью контролировать состояние защищенности информационных систем, своевременно проводить соответствующее текущим условиям управление средствами защиты информации (настройку их параметров) и тем самым поддерживать требуемый уровень защищенности системы от действующих или потенциальных угроз. Это

относится как к техническим, так и к организационным мерам обеспечения ИБ, и в общем случае такое управление может рассматриваться как оптимизация состава средств защиты [6] или пересмотр мероприятий по защите информации [7].

Процессы реализации и предотвращения угроз ИБ могут быть описаны методами теории конфликта [8, 9]. Вероятностные модели составляют один из видов моделей конфликтного взаимодействия, применимый к широкому классу организационно-технических систем. Их достоинством является описание изменения состояния защищенности анализируемой системы при заданных функциях распределения вероятностей реализации и предотвращения угроз без наложения ограничений на вид этих распределений. В настоящей статье представлено описание вероятностной модели изменения защищенности информационной системы в условиях конфликтного взаимодействия с нарушителем. Модель позволяет определить периодичность контроля защищенности системы и управления используемыми средствами защиты информации, обеспечивающую требуемый уровень защищенности от действующих угроз, например от НСД нарушителя к передаваемой или обрабатываемой критической информации.

**Определение вероятности обеспечения защиты информации за заданное время в условиях конфликтного взаимодействия с нарушителем**

Требуемый уровень защищенности информационных систем, функционирующих в условиях информационного противоборства и угроз ИБ, обеспечивается использованием и поддержанием в работоспособном состоянии комплексов средств защиты информации (КСЗИ). В общем случае состав КСЗИ определяют, исходя из требований к ИБ системы, ожидаемых угроз и целей нарушителя. При этом высокая степень неопределенности процесса информационного противоборства, носящего характер конфликтного взаимодействия, приводит к необходимости принимать упреждающие меры по обеспечению требуемого уровня защищенности и сведению к минимуму возможного ущерба от действий нарушителя. Механизм поддержания требуемого состояния защищенности информационной системы должен функционировать так, чтобы через определенный интервал времени, выбираемый исходя из допустимого снижения вероятности нормального функционирования системы, проводилась проверка защищенности и при необходимости управление КСЗИ (настройка параметров входящих в его состав средств).

В постановке задачи моделирования изменения состояния защищенности информационной системы в условиях конфликтного взаимодействия с нарушителем [10, 11] функционирование КСЗИ информационной системы рассматривается как деятельность стороны защиты по обеспечению защиты, а попытки реализации угроз ИБ — как деятельность стороны нападения по преодолению защиты. При этом обе стороны осуществляют одновременно те или иные мероприятия с учетом текущей обстановки и поведения противоположной стороны. На основе формализованного описания изменения во времени защищенности информационной системы от угроз нарушителя рассмотрим вероятностные характеристики защищенности, позволяющие прогнозировать значения вероятностей обеспечения защиты в течение заданного интервала времени с целью определить периодичность контроля защищенности и управления (настройки параметров) КСЗИ. При предотвращении угроз НСД к системам передачи информации такое управление средствами защиты заключается в смене ключей шифрования [4, 5].

Общая постановка задачи определения необходимого момента управления КСЗИ при вероятностном описании его конфликтного взаимодействия с нарушителем состоит в следующем [10]. Заданы функции распределения  $F_{з k}(t_k)$ ,  $k = 1, \dots, K$ , случайных моментов времени  $t_k$  реализации

$K$  вариантов защиты и функции распределения  $F_{и n}(\tau_n)$ ,  $n = 1, \dots, N$ , случайных моментов времени  $\tau_n$  реализации  $N$  вариантов нападения. Для определения момента времени управления КСЗИ в интересах обеспечения требуемого уровня ИБ необходимо оценивать условия достижения при конфликтном взаимодействии выигрыша защиты. При информационном конфликте  $k$ -го и  $n$ -го вариантов действий противоборствующих сторон выигрыш защиты  $L_{з kn}(T)$  на интервале времени длительностью  $T$  заключается в реализации своего варианта действий раньше, чем будет реализован соответствующий вариант нападения.

Общее выражение для выигрыша защиты на интервале времени  $T$  для  $k$ -го и  $n$ -го вариантов действий противоборствующих сторон имеет следующий вид:

$$L_{з kn}(T) = \int_0^T F_{з k}(\tau_n) dF_{и n}(\tau_n). \quad (1)$$

Усреднение выигрыша защиты (1) по всем возможным альтернативам  $k$  и  $n$  представляет собой показатель эффективности заложенных в КСЗИ вариантов защиты на интервале времени  $T$ :

$$L_{з}(T) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \int_0^T F_{з k}(\tau_n) dF_{и n}(\tau_n) Q_n P_{k|n}, \quad (2)$$

где  $Q_n$  — вероятности предотвращения КСЗИ угроз стороны нападения, соответствующие каждому из  $N$  вариантов нападения;  $P_{k|n}$  — условные вероятности выбора  $k$ -го варианта защиты при условии реализации нарушителем  $n$ -го варианта нападения.

Выражение (2) учитывает взаимосвязь между вариантами действий защиты и нападения, обусловленную наличием у стороны защиты той или иной информации о стороне нападения, которую сторона защиты использует при принятии решений. На практике эта информация появляется у стороны защиты в результате анализа угроз и уязвимостей информационной системы в изменяющихся условиях ее функционирования и является функцией от длительности анализируемого интервала времени  $T$ . Отсюда следует постановка вариационных задач максимизации выигрыша защиты  $L_{з}(T)$  и определения наибольшего интервала времени  $T$ , на котором выигрыш защиты  $L_{з}(T)$  не менее заданного допустимого значения  $L_{з, доп}$ .

Если полагать, что начальный момент анализируемого интервала времени соответствует моменту времени  $t_{упр i}$ , в который произошло очередное  $i$ -е управление КСЗИ, то интервал времени до следующего  $(i + 1)$ -го управления КСЗИ  $T_i = t_{упр i+1} - t_{упр i}$  должен удовлетворять условию  $L_{з}(T) \geq L_{з, доп}$  для всех  $T \in T_i$ . Практически вместо обобщенного показателя выигрыша

защиты  $L_3(T)$ , определяемого выражением (2) и являющегося функционалом от функций распределения  $F_{3k}(t_k)F_{nn}(\tau_n)$ , могут быть максимизированы монотонно связанные с ним показатели. В качестве такого показателя, отражающего суть конфликтного взаимодействия сторон защиты и нападения, примем вероятность  $P_{\text{защ}}(T)$  пребывания стороны защиты в состоянии выигрыша в течение интервала времени  $T$ . От этой вероятности в дальнейшем может быть осуществлен переход к зависимости вероятности обеспечения защиты от времени  $P_3(t)$ , где моменту времени  $t_{\text{упр}i}$  соответствует  $t = 0$ , а интервал времени  $T_i = t_{\text{упр}i+1} - t_{\text{упр}i}$  соответствует условию  $P_3(t) \geq P_{3,\text{доп}}$  превышения вероятности обеспечения защиты допустимого уровня  $P_{3,\text{доп}}$  для всех  $t \leq T_i$ . Исходя из этого условия по зависимостям  $P_3(t)$  непосредственно осуществляется определение периода управления средствами защиты информации. При этом чем выше вероятность обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$  при фиксированной величине  $T$ , тем медленнее убывают соответствующие им зависимости  $P_3(t)$  и тем реже необходимо управлять КСЗИ для поддержания требуемого уровня защищенности информационной системы.

При вероятностном подходе к описанию процесса конфликтного взаимодействия процессы возникновения и предотвращения угроз ИБ представляются в виде потоков случайных событий с заданными статистическими характеристиками. Условия конфликтного взаимодействия при попытке реализации нарушителем определенной угрозы ИБ характеризуются плотностями распределения вероятностей обеспечения и преодоления защиты  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$  соответственно. Данные плотности распределения отражают возможности используемого КСЗИ обеспечивать защиту информации при попытке нарушителем реализовать соответствующую угрозу ИБ, а нарушителя — исполнить данную угрозу на рассматриваемом интервале времени  $T$ . Вероятность обеспечения защиты в течение интервала времени  $T$  определяется выражением

$$P_{\text{защ}}(T) = \int_0^T w_{\text{защ}}(\tau) \left[ 1 - \int_0^\tau w_{\text{нап}}(t) dt \right] d\tau. \quad (3)$$

На практике имеют место конечное время изменения условий функционирования информационной системы, связанных с попытками нарушителя реализовать угрозы ИБ, и конечная оперативность управления КСЗИ для их предотвращения. Величина вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$ , определяемая выражением (3), зависит от временных масштабов изменения процессов преодоления и обеспечения защиты, описываемых плотностями распределения вероятностей  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$ . Задачей защиты является уве-

личение величины  $P_{\text{защ}}(T)$  при поведении нарушителя, характеризуемом плотностью распределения вероятностей преодоления защиты  $w_{\text{нап}}(t)$ , за счет выбора соответствующего своего поведения, характеризуемого плотностью распределения вероятностей обеспечения защиты  $w_{\text{защ}}(t)$ , что эквивалентно критерию управления КСЗИ

$$E_{\text{защ}}(O) = \int_0^T w_{\text{защ}}(\tau) \left[ 1 - \int_0^\tau w_{\text{нап}}(t) dt \right] d\tau \rightarrow \max_{w_{\text{защ}}(\tau)}.$$

Максимальное значение вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T) = 1$  достигается в двух случаях:

1) если на анализируемом интервале времени  $T$  полностью отсутствуют воздействия нападения — при  $w_{\text{нап}}(t) = 0$ ;

2) если на анализируемом интервале времени  $T$  защита обеспечивает полностью бесконфликтное функционирование с нападением — при

$$\int_0^T w_{\text{защ}}(\tau) \int_0^\tau w_{\text{нап}}(t) dt d\tau = 0.$$

Первый из указанных случаев соответствует бесконечно медленному изменению условий функционирования информационной системы, когда ее КСЗИ обеспечивает предотвращение всех возможных угроз ИБ со стороны нарушителя. В этом случае управление (настройка) КСЗИ не требуется. Второй из указанных случаев соответствует бесконечно быстрой упреждающей реакции КСЗИ на изменение условий функционирования информационной системы. В этом случае управление (настройка) КСЗИ происходит мгновенно и обеспечивает предотвращение всех возможных угроз ИБ.

Определение зависимостей  $P_3(t)$  по зависимостям  $P_{\text{защ}}(T)$  осуществляется следующим образом. Если положить в выражении вида (3)  $w_{\text{защ}}(\tau) = \delta(\tau - T_{\text{защ}})$  и  $T > T_{\text{защ}}$ , то зависимости  $P_3(t)$  будет соответствовать зависимость  $P_{\text{защ}}(T_{\text{защ}})$  с заменой переменной  $T_{\text{защ}}$  на переменную  $t$ . Полученные зависимости  $P_3(t)$  имеют единичное значение при  $t = 0$  и стремятся к нулю при  $t \rightarrow \infty$ , что отражает снижение с течением времени уровня защищенности информационной системы после управления КСЗИ в момент времени  $t = 0$ . Тогда интервал времени безопасного функционирования информационной системы  $T_0$  является решением относительно  $t$  уравнения  $P_3(t) = P_{3,\text{доп}}$  (полагаем  $t_{\text{упр}i} = 0$ ). Найденные таким образом значения  $T_0$  соответствуют требуемой периодичности управления КСЗИ, необходимой для своевременной его настройки — внесения изменений, соответствующих текущим условиям функционирования.

Достоинством вероятностного описания процесса конфликтного взаимодействия является отсутствие ограничений на вид используемых распределений вероятностей обеспечения и пре-

одоления защиты. Это позволяет задавать и проводить расчеты для различных стандартных и экспериментальных законов распределения. В то же время особенности и свойства вероятностных характеристик изменения защищенности информационных систем во времени могут быть рассмотрены по результатам анализа влияния на вероятности  $P_{\text{защ}}(T)$  и  $P_3(t)$  параметров плотностей распределения  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$  для типовых законов распределения вероятностей преодоления и обеспечения защиты.

**Результаты исследования изменения во времени вероятностных характеристик защищенности информационной системы**

С использованием общего выражения (3) было исследовано влияние вида и параметров законов распределения вероятностей обеспечения защиты (для стороны защиты) и преодоления защиты (для стороны нападения) на динамику изменения защищенности информационной системы во времени. В качестве типовых рассматривались законы распределения вероятностей преодоления и обеспечения защиты трех видов:

1) усеченное гауссово распределение с функциями плотности распределения вероятностей

$$w_{\text{сac}}(t) = \frac{1}{A_{\text{сac}} \sqrt{2\pi\sigma_{\text{сac}}}} \exp\left[-\frac{(t - T_{\text{сac}})^2}{2\sigma_{\text{сac}}^2}\right] \text{ и}$$

$$w_{\text{fai}}(t) = \frac{1}{A_{\text{fai}} \sqrt{2\pi\sigma_{\text{fai}}}} \exp\left[-\frac{(t - T_{\text{fai}})^2}{2\sigma_{\text{fai}}^2}\right],$$

определяемыми для области значений  $t \geq 0$ , с параметрами:  $T_{\text{защ}}$  и  $T_{\text{нап}}$  — средние значения времени обеспечения и преодоления защиты,  $\sigma_{\text{защ}}$  и  $\sigma_{\text{нап}}$  — среднеквадратические значения времени обеспечения и преодоления защиты,  $A_{\text{защ}}$  и  $A_{\text{нап}}$  — нормировочные коэффициенты, обеспечивающие при переходе от стандартного к усеченному гауссову распределению выполнение условий нормировки  $\int_0^\infty w_{\text{сac}}(t) dt = 1$  и  $\int_0^\infty w_{\text{fai}}(t) dt = 1$ ;

2) экспоненциальное распределение с функциями плотности распределения вероятностей

$$w_{\text{сac}}(t) = \frac{1}{T_{\text{сac}}} \exp\left[-\frac{t}{T_{\text{сac}}}\right] \text{ и}$$

$$w_{\text{fai}}(t) = \frac{1}{T_{\text{fai}}} \exp\left[-\frac{t}{T_{\text{fai}}}\right],$$

определенными в области значений  $t \geq 0$ , с параметрами:  $T_{\text{защ}}$  и  $T_{\text{нап}}$  — средние значения времени обеспечения и преодоления защиты;

3) распределение с функциями плотности распределения вероятностей вида  $\delta$ -функции

$$w_{\text{сac}}(t) = \delta(t - T_{\text{сac}}) \text{ и } w_{\text{fai}}(t) = \delta(t - T_{\text{fai}}),$$

задаваемыми в области значений  $t \geq 0$ , соответствующее детерминированным моментам времени  $T_{\text{защ}}$  и  $T_{\text{нап}}$  обеспечения и преодоления защиты.

Гауссово распределение, являющееся двухпараметрическим, позволяет при описании конфликтного противодействия оценить влияние на результирующую величину вероятности обеспечения защиты средних и среднеквадратических значений времени обеспечения и преодоления защиты. Необходимость использовать усеченное гауссово распределение обусловлена тем, что плотности распределения вероятностей  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$  должны задаваться в области положительных значений времени  $0 \leq t < \infty$ , в то время как стандартное гауссово распределение задается в области  $-\infty < t < \infty$ . Нормировочные коэффициенты  $A_{\text{защ}}$  и  $A_{\text{нап}}$  для усеченного гауссова распределения, определяемого в области  $0 \leq t < \infty$ , в соответствии с правилами теории вероятностей [12] рассчитываются по формулам

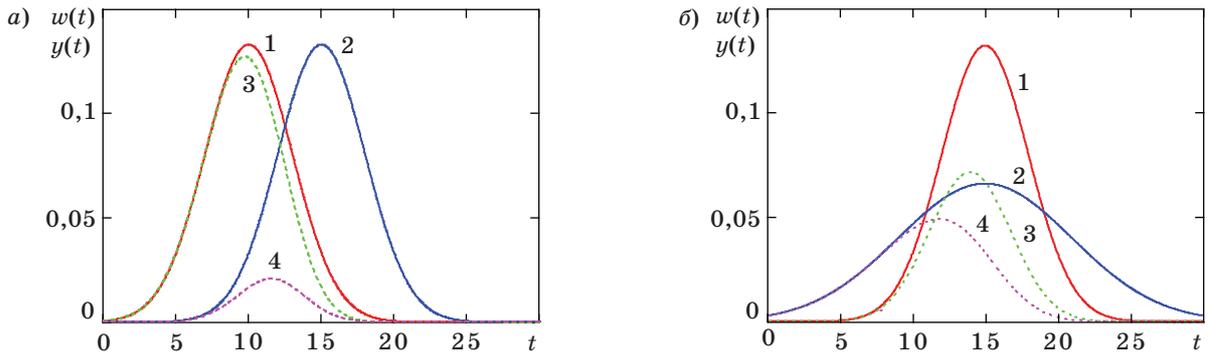
$$A_{\text{сac}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{сac}}}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(t - T_{\text{сac}})^2}{2\sigma_{\text{сac}}^2}\right] dt;$$

$$A_{\text{fai}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{fai}}}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(t - T_{\text{fai}})^2}{2\sigma_{\text{fai}}^2}\right] dt.$$

На рис. 1 приведены графики гауссовых плотностей распределения вероятностей  $w(t)$  с различным сочетанием параметров  $T$  и  $\sigma$ , в качестве которых могут выступать  $T_{\text{защ}}$  или  $T_{\text{нап}}$  и  $\sigma_{\text{защ}}$  или  $\sigma_{\text{нап}}$  соответственно, а также функций вида

$$y(t) = w_{\text{сac}}(t) \left[ 1 - \int_0^t w_{\text{fai}}(\tau) d\tau \right], \text{ представляющих}$$

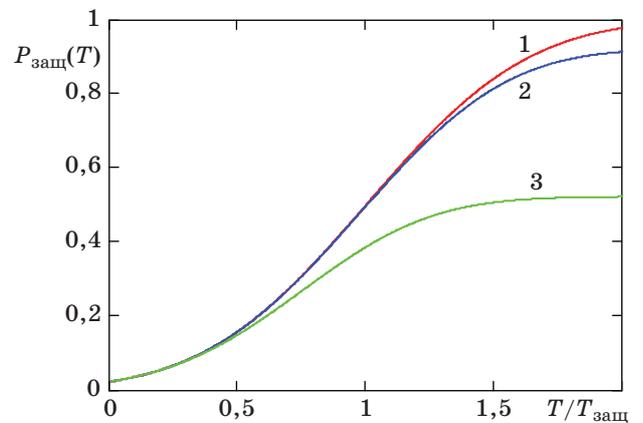
собой подынтегральное выражение внешнего интеграла в выражении (3) для вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$ . На рис. 1, а: кривая 1 — гауссова плотность вероятности  $w_1(t)$  с параметрами  $T = 10, \sigma = 3$ ; кривая 2 — гауссова плотность вероятности  $w_2(t)$  с параметрами  $T = 15, \sigma = 3$ ; кривая 3 — функция  $y(t)$ , определяемая в предположении, что  $w_1(t) = w_{\text{защ}}(t), w_2(t) = w_{\text{нап}}(t)$ ; кривая 4 — функция  $y(t)$ , определяемая в предположении, что  $w_1(t) = w_{\text{нап}}(t), w_2(t) = w_{\text{защ}}(t)$ . На рис. 1, б: кривая 1 — гауссова плотность вероятности  $w_1(t)$  с параметрами  $T = 15, \sigma = 3$ ; кривая 2 — гауссова плотность вероятности  $w_2(t)$  с параметрами  $T = 15, \sigma = 6$ ; кривая 3 — функция  $y(t)$ , определяемая в предположении, что  $w_1(t) = w_{\text{защ}}(t), w_2(t) = w_{\text{нап}}(t)$ ; кривая 4 — функция  $y(t)$ , определяемая в предположении, что  $w_1(t) = w_{\text{нап}}(t), w_2(t) = w_{\text{защ}}(t)$ .



■ **Рис. 1.** Гауссова плотность распределения вероятности обеспечения защиты  $w(t)$  и функции  $y(t)$  при различных соотношениях между параметрами  $T$  и  $\sigma$ : *a* — значения  $T$  различные; *б* — значение  $T$  фиксированно

С учетом введенного обозначения  $y(t)$  вероятность обеспечения защиты за заданное время  $T$  определяется выражением  $P_{\text{защ}}(T) = \int_0^T y(t) dt$ , а при  $T \rightarrow \infty$  ей соответствует площадь под кривыми 3 и 4. Из графиков видно, что определяющими параметрами, от соотношения между которыми зависят результирующие значения вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$ , являются средние значения времени обеспечения и преодоления защиты  $T_{\text{защ}}$  и  $T_{\text{нап}}$ . Именно от их сочетания зависит способность защиты противостоять угрозам нападения, и управление КСЗИ должно быть направлено, прежде всего, на уменьшение отношения  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$ , что соответствует упреждающей стратегии защиты. От соотношения между среднеквадратическими значениями времени обеспечения и преодоления защиты  $\sigma_{\text{защ}}$  и  $\sigma_{\text{нап}}$  результирующие значения вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$  зависят слабо. Так, при  $T \rightarrow \infty$  функциям  $y(t)$ , представленным кривыми 3 и 4 на рис. 1, *a*, соответствуют значения  $P_{\text{защ}}(T)$ , равные 0,88 и 0,12, а обеим функциям  $y(t)$ , представленным кривыми 3 и 4 на рис. 1, *б* — значения  $P_{\text{защ}}(T)$  около 0,5. Доминирующим останется влияние на величину  $P_{\text{защ}}(T)$  отношения  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$  и при различных средних  $T_{\text{защ}}$  и  $T_{\text{нап}}$  и среднеквадратических  $\sigma_{\text{защ}}$  и  $\sigma_{\text{нап}}$  значениях времени обеспечения и преодоления защиты. При этом уменьшение  $\sigma_{\text{защ}}$  приводит к более медленному нарастанию  $P_{\text{защ}}(T)$  в области значений  $T < T_{\text{защ}}$ , а увеличение  $\sigma_{\text{защ}}$  приводит к уменьшению величины  $P_{\text{защ}}(T)$  при  $T \rightarrow \infty$ .

Зависимости вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T/T_{\text{защ}})$  (рис. 2) рассчитаны в соответствии с выражением (3) для гауссовых плотностей распределения вероятностей  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$  при различных отношениях средних значений  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$  и среднеквадратических значениях  $\sigma_{\text{защ}} = \sigma_{\text{нап}} = 0,5T_{\text{защ}}$ . Из графиков видно, что



■ **Рис. 2.** Зависимости вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$  для гауссовых плотностей распределения вероятностей  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$  при соотношениях  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$ , равных 0,1 (кривая 1), 0,5 (кривая 2) и 1 (кривая 3)

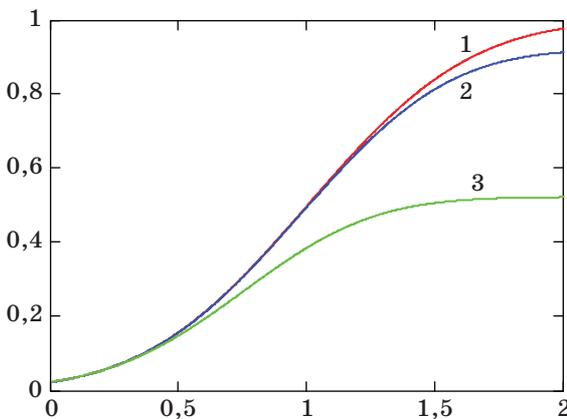
возможности достижения значений  $P_{\text{защ}}(T) \approx 1$  существенным образом зависят от отношения  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$  вследствие насыщения зависимостей  $P_{\text{защ}}(T)$  на некотором уровне, который тем ниже, чем меньше отношение  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$ .

Экспоненциальное распределение и распределение вида  $\delta$ -функции являются однопараметрическими и характеризуются одним параметром, определяющим среднее значение времени обеспечения  $T_{\text{защ}}$  или преодоления  $T_{\text{нап}}$  защиты для экспоненциального распределения и детерминированные моменты времени обеспечения  $T_{\text{защ}}$  и преодоления  $T_{\text{нап}}$  защиты для распределения вида  $\delta$ -функции. При задании в выражении (3) плотностей распределения вероятностей  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$ , соответствующих экспоненциальному распределению и распределению вида  $\delta$ -функции, могут быть получены простые аналитические выражения для вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$  в зависимости от относительных параметров  $T/T_{\text{защ}}$  и  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$ .

Экспоненциальное распределение соответствует простейшему потоку событий и описанию переходов между состояниями защищенности информационной системы марковскими случайными процессами [12]. Вычисление вероятности обеспечения защиты за заданное время  $T$  в соответствии с выражением (3) для экспоненциальных функций плотности распределения вероятностей  $w_{защ}(t)$  и  $w_{нап}(t)$  с параметрами  $T_{защ}$  и  $T_{нап}$  дает

$$P_{защ}(T) = \frac{1}{1 + T_{защ} / T_{нап}} \times \left[ 1 - \exp \left[ - \frac{T(1 + T_{защ} / T_{нап})}{T_{защ}} \right] \right]. \quad (4)$$

Зависимости вероятности обеспечения защиты  $P_{защ}(T/T_{защ})$  (рис. 3) рассчитаны по формуле (4) при различных отношениях  $T_{защ}/T_{нап}$ . Из графиков видно, что при описании конфликтного взаимодействия экспоненциальными распределениями моментов обеспечения и преодоления защиты требования к скорости реакции КСЗИ на изменение условий функционирования оказываются более жесткими, чем при использовании гауссовых распределений, особенно в области значений  $P_{защ}(T) > 0,5$ . Так, при использовании экспоненциальных распределений вероятность обеспечения защиты  $P_{защ}(T) = 0,5$  в случае  $T_{защ}/T_{нап} = 0,1$  достигается при  $T \approx 0,8T_{защ}$ , в случае  $T_{защ}/T_{нап} = 0,5$  — при  $T \approx T_{защ}$ , в случае  $T_{защ}/T_{нап} = 1$  — при  $T \approx 2T_{защ}$ , при этом даже в случае  $T_{защ}/T_{нап} = 0,1$  при  $T = 2T_{защ}$  достигается только  $P_{защ}(T) = 0,8$ . Для сравнения: при использовании гауссовых распределений вероятность



■ Рис. 3. Зависимости вероятности обеспечения защиты  $P_{защ}(T)$  для экспоненциальных плотностей распределения вероятностей  $w_{защ}(t)$  и  $w_{нап}(t)$  при соотношениях  $T_{защ}/T_{нап}$ , равных 0,1 (кривая 1), 0,5 (кривая 2) и 1 (кривая 3)

обеспечения защиты  $P_{защ}(T) = 0,5$  в случаях  $T_{защ}/T_{нап} = 0,1$  и  $T_{защ}/T_{нап} = 0,5$  достигается при  $T \approx T_{защ}$ , в случае  $T_{защ}/T_{нап} = 1$  — при  $T \approx 1,2T_{защ}$ , а в случае  $T_{защ}/T_{нап} = 0,1$  при  $T = 2T_{защ}$  достигается  $P_{защ}(T) \approx 1$ . Поэтому экспоненциальное распределение вероятностей обеспечения и преодоления защиты может рассматриваться как предельный вариант случайного изменения условий функционирования информационных систем.

Использование распределения с функциями плотности распределения вероятности вида  $\delta$ -функции соответствует детерминированным моментам обеспечения (для стороны защиты) и преодоления (для стороны нападения) защиты и позволяет описать скачкообразное изменение вероятности обеспечения защиты между двумя состояниями — защищенным и незащищенным. Вычисление вероятности обеспечения защиты за заданное время  $T$  в соответствии с выражением (3) для функций плотности распределения вероятностей  $w_{защ}(t)$  и  $w_{нап}(t)$  вида  $\delta$ -функции с параметрами  $T_{защ}$  и  $T_{нап}$  дает

$$P_{защ}(0) = \begin{cases} 1, & 0 \leq T_{защ} / T_{нап} < 1 \\ 0, & T_{защ} / T_{нап} \geq 1 \end{cases}. \quad (5)$$

Выражение (5) отражает тот факт, что при принятых допущениях о характере изменения условий конфликтного взаимодействия при  $T_{защ} < T_{нап}$  упреждающая защита всегда позволяет обеспечить полностью защищенное состояние информационной системы, а при  $T_{защ} \geq T_{нап}$  опережающее нападение всегда достигает своих целей вследствие незащищенного состояния системы.

Возможно использование комбинации различных законов распределения для описания процессов преодоления защиты (для стороны защиты) и обеспечения защиты (для стороны нападения), например, экспоненциального распределения и распределения вида  $\delta$ -функции. При этом экспоненциальное распределение с параметром  $T_{нап}$  может описывать случайные моменты преодоления защиты нарушителем, а распределение вида  $\delta$ -функции с параметром  $T_{защ}$  — детерминированные моменты обеспечения защиты, что характерно для периодического управления параметрами КСЗИ. Вычисление вероятности обеспечения защиты за заданное время  $T$  в соответствии с выражением (3) для соответствующих функций плотности распределения вероятностей дает

$$P_{защ}(0) = \begin{cases} \exp(-T_{защ} / T_{нап}), & T / T_{защ} > 1 \\ 0, & 0 \leq T / T_{защ} \leq 1 \end{cases}. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что детерминированный характер моментов обеспечения защиты

при случайном характере попыток преодоления ее нарушителем приводит к незащищенному состоянию системы в моменты времени  $T < T_{\text{защ}}$ . Нулевые значения вероятности  $P_{\text{защ}}(T)$  при  $T < T_{\text{защ}}$  соответствуют наличию неустраненной уязвимости на интервале времени, когда имеется отличная от нуля вероятность преодоления защиты нарушителем. Эта уязвимость устраняется в момент времени  $T_{\text{защ}}$ , и при  $T > T_{\text{защ}}$  устанавливается стационарное значение вероятности обеспечения защиты, которое тем выше, чем меньше отношение  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}}$ : при  $T > T_{\text{защ}}$  в случае  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}} = 0,1$  достигается  $P_{\text{защ}}(T) \approx 0,9$ , в случае  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}} = 0,5$  достигается  $P_{\text{защ}}(T) \approx 0,6$ , в случае  $T_{\text{защ}}/T_{\text{нап}} = 1$  достигается  $P_{\text{защ}}(T) \approx 0,37$ . Ситуация, когда  $w_{\text{защ}}(t) = \delta(t - T_{\text{защ}})$ , имеет также важное значение с той точки зрения, что позволяет осуществить переход от вероятности обеспечения защиты  $P_{\text{защ}}(T)$ , определяемой для условий конфликтного взаимодействия сторон защиты и нападения, к зависимости вероятности обеспечения защиты от времени  $P_3(t)$ , к которой при проектировании и эксплуатации информационных систем задаются требования вида  $P_3(t) \geq P_{\text{з,доп}}$  [3].

Практический интерес представляет определение по зависимости вероятности обеспечения защиты от времени  $P_3(t)$  необходимого момента управления (настройки) КСЗИ с учетом ожидаемой динамики угроз (воздействий) нарушителя. Для определения зависимостей  $P_3(t)$  по найденным зависимостям  $P_{\text{защ}}(T)$  положим  $w_{\text{защ}}(t) = \delta(t - T_{\text{защ}})$ . Тогда зависимости  $P_3(t)$  будут соответствовать зависимости  $P_{\text{защ}}(T_{\text{защ}})$  с заменой переменной  $T_{\text{защ}}$  на переменную  $t$ . После преобразований получаем:

$$P_{\zeta}(T) = 1 - \frac{1}{A_{\text{I} \text{äi}}} \left[ \hat{O} \left( \frac{t - T_{\text{I} \text{äi}}}{\sigma_{\text{I} \text{äi}}} \right) - \hat{O} \left( -\frac{T_{\text{I} \text{äi}}}{\sigma_{\text{I} \text{äi}}} \right) \right] \quad (7)$$

для усеченного гауссова распределения времени преодоления защиты, где  $\hat{O}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$  — гауссов интеграл ошибок;

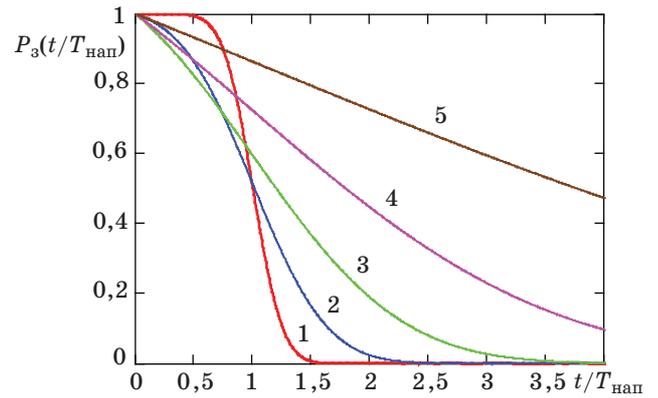
$$P_{\zeta}(T) = \exp(-t / T_{\text{I} \text{äi}}) \quad (8)$$

для экспоненциального распределения времени преодоления защиты;

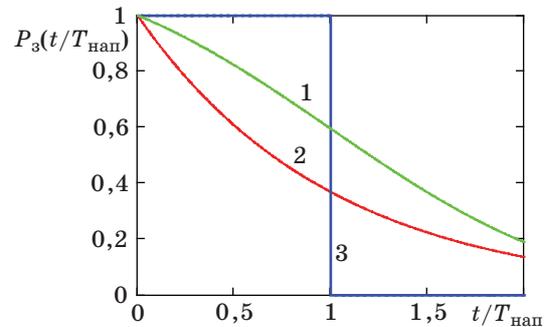
$$P_{\zeta}(t) = \begin{cases} 1, & t / T_{\text{I} \text{äi}} < 1 \\ 0, & t / T_{\text{I} \text{äi}} \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

для распределения времени преодоления защиты с плотностью распределения вероятностей вида  $\delta$ -функции.

Все полученные зависимости  $P_3(t)$  имеют единичное значение при  $t = 0$  и стремятся к нулю



■ Рис. 4. Зависимости вероятности обеспечения защиты  $P_3(t/T_{\text{нап}})$  для гауссовой плотности распределения вероятностей  $w_{\text{нап}}(t)$  при соотношениях  $\delta_{\text{нап}}/T_{\text{нап}}$ , равных 0,2 (кривая 1), 0,5 (кривая 2), 1 (кривая 3), 2 (кривая 4) и 5 (кривая 5)



■ Рис. 5. Зависимость вероятности обеспечения защиты  $P_3(t/T_{\text{нап}})$  при различных законах распределения времени преодоления защиты: 1 — усеченная гауссова плотность распределения; 2 — экспоненциальная плотность распределения; 3 — плотность распределения вида  $\delta$ -функции

при  $t \rightarrow \infty$ , что отражает снижение уровня защищенности системы после настройки ее КСЗИ в момент времени  $t = 0$ . Зависимости  $P_3(t/T_{\text{нап}})$  при различных плотностях распределения  $w_{\text{нап}}(t)$  представлены на рис. 4 и 5. На рис. 4 показаны зависимости  $P_3(t/T_{\text{нап}})$ , соответствующие усеченной гауссовой плотности распределения вероятностей  $w_{\text{нап}}(t)$ .

На рис. 5 приведены зависимости  $P_3(t/T_{\text{нап}})$ , соответствующие различным видам плотности распределения  $w_{\text{нап}}(t)$  при фиксированном среднем значении времени преодоления защиты. Кривая 1 соответствует усеченной гауссовой плотности распределения вероятностей при  $\sigma_{\text{нап}}/T_{\text{нап}} = 1$ , кривая 2 — экспоненциальной плотности распределения вероятностей, кривая 3 — плотности распределения вероятностей вида  $\delta$ -функции. Из графиков видно, что наихудшим с точки зрения характера изменения во времени  $t$  вероятности

обеспечения защиты  $P_3(t)$  является экспоненциальное распределение времени преодоления защиты нарушителем. При гауссовом распределении времени преодоления защиты нарушителем и том же среднем времени преодоления защиты  $T_{\text{нап}}$  вероятность обеспечения защиты  $P_3(t)$  уменьшается с течением времени  $t$  медленнее, особенно при больших  $\sigma_{\text{нап}}/T_{\text{нап}}$ . Так, при  $t = 0,2T_{\text{нап}}$  в случае экспоненциального распределения  $P_3(t) = 0,82$ , а в случае гауссова распределения ( $\sigma_{\text{нап}}/T_{\text{нап}} = 1$ )  $P_3(t) = 0,94$ , при  $t = 0,5T_{\text{нап}}$   $P_3(t) = 0,61$  и  $0,82$  соответственно.

Интервал времени безопасного функционирования информационной системы  $T_0$  при заданной величине  $P_{3,\text{доп}}$  соответствует  $P_3(T_0) = P_{3,\text{доп}}$ . Найденные таким образом значения интервалов времени  $T_0$  определяют требуемую в текущих условиях функционирования информационной системы периодичность контроля состояния ее ИБ или управления (настройки) КСЗИ. Необходимыми исходными данными для определения величины  $T_0$  являются плотности распределения вероятностей обеспечения и преодоления защиты  $w_{\text{защ}}(t)$  и  $w_{\text{нап}}(t)$  в текущих условиях функционирования информационной системы. При этом, как следует из зависимостей, приведенных на рис. 5, вид закона распределения существенным образом влияет на зависимость  $P_3(t)$  и величину  $T_0$ , обеспечивающую выполнение условия  $P_3(t) \geq P_{3,\text{доп}}$ . При управлении параметрами КСЗИ с фиксированным периодом  $w_{\text{защ}}(t) = \delta(t - T_{\text{защ}})$ , и условие  $P_3(t) \geq P_{3,\text{доп}}$  выполняется при периоде управления (настройки) КСЗИ  $T_{\text{защ}} = T_0$ .

Наиболее жесткие требования к величине  $T_{\text{защ}}$  будут иметь место в случае экспоненциального распределения времени преодоления защиты нарушителем. Исходя из выражения (8), период управления КСЗИ, обеспечивающий выполнение требования  $P_3(t) \geq P_{3,\text{доп}}$  при заданной величине  $T_{\text{нап}}$ , составляет

$$T_{\text{защ}} = -T_{\text{нап}} \ln P_{3,\text{доп}} \approx T_{\text{нап}} (1 - P_{3,\text{доп}}), \quad (10)$$

где приближенное равенство соответствует линейной аппроксимации логарифмической функции при типовых требованиях к вероятности обеспечения защиты, характеризующихся значениями  $P_{3,\text{доп}}$ , близкими к единице, и  $(1 - P_{3,\text{доп}}) \ll 1$ . В силу того, что экспоненциальное распределение времени преодоления защиты нарушителем является наименее благоприятным с точки зрения изменения вероятности обеспечения защиты во времени, требования к периодичности управления КСЗИ, определяемые выражением (10), могут рассматриваться как гарантированные.

### Заключение

Рассмотренное вероятностное описание изменения защищенности информационной системы во времени может быть использовано в тех случаях, когда условия конфликтного взаимодействия при попытках реализации нарушителем угроз ИБ и их предотвращении с помощью КСЗИ характеризуются плотностями распределения вероятностей обеспечения и преодоления защиты. Такое описание получает широкое распространение при анализе защищенности от угроз НСД систем и сетей передачи информации и вычислительных сетей [10, 11] и является основой реализации упреждающей стратегии управления средствами защиты от НСД с учетом прогнозируемого уровня защищенности. В статье показано, как на основе анализа изменения вероятностных характеристик защищенности информационной системы во времени может быть обоснован период управления (настройки параметров) КСЗИ при поддержании требуемого уровня защищенности, например, смена ключей шифрования для предотвращения НСД к передаваемой информации.

Представленные результаты могут найти применение при обосновании организационных и технических решений по защите критической информации в информационно-управляющих системах различного назначения на этапе их проектирования и в процессе эксплуатации.

### Литература

1. Романец Ю. В., Тимофеев П. А., Шаньгин В. Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. — М.: Радио и связь, 2001. — 376 с.
2. Петренко С. А., Симонов С. В. Управление информационными рисками: Экономически оправданная безопасность. — М.: Ай-Ти-Пресс, 2004. — 381 с.
3. Малюк А. А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. — М.: Горячая линия-Телеком, 2004. — 280 с.

4. Ростовцев А. Г., Маховенко Е. Б. Теоретическая криптография. — СПб.: Профессионал, 2003. — 479 с.
5. Панасенко С. П. Алгоритмы шифрования. Специальный справочник. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 576 с.
6. Мальцев Г. Н., Теличко В. В. Оптимизация состава средств защиты в информационно-управляющей системе с каналами беспроводного доступа на основе графа реализации угроз // Информационно-управляющие системы. 2008. № 4. С. 29–33.
7. Осипов В. Ю., Носаль И. А. Обоснование периода пересмотра мероприятий по защите информации //

Информационно-управляющие системы. 2014. № 1. С. 63–69.

8. Дружинин В. В., Конторов Д. С., Конторов М. Д. Введение в теорию конфликта. — М.: Радио и связь, 1989. — 288 с.
9. Владимиров В. И., Лихачев В. П., Шляхин В. М. Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели. — М.: Радиотехника, 2004. — 384 с.

10. Гаценко О. Ю. Защита информации. Основы организационного управления. — СПб.: Сентябрь, 2001. — 228 с.

11. Радько Н. М., Скобелев И. О. Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа. — М.: РадиоСофт, 2010. — 232 с.
12. Ветцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Высш. шк., 1998. — 576 с.

UDC 681.3.067

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.50

### Probabilistic Characteristics of Information System Security Changes under Unauthorized Access

Maltsev G. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy\_maltsev@mail.ru

Pankratov A. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., pankratov-av@rambler.ru

Lesniak D. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Laboratory Chief, denislesnyk@mail.ru

<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Forecasting information system security in respect to violators' unauthorized access, and determining the periodicity of information security management. **Method:** The emergence and prevention of the information security threats are represented in the form of streams of random events with preset statistical characteristics. The security dynamics is formally described by a probabilistic model of conflict interaction with a violator. **Results:** Under prior uncertainty, it is recommended to postulate exponential distribution of time necessary for a violator to break the protection. A model is developed to ground the best period for managing an information security system and describe how it changes its state with preset distribution functions for the probabilities of providing and overcoming the protection without imposing any restrictions on the type of these distributions. **Practical relevance:** The analysis of changing probabilistic characteristics can help in organizing flexible security management to prevent an unauthorized access taking into account the predicted security level.

**Keywords** — Information Security, Unauthorized Access, Conflict Interaction, Management of Information Security System.

#### References

1. Romanets Iu. V., Timofeev P. A., Shan'gin V. F. *Zashchita informatsii v komp'uternykh sistemakh i setiakh* [Information Security in Computer Systems and Networks]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2001. 376 p. (In Russian).
2. Petrenko S. A., Simonov S. V. *Upravlenie informatsionnymi riskami: Ekonomicheski opravdannaiia bezopasnost'* [Management of Information Risks: Economically Justified Safety]. Moscow, Ai-Ti-Press Publ., 2004. 381 p. (In Russian).
3. Maliuk A. A. *Informatsionnaia bezopasnost': kontseptual'nye i metodo-logicheskie osnovy zashchity informatsii* [Information Security: Conceptual and Methodological Bases of Information Security]. Moscow, Goriachaia liniia-Telecom Publ., 2004. 280 p. (In Russian).
4. Rostovtsev A. G., Makhovenko E. B. *Teoreticheskaia kriptografiia* [Theoretical Cryptography]. Saint-Petersburg, Professional Publ., 2003. 479 p. (In Russian).
5. Panasenko S. P. *Algoritmy shifrovaniia. Spetsial'nyi spravochnik* [Algorithms of Enciphering. Special Reference Book]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2009. 576 p. (In Russian).
6. Maltsev G. N., Telichko V. V. Optimization of Information Protection Means in the Informational-Command System with Wireless Channels Access Based on Threats Realization Graph. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2008, no. 4, pp. 29–33 (In Russian).
7. Osipov V. Yu., Nosal I. A. Substantiation of the Period of Revision of Information Security Measures. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, no. 1, pp. 63–69 (In Russian).
8. Druzhinin V. V., Kontorov D. S., Kontorov M. D. *Vvedenie v teoriu konflikta* [Introduction to the Theory of Conflict]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1989. 288 p. (In Russian).
9. Vladimirov V. I., Likhachev V. P., Shliakhin V. M. *Antagonisticheskii konflikt radioelektronnykh sistem. Metody i matematicheskie modeli* [Antagonisticheskyy Konflikt of Radio-Electronic Systems. Methods and Mathematical Models]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 384 p. (In Russian).
10. Gatsenko O. Iu. *Zashchita informatsii. Osnovy organizatsionnogo upravleniia* [Basics of Organizational Management]. Saint-Petersburg, Sentiabr' Publ., 2001. 228 p. (In Russian).
11. Rad'ko N. M., Skobelev I. O. *Risk-modeli informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem pri realizatsii ugroz udalennogo i neposredst-vennogo dostupa* [Risk-Models of Information and Telecommunication Systems at Realization of Threats of Remote and Direct Access]. Moscow, Radio-Soft Publ., 2010. 232 p. (In Russian).
12. Vettzel' E. S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1998. 576 p. (In Russian).

УДК 621.396:621.391.26

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.59

## СИНТЕЗ БИНАРНЫХ R-КОДОВ

Ю. В. Чепруков<sup>а</sup>, канд. техн. наук<sup>а</sup>Российский государственный университет туризма и сервиса, филиал в Сочи, РФ

**Введение:** увеличение эффективности современных систем невозможно без совершенствования бинарных кодов и сигналов на их основе. Часто применяемые  $N$ -элементные бинарные коды не позволяют достигать желаемого низкого уровня боковых пиков автокорреляционной функции при вариации  $N$  в достаточно широком диапазоне. К бинарным кодам для разнообразных систем могут предъявляться дополнительные требования по чередованию знаков коэффициентов и наличию аналитической системы нумерации. Это важно при построении и генерации множества кодов объемных ансамблей, когда хранятся не коэффициенты кодов, а их номера в определенной системе исчисления. Целью работы является аналитический синтез  $N$ -элементных бинарных кодов с заданным уровнем  $R$  боковых пиков автокорреляционной функции ( $R$ -кодов) при наличии определенных требований к чередованию коэффициентов кодов, а также разработка системы их учета. **Результаты:** изложена в общем виде методика решения задачи синтеза с ограничениями, указаны ее особенности (например, возможность преобразования совокупности неравенств в систему уравнений, причем ее первая половина используется для нахождения кодов-кандидатов на решение, а вторая — для выявления искомого решения). Даны соотношения, позволяющие найти значения кодовых последовательностей. Предложен способ нумерации синтезированных кодов, базирующийся на системе полных кодов. Введено понятие авторского кода, определяющего правило чередования знаков некоторых коэффициентов  $R$ -кодов. Дана методика нахождения списков кодов с такими свойствами в предложенной системе нумерации. Представлены примеры синтеза авторских кодов с  $R = 3$ ,  $N = 32$ , 33. **Практическая значимость:** предложенная методика и результаты синтеза могут найти приложение при построении бинарных кодов и сигналов на их основе для систем управления, связи, радиолокации, вычислительных систем и сетей.

**Ключевые слова** — бинарные коды, фазоманипулированные сигналы, автокорреляционная функция, уровень боковых пиков.

### Введение

В разнообразных современных коммуникационных и радиолокационных системах широко используются шумоподобные сигналы. Применяются одиночные сигналы и ансамбли. Разновидностью шумоподобных сигналов являются фазоманипулированные сигналы (ФМС) [1], которые состоят из последовательности  $N$  радиоимпульсов с одинаковой частотой и амплитудой. Очередность следования радиоимпульсов с различными начальными фазами характеризуется бинарной кодовой последовательностью или просто кодом. Назовем ФМС, автокорреляционная функция (АКФ) которых в области боковых пиков может изменяться в пределах  $\pm R$  ( $0 \leq R \leq N - 1$ ,  $R$  — целое), сигналами  $R$ -го рода (ФМС- $R$ ), а соответствующие им коды  $G_{R,N}$  —  $R$ -кодами [2, 3]. Пусть  $B = R/N$  — относительный уровень боковых пиков (УБП) АКФ этих  $R$ -кодов. Примером системы, в которой используются ФМС, является система мобильной связи CDMA (Code Division Multiple Access — системы с кодовым разделением каналов) [4]. В этой же работе [4] представлены требования к сигналам для CDMA, а сами сигналы и ансамбли, удовлетворяющие таким условиям, названы оптимальными. К ним отнесены, в частности, совокупности Голда, Касами, бент-функции. Существенный недостаток таких ансамблей заключается в высокой разреженности значений длин кодов ( $N = 2^n - 1 = 3, 7, 15, 31,$

$63, 127, \dots; n = 2, 3, \dots$ ) [5], что ограничивает их использование. Упомянутые коды базируются на  $M$ -последовательностях, из характеристик которых [1, 5] следует, что минимальное значение УБП АКФ  $B_1 \approx (0,7 \dots 1,25) / \sqrt{N}$ . Математический аппарат, привлекаемый для построения оптимальных кодов и ансамблей, — поля Галуа. В монографии [6] дана классификация ансамблей и методов синтеза, указаны проблемы их применения, например, при использовании полей Галуа необходимо обращаться к таблицам полиномов первой половины прошлого века. Вместе с введением оптимальных сигналов в работах [5, 6] упоминаются дополнительные требования, предъявляемые к кодам, например, приближенное равенство количества коэффициентов с положительными и отрицательными значениями (отсутствие постоянной составляющей). В работе [6] рассмотрены вопросы построения радиолокационных систем с непрерывными сигналами. При этом одной из сложных задач является фильтрация принятых кодовых последовательностей. Возможно, что существование у них некоторых особенностей чередования знаков (например, наличие в начале кода серии коэффициентов с условными значениями  $+1$ , а в конце — группы со значениями  $-1$ ) может использоваться для повышения качества фильтрации. Все другие требования, предъявляемые к кодам при синтезе, сохраняются.

В статьях [2, 3] сформулирована задача синтеза, обоснован и предложен для ее решения

метод упорядоченного перебора, представлены результаты. Приведены некоторые коды с  $R = 2, 3$ ;  $N \leq 25$  и все последовательности с  $R = 2$ ;  $N \leq 28$  соответственно. Показаны существенные преимущества синтезированных кодов по сравнению с  $M$ -последовательностями ( $B < B_1$  при равных  $N$ ). Получены [3] все 480  $R$ -кодов с  $R = 2$  ( $R2$ -кодов), показаны широкие возможности выбора значений  $N$  (22 варианта) при большей эффективности по сравнению с лучшими кодами Баркера по отношению УБП АКФ, дана таблица. В этих работах, однако, не рассмотрены возможности учета каких-либо дополнительных требований и особенностей чередования знаков коэффициентов. Не предложена система нумерации найденных решений, что важно при использовании объемных ансамблей, когда удобно хранить не сами коды, а их номера в заданной аналитической системе исчисления.

Таким образом, вопросы синтеза бинарных кодов и сигналов на их основе актуальны для широкого класса, например, коммуникационных систем с кодовым разделением абонентов и нуждаются в новых, дополнительных исследованиях.

### Цель работы, задача синтеза, особенности решения

Обозначим  $T$  длительность всех  $N$  радиоимпульсов ФМС. Начальные фазы могут быть равны 0 или  $\pi$ . Обозначим  $\{G_{R,N}\} = \{P_j, j = \overline{1, N}\}$ ,  $P_j = \pm 1$  — бинарные последовательности условных значений начальных фаз импульсов ФМС, которые соответствуют  $R$ -кодам. Цель работы — предложить аналитическую методику синтеза  $R$ -кодов при наличии ограничений на коэффициенты, ввести систему нумерации.

Пусть  $S(t)$  определяет модуль АКФ бинарных кодовых последовательностей ФМС. В моменты  $t_k = kT$ , отсчитываемые от начала АКФ,  $S(t_k)$  принимает экстремальные или нулевые значения, причем  $S(t_N) = N$ . Задачу синтеза можно представить в виде системы неравенств относительно коэффициентов [2, 3]:

$$S(t_k) = \left| \sum_{j=1}^k P_j \cdot P_{N+j-k} \right| \leq R_k; k = \overline{1, N-1}, \quad (1)$$

где  $R_k$  — заданные по условию синтеза значения АКФ в моменты времени  $t_k$ . В частном случае можно для всех  $t_k$  в области боковых пиков задать одинаковое максимальное значение АКФ, равное  $R$ . Универсальность методики состоит в возможности найти решение задачи для выбранной системы значений  $R_k$ , если решение существует. Ниже исследуется задача с равными величинами  $R$ .

Перейдем к представлению в аналитической форме дополнительных требований и особенно-

стей чередования знаков коэффициентов. Обозначим: 1)  $Z_0^+$  и  $Z_0^-$  — количество коэффициентов кодов из общего числа  $N$ , имеющих положительные и отрицательные знаки соответственно; 2)  $\delta Z = |Z_0^+ - Z_0^-|$  — неравнозначность кода; 3)  $\Delta$  — допустимая неравнозначность,  $\Delta = 0, 1, \dots, N$ . Введем  $Z_n^+ = n_n$  и  $Z_n^- = n_n$  — количество начальных и конечных коэффициентов кодов, имеющих положительный и отрицательный знаки соответственно, т. е.  $P_i = 1, i = 1, \dots, n_n$  и  $P_j = -1, j = N - n_n + 1, \dots, N$ . При этом должно выполняться условие  $n_n + n_n \leq N$ . Например, для  $R2$ -кода [3] (1,1,1,1,-1,1,-1,1,1,-1,-1) с  $N = 11$  имеем  $Z_0^+ = 7, Z_0^- = 4, \delta Z = 3, Z_n^+ = 4$  и  $Z_n^- = 2$ . Это позволяет записать дополнительные требования и особенности чередования знаков коэффициентов (ограничения задачи синтеза) в виде

$$\delta Z \leq \Delta; Z_n^+ = n_n, Z_n^- = n_n. \quad (2)$$

Числовые значения  $\Delta, n_n, n_n$  вводятся в условия синтеза, разумно задавать  $\Delta \ll N$ . Возможна постановка задачи нахождения кодов с максимально длинными сериями  $(Z_n^+ + Z_n^-)_{\max}$ . Отметим, что  $Z_n^+$  и  $Z_n^-$  регламентируют наименьшее обязательное количество положительных и отрицательных знаков, а условия на знаки всех других коэффициентов не накладываются. Поэтому этим соотношениям удовлетворяют и коды, у которых большее количество знакопостоянных коэффициентов, которые имеют более длинные серии значений с одинаковыми знаками. Это положение можно сформулировать как требование количества одинаковых знаков не менее, чем  $n_n, n_n$ , но указанные условия в виде равенств предпочтительнее при построении расчетной программы, чем неравенства.

Для дальнейшего изложения представим (1) в развернутом виде, для чего варьируем величину  $k$  в указанных пределах, тогда получим систему неравенств

$$\begin{aligned} |P_1 \cdot P_N| &\leq R, k = 1; \\ |P_1 \cdot P_{N-1} + P_2 \cdot P_N| &\leq R, k = 2; \\ |P_1 \cdot P_{N-2} + P_2 \cdot P_{N-1} + P_3 \cdot P_N| &\leq R, k = 3; \\ \left| P_1 \cdot P_{N+1-k} + \sum_{j=2}^{k-1} P_j \cdot P_{N+j-k} + P_k \cdot P_N \right| &\leq R, \\ k = \overline{4, N-1}, P_j = \pm 1, j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (3)$$

Назовем  $S_1 = \sum_{j=2}^{k-1} P_j \cdot P_{N+j-k}, k = \overline{3, N-1}$ , внутренней суммой ( $S_1 = 0$  для  $k = 1, 2$ ). Теперь в (1) можно выделить крайние слагаемые и внутреннюю сумму, после чего получить компактную запись системы

$$|P_1 \cdot P_{N+1-k} + S_1 + P_k \cdot P_N| \leq R, k = \overline{1, N-1}. \quad (4)$$

Видно, что для определения  $N$  целочисленных неизвестных имеется  $N - 1$  нелинейных неравенств (так как искомые коэффициенты перемножаются) с целочисленными (единичными) коэффициентами при неизвестных коэффициентах кодов.

Учтем, что  $R$  является целым положительным числом или 0, поэтому систему неравенств (3) можно представить в виде равенств. При этом имеются особенности. Например, первое неравенство в (3) справедливо, если выполняется хотя бы одно из уравнений  $P_1 \cdot P_N = \pm r$ , где  $r$  — целое положительное или 0 ( $r \leq R$ ). Но так как  $|P_j| = 1$ ,  $j = 1, \dots, N$ , то не для всех значений  $r$  уравнение имеет решения. Поэтому надо задавать величины  $r$ , которые не превышают количество слагаемых в левой части (3). Таких слагаемых имеется  $k$ , поэтому надо выбирать  $r$  из условия  $r \leq k$ , когда  $k \leq R$  (большие, чем  $k$ , значения  $r$  задавать бесполезно, чтобы не рассматривать уравнения, заранее не имеющие решений). Если шаг  $k > R$ , то обязательно надо брать все  $r \leq R$ . Выражения (3), (4) теперь преобразуем к виду

$$\begin{aligned} |P_1 \cdot P_N| &= r, k = 1; \\ |P_1 \cdot P_{N-1} + P_2 \cdot P_N| &= r, k = 2; \\ |P_1 \cdot P_{N+1-k} + S_1 + P_k \cdot P_N| &= r, \\ k &= \overline{3, N-1}, r = \overline{0, R}. \end{aligned} \quad (5)$$

Раскрывая знак модуля, составим из (5) систему

$$\begin{aligned} P_1 \cdot P_N &= \pm r, k = 1; \\ P_1 \cdot P_{N-1} + P_2 \cdot P_N &= \pm r, k = 2; \\ P_1 \cdot P_{N+1-k} + S_1 + P_k \cdot P_N &= \pm r; \\ k &= \overline{3, N-1}, r = \overline{0, R}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из сказанного относительно выбора  $r$  следует, что первое уравнение необходимо рассматривать лишь для  $r = 1$ , а второе — при  $r = 0; 2$  (если  $R \geq 2$ ) и так далее.

Классифицируем уравнения и систему (6). Зафиксируем индекс  $r$ . Отмечалось, что количество неизвестных  $N$  больше числа уравнений. Тогда с учетом целочисленности коэффициентов уравнений они и система (5) могут быть отнесены к диофантовым уравнениям [7, 8].

Возможно следующее упрощение. Каждый коэффициент кода может принимать значения  $\pm 1$ . Если выбрать  $P_1 = +1$  и найти требуемые коды, то все коды с  $P_1 = -1$  можно найти в результате инверсии ранее найденных наборов. Поэтому задача синтеза может рассматриваться лишь для одного варианта значения первого коэффициента кода  $P_1 = +1$ . Тогда, учтя  $|P_j| = 1$ , из первого уравнения (6) получим  $P_N = \pm 1$ . Из второго уравнения (6) тоже можно найти два коэффициента

( $P_2$  и  $P_{N-1}$ ):  $P_{N-1} = \pm r - P_2 \cdot P_N$ . Отнесем к  $P_2$  как к параметру, множество допустимых значений которого  $P_2 = \pm 1$ . Взяв эти значения параметра и учтя, что  $P_N = \pm 1$ , найдем  $P_{N-1} = \pm r - (\pm P_2)(\pm P_N)$ . Заметим, что внутренняя сумма определяется величинами, найденными на предыдущих шагах. Видно, что возникает множество вариантов наборов коэффициентов. Так как на каждом шаге определяются варианты двух коэффициентов, следовательно, выбор их из (6) возможен до шага (уравнения)  $kc = N/2$ ,  $kc = (N + 1)/2$  для четных и нечетных  $N$  соответственно. На шаге  $kc$  при четном  $N$  определяются  $P_{N/2}$  и  $P_{N/2+1}$ , а для нечетного  $N$  вычисляется единственный коэффициент  $P_{(N+1)/2}$ .

Рассматривая задачу далее аналогичным образом и принимая каждый раз  $P_k$  за целочисленный параметр со значениями  $\pm 1$ , для каждого шага  $k$  из последнего уравнения (6) можно получить следующие значения:

$$\begin{aligned} P_1 &= +1; P_N = \pm 1; P_2 = \pm 1; P_{N-1} = \pm r - P_2 \cdot P_N; \dots; \\ P_{N+1-k} &= \pm r - S_1 - (\pm P_k)(\pm P_N); |P_k| = 1, k = 3, \dots, kc. \end{aligned}$$

При этом требуется подставлять все варианты коэффициентов, установленных на предыдущих шагах  $k$ , учесть значения внутренней суммы (она ненулевая лишь с третьего шага), а также замечания по выбору  $r$ . Итак, на шагах с 1-го по  $kc$ -й определяются все наборы кодов, для которых они являются решениями соответствующих уравнений системы (6). Справедливость оставшихся  $(N - 1 - kc)$  уравнений системы (6) необходимо верифицировать путем подстановки всех найденных вариантов коэффициентов, определенных до шага  $kc$ , в указанную систему.

После сделанных уточнений каждое уравнение и всю систему (6) можно интерпретировать как систему уравнений с целочисленными коэффициентами, с одним неизвестным и с целочисленными параметрами. Обобщая сказанное, систему для определения коэффициентов до шага  $kc$  представим в форме

$$\begin{aligned} P_1 \cdot P_N &= \pm 1, k = 1; \\ P_1 \cdot P_{N-1} + P_2 \cdot P_N &= \pm r, k = 2; \\ P_1 \cdot P_{N+1-k} + S_1 + P_k \cdot P_N &= \pm r, \\ k &= \overline{3, kc}, r = \overline{0, R}. \end{aligned} \quad (7)$$

После шага  $kc$  проверяется выполнимость всех соотношений системы синтеза:

$$\begin{aligned} P_1 \cdot P_{N+1-k} + S_1 + P_k \cdot P_N &= \pm r, \\ k &= \overline{kc+1, N-1}, r = \overline{0, R}. \end{aligned} \quad (8)$$

Отсюда следует интересный вывод: для любых пар  $(N, R)$  в множестве полных кодов имеются последовательности, удовлетворяющие (7).

Действительно, сумма коэффициентов в левой части (7) не может быть более  $k$ , а для правой части, как было показано, необходимо взять  $r \leq k$ , т. е.  $r$  можно выбрать соответствующим образом. Однако не для всех комбинаций пар  $(N, R)$  такие наборы коэффициентов будут удовлетворять (8). Иначе говоря, можно построить коды, у которых на начальной половине АКФ значение УВП будет равным заданной малой величине, но для второй половины АКФ такие условия могут нарушаться.

**Система учета R-кодов**

Для учета вариантов наборов коэффициентов введем систему. Следуя работе [1], далее удобно использовать понятие о полном коде, содержащем все возможные варианты  $N$  элементарных бинарных кодов  $2^N$ . Эти коды расположим построчно в матрице полных кодов. Введем ее следующим образом. Ранее была обоснована возможность синтеза лишь кодов с  $P_1 = +1$ , а все прочие коды с противоположным знаком первого коэффициента будут являться инверсными. Назовем матрицей полных кодов таблицу, в которой построчно заданы все возможные коды с  $P_1 = +1$ , количество которых обозначим  $Ma = 2^{N-1}$ . Множество таких кодов можно ввести разными способами. Рассмотрим один из них, который далее применим для организации системы учета кодов.

Принцип построения кодов показан таблично. Вместо  $\pm 1$  в табл. 1 указаны лишь знаки. Показаны первые и последние коэффициенты последовательностей, а многоточие означает прочие коэффициенты кодов. Количество колонок равно  $Ma$ . Рассмотрим закон заполнения матрицы полных кодов. Строки табл. 1 заполняются попеременными действиями: первым — нижняя с  $P_1$  и верхняя с  $P_N$ ; вторым — нижняя с  $P_2$ , верхняя с  $P_{N-1}$  и так далее попарно, если  $N$  — четно. При четном  $N$  на  $kc$ -шаге последними заполняются строки для коэффициентов  $P_{N/2}$  и  $P_{N/2+1}$ . Для нечетного  $N$  на  $kc$ -шаге остается лишь единственная средняя строка таблицы для коэффициентов  $P_{(N+1)/2}$ . Индекс  $i$  в табл. 1 соответствует изменению знаков в строках или номеру колонок с вариантами.

■ Таблица 1

$P_N$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
$P_{N-1}$	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$P_3$	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
$P_2$	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
$P_1$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$i$	1	2	3	4	5	6	7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	Ma

Далее рассмотрим аналитический способ задания коэффициентов. Для этого понадобится функция  $E(x)$  — целая часть числа (это наибольшее целое число, не превосходящее  $x$ ). Пусть  $i = 1, \dots, Ma$  — индекс, задающий номера коэффициентов  $P_j(i)$  в строке, а  $j = 1, \dots, N$  — индекс изменения значения в колонке, тогда имеем

$$P_1(i) = (-1)^{\theta(1)}, \theta(1) = E((i-1)/\delta(1)), \text{ где } \delta(1) = Ma/2^0;$$

$$P_N(i) = (-1)^{\theta(N)}, \theta(N) = E((i-1)/\delta(N)),$$

где  $\delta(N) = Ma/2^1$ ;

$$P_2(i) = (-1)^{\theta(2)}, \theta(2) = E((i-1)/\delta(2)), \text{ где } \delta(2) = Ma/2^2;$$

$$P_{N-1}(i) = (-1)^{\theta(N-1)}, \theta(N-1) = E((i-1)/\delta(N-1)),$$

где  $\delta(N-1) = Ma/2^3$ ;

$$P_3(i) = (-1)^{\theta(3)}, \theta(3) = E((i-1)/\delta(3)),$$

где  $\delta(3) = Ma/2^4; \dots$  (9)

Введем индекс  $j0 = (j+1)/2$ , если  $j$  — нечетно (тогда  $j_m = (N+1)/2$  — наибольшее значение индекса  $j0$  с учетом значений  $j$ ), и  $j0 = N - j/2 + 1$ , когда  $j$  — четно (при этом  $j_m = N/2 + 1$ ). В результате получим  $j0 = 1, N, 2, N-1, 3, N-2, \dots, j_m$ ;  $i = 1, \dots, Ma$ , что соответствует нижним индексам коэффициентов  $P$  в соотношении (9). Теперь в компактном виде имеем:  $P_{j0}(i) = (-1)^{\theta(j0)}$ ,  $\theta(j0) = E((i-1)/\delta(j0))$ , где  $\delta(j0) = Ma/2^{j-1}$ .

Установим связь между решениями системы (7) и матрицей полных кодов, заполняемой согласно (9). Например, если  $N = 5$ , то получим коэффициенты, знаки которых приведены в табл. 2. Для  $N = 5, R = 2$  можно получить значения коэффициентов, используя (9). Здесь на шаге  $kc = 3$  определяются значения  $P_3$ , но для некоторых вариантов значений этих коэффициентов требования к УВП АКФ не выполняются. Эти коэффициенты выделены цветом в табл. 2. Соответствующие кодовые последовательности с отмеченными элементами назовем «цветными» кодами. Колонки с такими кодами далее не рассматриваются. В результате из  $Ma$  наборов получается 12 подозрительных кодов. Они удовлетворяют (7) на шагах от 1 до  $kc$ . Далее для шагов от  $kc + 1$  до  $N - 1$  проверяется выполнимость условий (8). Можно убедиться, что все 12 кодов являются  $R2$ -кодами [3]. Их номера в системе исчисления полных кодов

■ Таблица 2

$P_5$	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$P_4$	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-
$P_3$	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
$P_2$	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
$P_1$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

(это колонки табл. 2, не содержащие отмеченных цветом символов) расположим в матрице-строке  $I(N, R) = I(5, 2) = (2, 3, 5, 8, \dots, 16)$ . Таким образом, при последовательном решении уравнения (7) с целочисленными параметрами определяются наборы коэффициентов (подозрительные коды) и их номера  $i$  в системе исчисления полных кодов. Далее они подставляются в (8), и при справедливости указанных соотношений определяются искомые  $R$ -коды и их номера в выбранной системе учета. Таким образом, предложено правило заполнения матрицы полных кодов, а система учета заключается в определении номера каждого найденного при синтезе  $R$ -кода в матрице полных кодов.

В работах [2, 3] предложен и обоснован метод упорядоченного перебора коэффициентов матрицы полных кодов. Аналитический метод эффективнее по быстродействию, так как при его применении не осуществляются операции с «цветными» кодами. Однако метод упорядоченного перебора легче в использовании.

Величина  $M_a$  и объем матрицы полных кодов удваиваются при каждом увеличении  $N$  на единицу. Размеры требуемых массивов при составлении программ расчетов могут быстро превзойти возможности используемого языка программирования. Номера синтезированных кодов становятся многозначными, поэтому целесообразно провести разбиение на части. Например, в методе упорядоченного перебора при  $N = 32$  [3] применялось  $2^8$  блоков, содержащих  $2^{14}$  циклов, в каждом из которых рассматривался набор из  $2^9$  вариантов кодов, т. е. всего  $M_a = 2^{31}$ . Блоки могут рассматриваться отдельно друг от друга, так как для каждого из 256 блоков возможно введение знаков нескольких начальных и конечных коэффициентов, что позволяет перебирать «внутренние» коэффициенты кодов и снизить размеры массивов, применяемых при составлении программ синтеза. Представим номер (адрес) некоторой кодовой последовательности (тест-кода) в системе полных кодов. Пусть тест-код расположен в  $(A^* + 1)$ -м блоке,  $(E^* + 1)$ -м цикле. Тогда адрес определяется значениями  $A^*$ ,  $E^*$  и номером кода в наборе  $I^* = 2^{23} \cdot A^* + 2^9 \cdot E^* + U^*$ , где  $A^*$  — количество полных блоков (во всех циклах блока рассматривается  $2^{14} \cdot 2^9$  вариантов), а  $E^*$  — количество полных циклов (в каждом исследуется указанное количество вариантов);  $U^*$  — номер  $R$ -кода в анализируемом наборе цикла. При таком подходе нужно задавать три параметра, но адрес при этом существенно короче, чем непосредственный прямой номер  $i$ . Можно избавиться от необходимости проводить операции с большими числами. Для этого вводится не сам номер, а интервал изменения номеров  $(i_n, i_k)$  в системе полных кодов, в пределах которого находится один или несколько номеров требуемых  $R$ -кодов. Здесь  $i_n, i_k$  — на-

чальные или конечные номера кодов, например, в выбранном цикле и блоке. При таком подходе задаются фактически значения нескольких начальных и конечных коэффициентов, при этом формируется одна или даже несколько кодовых последовательностей, что может быть быстрее, чем формировать каждую в отдельности с самого начала. Тогда номер интервала имеет вид  $I^* = 2^{23} \cdot A^* + 2^9 \cdot E^* + U'(i_n, i_k)$  — номер  $R$ -кода, который расположен в  $(A^* + 1)$ -м блоке, в  $(E^* + 1)$ -м цикле, между вариантами набора  $U'(i_n, i_k)$  кодов с номерами  $i_n, \dots, i_k$ . Допустим,  $A^* = 1$  (просмотрен первый блок и рассматривается второй);  $E^* = 2^{13}$  (последний цикл в блоке);  $(i_n = 1, i_k = 2^9)$  — набор всех вариантов. Тогда можно записать  $I^* = 2^{23} \cdot 1 + 2^9 \cdot 2^{13} + U'(1, 2^9)$  — коды из второго блока, последнего цикла, всего набора.

Далее применяется программа упорядоченного перебора кодов с номерами, указанными в адресе  $I^*$ , после чего формируются коэффициенты и генерируются кодовые последовательности. Номера синтезированных  $R$ -кодов в системе исчисления полных кодов (их общее количество равно  $g_{R,N}$  [2, 3]) можно расположить в матрице-строке  $I(N, R) = (I_1^*, I_2^*, \dots, I_{g_{R,N}}^*)$ , где  $g = g_{R,N}$ . Подставив при заданном  $N$  величины  $i = I_p^*, p = 1, \dots, g_{R,N}$ , в (9), можно найти кодовые последовательности. Это позволяет сохранять не сами коды, а их номера в выбранной системе исчисления.

Перейдем к учету ограничений (2) на изменения коэффициентов в форме дополнительных требований и особенностей. Введем понятие авторского кода, под которым будем понимать бинарные кодовые последовательности  $P_j^*$  в которых знаки некоторых (или даже всех) коэффициентов кодов задаются в виде начального условия задачи. Тогда задача синтеза заключается в нахождении  $R$ -кодов, удовлетворяющих условию (1) и имеющих заданную авторским кодом последовательность чередования коэффициентов. Если авторский код накладывает условия на все элементы кода, то нужно проверить выполнимость условия (1) для такой последовательности. Второе и третье соотношения в (2) определяют разновидность авторского кода, в котором задаются противоположные по знакам группы начальных и конечных коэффициентов. Например, для случая задания наборов коэффициентов кодов с положительными знаками в начале и отрицательными в конце последовательностей в правой половине табл. 1 можно выделить номера вариантов, среди которых будут находиться искомые решения (если они вообще существуют для данных  $N, R$ ). Чтобы аналитически задать порядок чередования знаков начальных и конечных коэффициентов кодов, введем двоичные символы (1; 0) авторского кода по правилу  $P_j^+ = 1$  и  $P_j^- = 0$ , если для некоторых  $j = 1, \dots, N$  в авторском коде  $P_j^* = +1$ , а также  $P_j^+ = 0$  и  $P_j^- = 1$  при  $P_j^* = -1$ .

Если допустимо, что знаки отдельных элементов авторского кода могут быть как положительными, так и отрицательными ( $P_j^* = \pm 1$ , т. е. знаки безразличны), то  $P_j^+ = 1$  и  $P_j^- = 1$ . Знаки (+, -) в правом верхнем сегменте символа коэффициентов назовем адресными.

Задача состоит в определении интервалов (списков) изменения индекса  $i$  (это удобно видеть в табл. 1, 2), для которых заданные авторским кодом коэффициенты принимают требуемые значения. В авторских кодах, как и в задаче синтеза  $R$ -кодов,  $P_1 = 1$ . Для левой половины указанных таблиц  $P_N = 1$  и список номеров включает индексы  $i = (1, \dots, Ma/2)$ . Для правой части таблиц  $P_N = -1$  и список состоит из номеров  $i = (1 + Ma/2, \dots, Ma)$ . То есть индексы в скобках являются списками кодов из общего числа полных кодов, у которых в соответствии с авторским кодом первый и последний коэффициенты равнозначны либо противоположны.

Введем индекс  $j1 = 1, \dots, g_A$ , обуславливающий номер операции по порядку следования при рассмотрении авторских кодов, определяющий состав списков номеров кодов, соответствующих значениям этих авторских кодов. Общее количество операций  $g_A = 2 \cdot Z_H^+ - 1$ , если  $Z_H^+ > Z_K^-$  и  $g_A = 2 \cdot Z_H^-$ , когда  $Z_H^+ < Z_K^-$  (это следует из выражений для общих списков, которые получены ниже). Определим индекс  $j2 = (j1 + 1)/2$ , если  $j1$  — нечетно, и  $j2 = N - j1/2 + 1$ , когда  $j1$  — четно ( $j2 = 1, N, 2, N - 1, 3, N - 2, \dots$ ). Он соответствует номеру коэффициента авторского кода на  $j1$ -й операции, а также индексу общего списка кодов, который обозначим  $F_{j2}$ .

Перейдем к представлению списков. При  $j1 = 1$  в общий список нужно включить все коды, так как для любых кодов в рассматриваемых нами задачах  $P_1 = P_1^* = P_1^+ = +1$ . Следовательно,  $F_1 = (1, \dots, Ma)$  (это видно также из табл. 1, 2). Для дальнейших действий введем операцию умножения множества на положительное целое число  $K$ :  $F_{j2} \cdot K = F_{j2}$  при  $K = 1$ , если  $K = 0$ , то  $F_{j2} \cdot K = \emptyset$  (пустое множество). Это позволяет при  $j1 = 1, j2 = 1$  записать  $F_1 = (1, \dots, Ma) \cdot P_1^+$ . Вторая операция — сложение множеств  $F_{j2}$ , при этом происходит объединение списков.

Далее, если  $j1 = 2, j2 = N$ , то список, как следует из таблиц, должен состоять из двух частей в зависимости от знака  $N$ -го коэффициента. Поэтому его можно представить в форме  $F_N = (1, \dots, Ma/2) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ + (1 + Ma/2, \dots, Ma) \cdot P_1^+ \cdot P_N^-$  — общий (объединенный) список индексов кодов. Он состоит из слагаемых, соответствующих спискам наборов номеров кодов. Эти слагаемые общих списков назовем элементарными списками для данного  $j1$ . Например, если второй коэффициент авторского кода равен  $-1$ , то по правилам задания двоичных авторских кодов  $P_N^+ = 0$ , а  $P_N^- = 1$ ,

и нужно рассматривать лишь коды с номерами от  $1 + Ma/2$  до  $Ma$ , что соответствует табл. 1, 2.

Ниже используется параметр, который введем следующим образом:  $P_0 = P_1^+ \cdot P_N^+$ , где  $P_N^+ = P_N^+$  или  $P_N^+ = P_N^-$  для множителей первого или второго элементарных списков в  $F_N$ . Лишь для авторского кода  $P_0 = 1$ , а для всех других вариантов он равен нулю, тем самым в  $F_N$  остается только единственный элементарный список индексов, соответствующий заданному авторскому коду.

Затем при  $j1 = 3, 4$  имеем соответственно  $j2 = 2, N - 1$ . Каждый список разделяется пополам, а также умножается на коэффициент  $P_{j2}^+$ , т. е. на  $P_2^+, P_2^-$  при  $j2 = 2$  и на  $P_{N-1}^+, P_{N-1}^-$  для  $j2 = N - 1$ . Общие списки для  $j2 = 2$  состоят из следующих элементарных наборов номеров кодов:

$$F_2 = ((1, \dots, Ma/4) \cdot P_2^+ + (1 + Ma/4, \dots, Ma/2) \cdot P_2^-) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ + ((1 + Ma/2, \dots, 3 \cdot Ma/4) \cdot P_2^+ + (1 + 3 \cdot Ma/4, \dots, Ma) \cdot P_2^-) \cdot P_1^+ \cdot P_N^-$$

Раскроем скобки:

$$F_2 = (1, \dots, Ma/4) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ \cdot P_2^+ + (1 + Ma/4, \dots, Ma/2) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ \cdot P_2^- + (1 + Ma/2, \dots, 3 \cdot Ma/4) \cdot P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^+ + (1 + 3 \cdot Ma/4, \dots, Ma) \cdot P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^- \quad (10)$$

При  $j2 = N - 1$

$$F_{N-1} = (((1, \dots, Ma/8) \cdot P_{N-1}^+ + (1 + Ma/8, \dots, 2 \cdot Ma/8) \cdot P_{N-1}^-) \cdot P_2^+ + ((1 + 2 \cdot Ma/8, \dots, 3 \cdot Ma/8) \cdot P_{N-1}^+ + (1 + 3 \cdot Ma/8, \dots, 4 \cdot Ma/8) \cdot P_{N-1}^-) \cdot P_2^-) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ + (((1 + 4 \cdot Ma/8, \dots, 5 \cdot Ma/8) \cdot P_{N-1}^+ + (1 + 5 \cdot Ma/8, \dots, 6 \cdot Ma/8) \cdot P_{N-1}^-) \cdot P_2^+ + ((1 + 6 \cdot Ma/8, \dots, 7 \cdot Ma/8) \cdot P_{N-1}^+ + (1 + 7 \cdot Ma/8, \dots, Ma) \cdot P_{N-1}^-) \cdot P_2^-) \cdot P_1^+ \cdot P_N^-$$

После раскрытия скобок найдем

$$F_{N-1} = (1, \dots, Ma/8) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ \cdot P_2^+ \cdot P_{N-1}^+ + (1 + Ma/8, \dots, 2 \cdot Ma/8) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ \cdot P_2^+ \cdot P_{N-1}^- + (1 + 2 \cdot Ma/8, \dots, 3 \cdot Ma/8) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ \cdot P_2^- \cdot P_{N-1}^+ + (1 + 3 \cdot Ma/8, \dots, 4 \cdot Ma/8) \cdot P_1^+ \cdot P_N^+ \cdot P_2^- \cdot P_{N-1}^- + (1 + 4 \cdot Ma/8, \dots, 5 \cdot Ma/8) \cdot P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^+ \cdot P_{N-1}^+ + (1 + 5 \cdot Ma/8, \dots, 6 \cdot Ma/8) \cdot P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^+ \cdot P_{N-1}^- + (1 + 6 \cdot Ma/8, \dots, 7 \cdot Ma/8) \cdot P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^- \cdot P_{N-1}^+ + (1 + 7 \cdot Ma/8, \dots, Ma) \cdot P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^- \cdot P_{N-1}^- \quad (11)$$

Отметим, что сомножители в произведении коэффициентов расположены в порядке изменения индекса ( $j2 = 1, N, 2, N - 1, \dots$ ). Из выражений для  $F_N, F_2$  и  $F_{N-1}$  следует, что в них нужно подставлять значения двоичных авторских кодов и находить соответствующее ненулевое значение  $P_0$ . Это позволит определить искомое слагаемое в общем списке и требуемый элементарный список из количества, равного  $2^{j1-1}$ . Однако имеется другой подход. Используем связь закона чередования адресных знаков двоичных авторских кодов и номеров элементарных списков по порядку их следования в общем списке на шаге  $j1$ .

Начнем с  $j1 = 2$  и рассмотрим произведение  $P_1^+ \cdot P_N^+$  и  $P_1^+ \cdot P_N^-$ . В них первый коэффициент неизменно равен единице, а вторые сомножители используем для составления двоичных чисел по следующему правилу: если у коэффициента, стоящего правее  $P_1^+$ , адресный символ (+), то коэффициенту ставим в соответствие двоичный символ «1», а когда в правом верхнем углу имеется (-), то вводим двоичный «0». Теперь получим двоичные адресные числа, которые обозначим  $A_2(l)$  ( $l$  — индекс, изменяющийся от 1 до  $2^{j1-1}$  и определяющий количество интервалов (элементарных списков)). Следовательно, для  $j1 = 2$  имеем два списка и два двоичных адресных числа:  $A_2(1) = 1, A_2(2) = 0$ . Преобразуем их в десятичные адресные числа  $A_{10}(1) = 1, A_{10}(2) = 0$ , которые позволяют найти номер по порядку  $L'$  элементарного списка в общем списке по правилу

$$L' = 2^{j1-1} - A_{10}. \quad (12)$$

То есть при  $j1 = 2$  имеем  $L' = 1$ , если в авторском коде первый и последний коэффициенты положительны ( $P_N^+$ ). Когда принят авторский код, в котором первый и последний коэффициенты противоположны ( $P_N^-$ ), то получим  $L' = 2$ . Видно, что, рассмотрев порядок чередования знаков авторского кода, можно найти номер интервала (список) в системе полных кодов.

Продолжим для  $j1 = 3$ . В выражении (10) адресные знаки чередуются, так что двоичные адресные числа, соответствующие первому и последующим слагаемым в общем списке  $F_2$ , изменяются в пределах  $A_2(l) = (11), \dots, (00)$  при  $l = 1, \dots, 2^{j1-1}$ . Для известного авторского кода можно получить двоичные  $A_2$  и десятичные  $A_{10}$  адресные числа, что позволяет найти адрес (номер) элементарного списка (12). Например, если авторский код включает три символа и задан так, что двоичные символы авторского кода есть  $P_N^-$  и  $P_2^+$ , то  $A_2 = 1$  и, соответственно,  $A_{10} = 1$ , поэтому на основании (12)  $L' = 2^{j1-1} - A_{10} = 4 - 1 = 3$ . Действительно, пример соответствует третьему элементарному списку в (10).

При  $j1 = 4$  двоичные символы авторского кода состоят из трех символов, общий список состо-

ит из восьми элементарных, числа  $A_2$  являются трехразрядными,  $A_{10}$  изменяется от 7 до 0, а  $L'$  варьируется, соответственно, от 1 до 8.

Для записи общей формулы введем  $n_{j1} = 2^{j1-1}$  — количество слагаемых в общем списке  $F_{j2}$  при выбранном  $j1$ . Число элементарных списков  $\Delta_{j1} = Ma/n_{j1}$ , а индексы кодов, входящих в каждый из них, принимают значения

$$A_l = (1 + (l - 1) \cdot Ma/n_{j1}, \dots, l \cdot Ma/n_{j1}), l = 1, \dots, n_{j1}. \quad (13)$$

Перейдем к методике определения элементарного списка по авторскому коду.

**Шаг 1.** Задаются значения авторского кода  $P_j^*$ ,  $j = 1, \dots, n_n$ ;  $P_{N-j+1}^*$ ,  $j = 1, \dots, n_k$ .

**Шаг 2.** Определяются двоичные символы авторского кода  $P_j^\pm$ ,  $j = 1, \dots, n_n$  и  $P_{N-j+1}^\pm$ ,  $j = 1, \dots, n_k$  (запись ( $\pm$ ) означает, что из этих двух вариантов знаков выбирается один, определяемый авторским кодом).

**Шаг 3.** Составляется произведение двоичных авторских кодов, расставляются сомножители в следующем порядке:  $j1 = 1, \dots, g_A$ ,  $j2 = 1, N, 2, N - 1, \dots$ ;  $P_0 = P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^- \cdot P_{N-1}^+ \dots$ .

**Шаг 4.** Выписываются в строку все адресные символы сомножителей из  $P_0$ , начиная со второго, и на их основе определяется двоичное адресное число  $A_2$ , а потом и соответствующее ему десятичное адресное число  $A_{10}$ .

**Шаг 5.** С помощью (12) устанавливается номер искомого элементарного списка с номером  $L'$ :

$$A_{L'} = (1 + (L' - 1) \cdot Ma/n_{j1}, \dots, L' \cdot Ma/n_{j1}), j1 = g_A. \quad (14)$$

Методика определения списка завершена. Если авторские  $R$ -коды существуют, то только в этом интервале значений индексов. Если  $n_n \neq n_k$  (например,  $n_n > n_k$ ), то каждый из  $n_n - n_k$  коэффициентов последней группы, как было указано выше, при составлении двоичных символов учитывается отдельно, как  $P_j^+ = 1$  и  $P_j^- = 1$ , и искомый список будет равен сумме нескольких элементарных списков (пример 1).

### Примеры синтеза

**Пример 1.** Дано:  $N = 32$ ;  $R = 3$ ;  $n_n = 7$ ;  $P_j^* = 1$ ,  $j = 1, \dots, n_n$ ;  $n_k = 3$ ;  $P_{N-j+1}^* = -1$ ,  $j = 1, \dots, n_k$ ;  $\Delta = 4$ .

**Найти:** кодовые последовательности  $P_j$ ,  $j = 1, \dots, 32$ , соответствующие заданным авторским  $R3$ -кодам.

**Решение:** так как  $g_A = 2n_n - 1 = 13$ , то  $P_0 = P_1^+ \cdot P_N^- \cdot P_2^+ \cdot P_{N-1}^- \cdot P_3^+ \cdot P_{N-2}^- \cdot P_4^+ \cdot P_{N-3}^- \cdot P_5^+ \cdot P_{N-4}^- \cdot P_6^+ \cdot P_{N-5}^- \cdot P_7^+$ , поэтому адресные символы составляют набор из 12 знаков ( $P_1^+$ , как говорилось, не учитывается):  $(-, +, -, +, -, +, -, +, -, +, -, +)$ . В трех



методика синтеза  $R$ -кодов. Введено понятие об авторских кодах, изложена методика определения списков номеров, в которых они находятся. Продемонстрированы примеры синтеза. Введена

система нумерации  $R$ -кодов, позволяющая осуществлять их учет для оперативного генерирования. Указаны варианты применения результатов работы.

## Литература

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 384 с.
2. Чепруков Ю. В., Соколов М. А. Синтез фазоманипулированных сигналов с требуемым уровнем боковых пиков АКФ // Радиотехника. 1991. № 5. С. 68–70.
3. Чепруков Ю. В., Соколов М. А. Бинарные R2-коды, их характеристики и применение // Информационно-управляющие системы. 2014. № 1. С. 76–83.
4. Ипатов В. П., Орлов В. К., Самойлов И. М., Смирнов В. Н. Системы мобильной связи: учеб. пособие для вузов / под ред. В. П. Ипатова. — М.: Горячая линия–Телеком, 2003. — 272 с.
5. Ipatov V. P. Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications. — N. Y.: John Wiley and Sons Ltd., 2004. — 373 p.

6. Гантмахер В. Е., Быстров Н. Е., Чеботарев Д. В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. — СПб.: Наука и техника, 2005. — 400 с.
7. Диофантовы уравнения. [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_mathematics/1506](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/1506) (дата обращения: 20.04.2014).
8. Диофантовы уравнения. <http://bars-minsk.narod.ru/teachers/diofant.html> (дата обращения: 20.04.2014).
9. А.с. 1709498 СССР, МКИЗ Н 03 Н 15/02, 17/00. Согласованный фильтр/ Ю. В. Чепруков, М. А. Соколов (СССР). — № 1709498; заявл. 06.12.1989; опубл. 30.01.92, Бюл. № 4. — 4 с.
10. Чепруков Ю. В., Соколов М. А. Метод оптимизации весовых фильтров сжатия фазоманипулированных сигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1991. № 4. С. 31–37.

UDC 621.396:621.391.26

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.59

## Synthesis of Binary R-Codes

Cheprukov Yu. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., [chuv52@mail.ru](mailto:chuv52@mail.ru)

<sup>a</sup>Russian State University of Tourism and Service in Sochi, 24/a, Kirpichnaia St., 354340, Sochi, Russian Federation

**Purpose:** The increase in efficiency of modern systems is impossible without improving binary codes and signals on their basis. Widely used  $N$ -element binary codes do not provide the desirable low level of the lateral peaks of the autocorrelation function if  $N$  varies in a rather wide range. Additional requirements can be imposed on binary codes for various systems, concerning alternation of the coefficient signs and the existence of an analytical numbering system. It is important for constructing and generating a set of volume ensemble codes, storing not the code coefficients but their numbers in a certain numeral system. The purpose of this work is analytical synthesis of  $N$ -element binary codes with a preset level  $R$  of lateral peaks of the autocorrelation function ( $R$ -codes) under certain requirements to the alternation of the code coefficients, as well as the development of a system for their accounting. **Results:** A technique for the restricted synthesis problem solution is outlined, and its features are specified (for example, the possibility to transform a set of inequalities into a system of equations, its first half used for finding possibly appropriate codes, and its second half for choosing truly appropriate ones). Ratios are given which help to find the values of the code sequences. A way of numbering the synthesized codes based on a system of full codes is proposed. The concept of an author's code is introduced, to determine the rule of sign alternation for some  $R$ -code coefficients. A technique is given for finding lists of codes with these properties in the offered numbering system. Examples are given of synthesizing author's codes with  $R = 3$ ,  $N = 32, 33$ . **Practical relevance:** The proposed technique and the results of the synthesis can find a use in building binary codes and signals on their basis for control systems, communication systems, radiolocation, computer systems and networks.

**Keywords** — Binary Codes, Phase Manipulated Signals, Autocorrelation Function, Height of Lateral Peaks.

## References

1. Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication Systems with Noise Signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p. (In Russian).
2. Cheprukov Yu. V., Socolov M. A. Synthesis of Phasemanipulated Signals with Required Level of Side Peaks ACF. *Radiotekhnika*, 1991, no. 5, pp. 68–70 (In Russian).
3. Cheprukov Yu. V., Socolov M. A. Binary R2-Codes, Their Features and Application. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, no. 1, pp. 76–83 (In Russian).
4. Ipatov V. P., Orlov V. K., Samoilov I. M., Smirnov V. N. *Sistemy mobil'noi svyazi* [Mobile Communication Systems]. Ed. by V. P. Ipatov. Moscow, Goriachaia liniia–Telekom Publ., 2003. 272 p. (In Russian).
5. Ipatov V. P. *Spread Spectrum and CDMA. Principles and Applications*. New York, John Wiley and Sons Ltd., 2004. 373 p.
6. Gantmaher V. E., Bystrov N. E., Chebotarev D. V. *Shumopodobnye signaly. Analiz, sintez, obrabotka* [Pseudonoise Signals. Analysis, Synthesis, and Processing]. Saint-Petersburg, Nauka i tekhnika Publ., 2005. 400 p. (In Russian).
7. *Diofantovy uravneniia* [Diophant Equations]. Available at: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_mathematics/1506](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/1506) (accessed 20 April 2014).
8. *Diofantovy uravneniia* [Diophant Equations]. Available at: <http://bars-minsk.narod.ru/teachers/diofant.html> (accessed 20 April 2014).
9. Cheprukov Yu. V., et al. *Soglasovannyi fil'tr* [Matched Filter]. Patent USSR, no. 1709498, 1992.
10. Cheprukov Yu. V., Socolov M. A. Method of Optimization of Weight Compression Filters of Phasemanipulated Signals. *Izvestiia vuzov. Radioelektronika*, 1991, no. 4, pp. 31–37 (In Russian).

UDC 654.165

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.68

## DEPOLARIZATION EFFECTS OF RADIO WAVE PROPAGATION IN VARIOUS LAND BUILT-UP ENVIRONMENTS

**Y. Ben-Shimol**<sup>a</sup>, PhD, Electrical Engineering, Senior Lecturer, benshimo@bgu.ac.il

**N. Blaunstein**<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, nathan.blaunstein@hotmail.com

**M. B. Sergeev**<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, mbse@mail.ru

<sup>a</sup>Ben-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 74105, Israel

<sup>b</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** A detailed analysis of the spatial-temporal variations of the polarized characteristics of an elliptically polarized radio wave propagating in various built-up environments. **Methods:** Analysis of the classical methods used for defining the polarized parameters of homogeneous monochromatic plane waves, arriving at the receiver antenna from various directions in free space, is briefly presented. These methods are adapted for the propagation scenarios occurring in four land built-up environments, where the complicated stochastic variations of wave polarization parameters have been observed experimentally and when the canonical methods are ineffective. The 3D classical presentation of the geometrical parameters of the polarized ellipse and Stocks parameters are used to analyze the co-polarized and cross-polarized components of the wave intensity in the vertical and horizontal plane of the polarization ellipse and their relations with the main parameters and characteristics of the built-up terrain are explored. **Practical Relevance:** The presented analysis allows to estimate theoretically the angle of wave depolarization and the polarization loss effects in rural, mixed residential, sub-urban, and urban areas. Such estimation allows designers of cellular networks to predict reception problems due to de-polarization in the presence of stochastic disturbances. Measurements that are taken prior to the deployment of cellular networks can now be limited to "problematic antenna positions" that are predicted by the presented model. To the best knowledge of the authors such results are presented for the first time.

**Keywords** – Depolarization, Propagation Channels, Built-up Environments.

### Introduction

During propagation in the space domain, all radio waves can be decomposed into two wave components mutually orthogonal in the plane perpendicular to the direction of propagation. A complete description of the polarization state of a radio wave under consideration consists of the magnitude of its mutually orthogonal electrical field components that may differ in magnitude and phase, determining the type of wave polarization: linear, circular or elliptical, (see [1–8] and bibliography therein). One of the main problems (among other complicated problems), observed in the recent 4–5 decades, was the effect of the polarization discrimination or mismatch (called the depolarization) occurring in the land communication channels: rural, mixed residential, sub-urban and urban [9–18]. As was shown by numerous measurements and experiments carried in different terrestrial built-up environments, the effects of depolarization are caused by multipath phenomena due to multiple reflection, diffraction and scattering from natural and artificial obstructions located in areas of service surrounding the transmitter and the receiver antennas [19–26]. To mitigate and overcome these effects from the beginning, several methods were proposed, based on usage of the polarization diversity techniques [14–18, 27–29] or the use of adaptive (smart) nar-

row-beam antennas with elliptical-like polarization [8, 30, 31], instead of those having vertical and/or horizontal polarization [14–18, 27–29]. In further investigations in elliptically polarized antennas, the effects of rotation of the polarization ellipse on the angle called depolarization angle, show changes its shape and in the ratio of its main axes, a redistribution of wave energy along the elliptic axes, and finally, loss of the wave field energy. The classical theoretical frameworks and experimental techniques, performed during the sixties to nineties period of the last century, have drawn the attention to the definition of the polarized parameters of homogeneous monochromatic plane waves arriving at the receiver antenna from various directions in free space, mostly on the geometrical parameters of the polarized ellipse and on Stocks parameters [3, 9–13]. These approaches were usually related to the tasks of selecting and remote sensing of different targets in radio-location based on data concerning kinds of polarization of the reflected signal from targets. Another use was obtaining a stable wireless communication in various land environments. Thus, these methods were adapted to the problems of wireless communications focusing the attention on the analysis of complicated interference fields, formed in conditions of multipath propagation of radio waves in the land built-up environment, where the canonical methods become ineffective.

This happens, since the parameters of the polarized ellipse and its spatial orientation become to be the local characteristics of the field in such multiray built-up channels, which are significantly changed with distance defined by the characteristic scale of interference variations of the field amplitude or intensity [27–31]. Based on a classical presentation of the geometrical parameters of the polarized ellipse and on Stocks parameters, the co-polarized and cross-polarized components of the signal intensity variations in the vertical and horizontal plane of the polarization ellipse were obtained. Unfortunately, a close relation between the parameters of depolarization, such as the angle of depolarization and the depolarization losses, and different “responses” of the various land environments, rural, sub-urban and urban, on radio propagation was lacking. The development of the unified stochastic approach during the nineties of the last century [13–18, 27, 28], provided a detailed description of the relations of the main parameters of the built-up terrain and its features with radio wave intensity variations in the space, angle-of-arrival and time-of-arrival domains. The unified stochastic approach enables to investigate the effects of depolarization on elliptically polarized radio wave propagating through various land channels – rural, mixed residential, sub-urban and urban became possible. As was shown in [3, 8–13, 28–30]..., in a land built-up environment, the direction of the normal vector to the plane of the polarized ellipse cannot be related to the desired direction of any wave propagation, and its changes have stochastic character depending on the amount of waves, arriving at the observation point, their direction of arrival, amplitude and phase variations.

**Main Characteristics and Vectors of the Polarized Ellipse**

Let us consider a spatial coordinate system determined by a set of three orthogonal unit vectors  $\{\mathbf{u}_1 \equiv \mathbf{x}, \mathbf{u}_2 \equiv \mathbf{y}, \mathbf{u}_3 \equiv \mathbf{z}\}$  (for unification in our further derivations the results obtained in [3, 10–15]). In this general case, any vector of the electric field can be determined by three components [3, 9–13]:

$$E(t) = \mathbf{u}_i E_i(t) = \mathbf{u}_i A_i \cos(\omega t + \psi_i), \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

where  $A_i$  and  $\psi_i$  are the amplitude and phase of the component with number  $i$ ;  $t$  is the current time;  $\omega$  is the angular frequency,  $\omega = 2\pi f$ . The well-known components of the total field, called the sine and the cosine components of the total field are defined as [3, 10–13]

$$S_i = -A_i \sin \psi_i, \quad C_i = A_i \cos \psi_i. \quad (2)$$

These components perform two three-dimensional (3D) vectors, respectively:  $\mathbf{S}(S_1, S_2, S_3)$  and

$\mathbf{C}(C_1, C_2, C_3)$ . In such definitions, we can rewrite (eq:1) as

$$\mathbf{E}(t) = \mathbf{S} \sin \omega t + \mathbf{C} \cos \omega t. \quad (3)$$

The large and the small semi-axis of the ellipse can be determined by the extremes of  $\mathbf{E}(t)$ . In [3, 10–13] it was shown that

$$|\mathbf{E}(t)|^2 = \frac{S^2 + C^2}{2} + \cos(2\omega t) \left[ \frac{C^2 - S^2}{2} + \mathbf{CS} \tan(2\omega t) \right]. \quad (4)$$

The extremes of  $|\mathbf{E}(t)|^2$ , which defines each semi-axis of the ellipse, can be presented as

$$|\mathbf{E}_{\min}|^2 = \frac{S^2 + C^2}{2} - \left[ \left( \frac{C^2 - S^2}{2} \right) + (\mathbf{CS})^2 \right]^{1/2};$$

$$|\mathbf{E}_{\max}|^2 = \frac{S^2 + C^2}{2} + \left[ \left( \frac{C^2 - S^2}{2} \right) + (\mathbf{CS})^2 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Using expression (2) we can relate all six projections of the vectors  $\mathbf{C}$  and  $\mathbf{S}$  with three amplitudes  $A_i$  and three phases  $\psi_i, i = 1, 2, 3$ , of the total field. Unfortunately, in practice, the components of the vectors  $\mathbf{C}$  and  $\mathbf{S}$  cannot be measured directly; they usually relate to the Stocks parameters, which can be easily measured.

We now introduce the polar angles,  $\varphi \in [0, 2\pi]$  and  $\theta \in [0, 2\pi]$ , fixing the position of the normal  $\mathbf{N}$  with respect to coordinate axes:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{N_2}{N_1}; \quad \theta = \tan^{-1} \frac{N_3}{N_1}. \quad (6)$$

Finally, we can obtain the components  $C_i$  and  $S_i$  that allow us to calculate the total intensity of the field:

$$I = \sum_{i=1}^3 A_i^2 = C^2 + S^2. \quad (7)$$

Accounting now for (2) and (7), we get from (5) the following expressions of the semi-axes of the ellipse

$$E_{\max} = \left\{ \frac{I}{2} + \left[ \left( \frac{I}{2} \right)^2 - N^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2};$$

$$E_{\min} = \left\{ \frac{I}{2} - \left[ \left( \frac{I}{2} \right)^2 - N^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}. \quad (8)$$

We also obtain the *elliptical coefficient*, which is equal to the ratio of the small and large semi-axes, that is,

$$R = \frac{2N}{I + \left( I^2 - 4N^2 \right)^{1/2}}. \quad (9)$$

At the same time, in [3, 9–13] it was shown that Stocks coefficients can be usually used for these purposes. Therefore, following [3, 9–13], we present these parameters via the vectors introduced above. The first Stocks' parameter is simply the full field intensity  $I$ , described by (7).

Below, we will present a full field intensity  $I$  via vectors  $\mathbf{C}$  and  $\mathbf{S}$ , or vector  $\mathbf{N}$ , which usually are used in derivations of the depolarized characteristics of the elliptically polarized waves [3, 9–13].

At the same time, as was shown in [3, 9–13], at the close radio traces with shadowing, when the direct wave is absent, we can assume, with a great accuracy, that  $\langle C_i \rangle = \langle S_i \rangle = 0$ ,  $i = 1, 2, 3$ . In this case, the distribution for these six random values can be obtained as follows:

- for a full intensity,  $I = \sum_{i=1}^3 (C_i^2 + S_i^2)$ , as a first Stock's parameter;
- for the intensity of the third component

$$I_3 = C_3^2 + S_3^2 \quad (10)$$

and its phase,  $\psi_3$ .

For convenience, instead of the elliptic parameter  $R$ , we introduce the following parameter

$$\rho = \frac{1 - R^2}{1 + R^2}. \quad (11)$$

The discussion above allows us to state that the differences between the statistical characteristics of the wave,  $\sigma_1^2$  and  $\sigma_2^2$  in the horizontal plane, defined by field components with  $i = 1$  (along the  $x$ -axis) and  $i = 2$  (along the  $y$ -axis), weakly affect distributions of polarized parameters, such as  $R$ ,  $\theta$  and  $\beta$ . Therefore, we can differentiate the vertical direction  $\mathbf{z}$ , defined by  $\sigma_3^2 \equiv \sigma_{\parallel}^2$ , from the horizontal directions, defined by  $\sigma_1^2 \equiv \sigma_{1\perp}^2$  and  $\sigma_2^2 \equiv \sigma_{2\perp}^2$ , which determine the cross-polarized properties in the  $xOy$ -plane.

The relation between the parameter  $p$  and the elliptic coefficient  $R$ , which follows from (11), can be expressed as

$$R = \left( \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^{1/2}. \quad (12)$$

Using information either on the parameter  $p$  from (11) or on the elliptic coefficient  $R$  from (12), the shape and the main parameters of the ellipse can be easily predicted.

### Influence of the Built-Up Terrain Characteristics on Wave Depolarization

The 2D multi-parametric stochastic model, without accounting for the buildings' height profile was presented in [3]. Its 3D generalization, accounting for the influence of the buildings' overlay profile, describe the signal intensity distribution in the space domain was presented in [8, 20–22]. We consider the results obtained in [8, 20–22] and

add the fact that the distribution of the signal field strength in the vertical and horizontal plane are uncorrelated, that is:

$$\langle U_{\parallel}(\mathbf{r}_2) U(\mathbf{r}_2) \rangle = 0. \quad (13)$$

We use definitions of the *rms* of signal intensity depolarization with zero-mean Gaussian PDFs in the vertical plane  $\sigma_{\parallel}^2 = \langle U_{\parallel}(r_1) U_{\parallel}^*(r_2) \rangle = \langle I_{inc} \rangle_{\parallel}$  (called the vertical component) and in the horizontal plane  $\sigma_{\perp}^2 = \langle U_{\perp}(r_1) U_{\perp}^*(r_2) \rangle = \langle I_{inc} \rangle_{\perp}$  (called the horizontal component). After some derivations, following [20–22] we get

$$\sigma_{\parallel}^2 = I_0 \frac{\Gamma \lambda \ell_v}{\lambda^2 + [2\pi \ell_v \gamma_0 F(h_R, h_T)]^2} \frac{(h_T - \bar{h})}{d}; \quad (14)$$

$$\sigma_{\perp}^2 = I_0 \frac{\Gamma}{8\pi} \frac{\lambda \ell_h}{\lambda^2 + [2\pi \ell_h \langle L \rangle \gamma_0]^2}. \quad (15)$$

Here  $I_0$  is the intensity of the transmitted signal;  $\Gamma$  is the absolute value of its deterministic part;  $\ell_v$  and  $\ell_h$  are the correlation scales of the diffuse reflection coefficients in the vertical and horizontal plane, respectively;  $F(h_R, h_T)$  is the profile functions describing building heights distribution along the radio path between Rx (with the height  $h_R$ ) and Tx (with the height  $h_T$ ) in the vertical plane;  $\bar{h}$  is the average buildings' height, and all other parameters are already defined in previous sections  $L \equiv \langle L \rangle$  is the average length of building;  $\gamma_0 = 2LV/\pi$  is the 1D density of the buildings contours,  $V$  is the building density per [in  $\text{km}^2$ ].

By investigating numerous urban overlay profiles, it was shown in [20–22] that the more realistic buildings' profile occur in urban scenarios, where the number of tall buildings is roughly equal to the number of small buildings. In such scenarios, usually occurring in the urban environment, the profile function can be simplified as in [22]. For these built-up scenarios equation (14) can be written as

$$\sigma_{\parallel}^2 = I_0 \frac{\Gamma \lambda \ell_v}{\lambda^2 + [2\pi \ell_v \gamma_0 (\bar{h} - h_R)]^2} \frac{(h_T - \bar{h})}{d}. \quad (16)$$

We will analyze the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 \equiv \sigma_{\perp}^2$  for various densities of buildings, typical for many small towns and large cities. From expressions (14)–(16), this ratio depends mostly on the density of buildings,  $\gamma_0$ , and on the elevations of both terminal antennas,  $h_R$  and  $h_T$ , with respect to the average buildings' height, that is

$$\frac{\sigma_{\parallel}^2}{\sigma_{\perp}^2} = 8\pi \frac{\ell_v}{\ell_h} \frac{1 + \frac{[2\pi \ell_h \gamma_0 \langle L \rangle]^2}{\lambda^2}}{1 + \frac{(2\pi \ell_v \gamma_0 (\bar{h} - h_R))^2}{\lambda^2}} \frac{h_T - \bar{h}}{d}. \quad (17)$$

■ **Table 1.** The model parameters for built-up areas

Area type	$h_R$ , m	$h_T$ , m	$d$ , km	$L$ , m	$l_h, l_v$ , m	$V, \frac{\text{buildings}}{\text{km}^2}$	$\Gamma$
Rural	2–3	20–50	0.5, 1, 2, 5	10–15	1–2	10–20	0.4 (wood)
Mixed Residential	3–5	20–50	0.5, 1, 2, 5	20–40	1–2	30–40	0.7 (stone)
Sub Urban	3–10	15–30	0.2, 0.5, 1, 2	50–60	2–3	50–60	0.7 (glass)
Urban	2–10	40–60	0.2, 0.5, 1, 2	80–100	3–5	70–90	0.8 (steel)

For high buildings density located at the ground surface and a “smooth” building profile in the vertical plane (i.e., when  $(\bar{h} - h_R)$  and  $(h_T - \bar{h})$  are close), for distances beyond 100 m, and for  $(l_v/l_h) \approx 1$ , we get  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2 < 1$ . In this case, the degree of polarization discrimination caused by the multi-ray phenomena in the horizontal plane, that is, by multiple scattering, diffraction and reflection, becomes stronger with respect to that in the vertical plane. Conversely, for the “sharp shaped” building profile and a small buildings density located at the ground surface for similar other conditions, we get that  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2 > 1$ .

Finally, when the character of signal energy due to multipath phenomena becomes “random” and similar both in the horizontal and vertical plane (large city scenario), we get  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2 \approx 1$ . This qualitative analysis allows us now to investigate the parameters of the polarization ellipse of the incident radio wave for various scenarios occurring in the built-up terrestrial environment with different ratios of  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$ .

## Numerical Simulation and Results

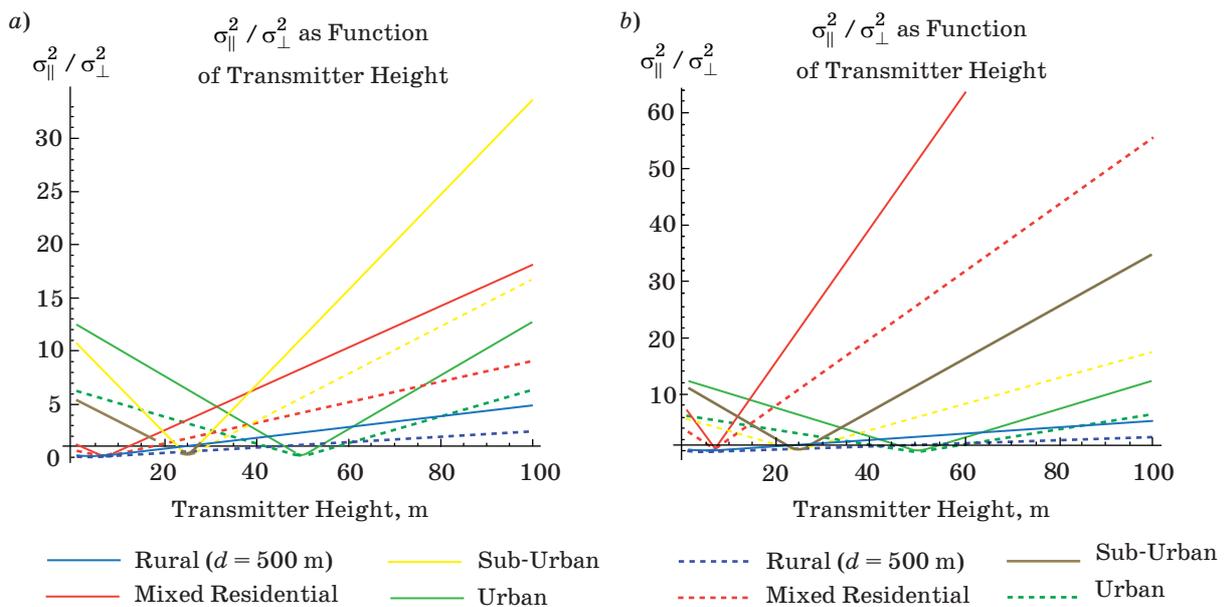
### Areas Selection and their Topographic Features and Parameters

We divided the areas under study into four different types: Rural, Mixed Residential, Sub-Urban, and Urban. This division yields large differences between the various built-up area characteristics. In order to evaluate every area parameter, we used data presented in [19–26, 32] for various rural, mixed residential and urban areas, and finally took the average of each parameter as presented in Tab. 1, estimating the ranges of values of their variations.

### Analysis of the Ratio $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$ of the Polarization Ellipse

*The  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  ratio vs. the BS height*

The following graphs represent the ratio between the vertical component and horizontal component, as a function of the BS height, for distances of 500 m and 1000 m between the Rx and Tx antennas operating with the frequency of 1.8 GHz (Fig. 1, a) and



■ **Fig. 1.** The  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  ratio vs. BS height for the distance of 500 m (solid curves) and 1000 m (dotted curves), with operating frequency of  $f = 1.8$  GHz (a) and  $f = 5.7$  GHz (b)

of 5.7 GHz (Fig. 1, b). The location of the horizontal axis represents the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2 = 1$ , which means that when the ratio is above the horizontal axis, the vertical component is smaller than the horizontal component. The situation when the ratio is below the horizontal axis indicates cases when the vertical component is bigger than the horizontal component.

From Fig. 1, for every type of terrain, the minimal ratio is achieved when the BS antenna is located at the level of the average height of buildings and when the ratio becomes smaller than the unit. In fact, when the BS antenna is located at the level of the average building height, the horizontal and vertical components of the elliptical polarized field are roughly the same. With changes of the BS antenna height (to be less or more than the average height of the buildings' profile), the vertical component is increased, due to a decrease of signal losses caused by the multipath (stochastic) interference, and therefore, the ratio is also increased.

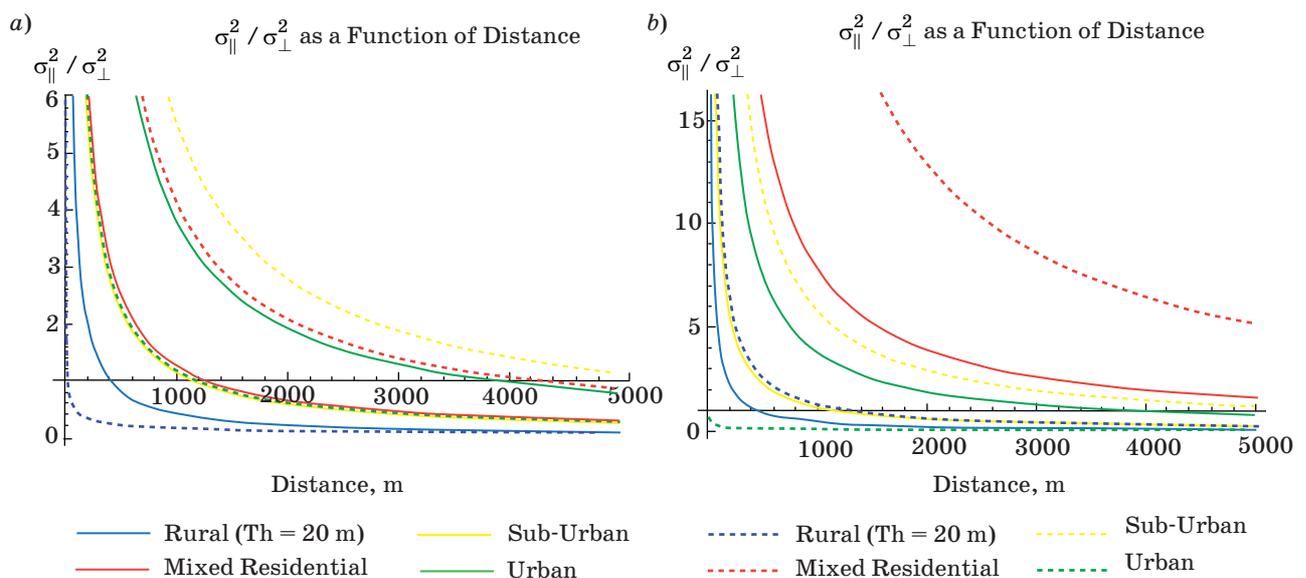
Next, for every type of terrain with an increase in the Tx-Rx distance, the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  decreases due to stronger signal losses in the vertical plane with respect to those in the horizontal plane, and as the result, with increase of Rx-Tx distance the ratio also decreases. Moreover, from the presented illustrations, it is clear that for rural areas the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  is smaller than 1, because in this terrain, the BS height is low enough and due to stronger sporadic interference caused by multipath effects in the horizontal plane with respect to that in the vertical plane. As for the urban areas, it is seen that the ratio becomes larger than unit because the transmitter height is much higher than the average height of surrounding buildings. Here, conversely, the horizontal

component is smaller than the vertical component, and the building density becomes a more significant parameter of the multipath in the vertical plane due to multiple diffraction from buildings roofs in the vertical plane, with respect to multiple scattering from buildings' walls in the horizontal plane.

$\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  vs. the distance between BS and MS antennas

Figure 2 represents the ratio between the vertical and horizontal components as a function of the distance between the BS and MS antennas for the height of the BS equals 20 m and 50 m for frequencies of 1.8 GHz (see Fig. 2, a) and 5.7 GHz (see Fig. 2, b). As before, the location of the horizontal axis represents the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  (that is, equals 1). This means that the vertical component is smaller than the horizontal component, when its value is below this axis, and is bigger, when it is above this axis.

Again, for rural areas, all curves lie along the horizontal axis, that is,  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  is almost always less than 1, which means that the horizontal component is bigger than the vertical component compared with built-up areas, where most of the curves exceeded 1. With the decrease in transmitter height (limiting to the receiver height),  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2 < 1$ . This is evident since the vertical component becomes smaller than the horizontal component, due to much stronger interference in the vertical plane. Moreover, when the transmitter achieves the average height of the building profile, lower line-of-sight condition is observed in the vertical plane causing stronger interference and the corresponding radio signal loss. When the distance between the receiver and transmitter is short, the observed interference becomes weaker



■ Fig. 2. The  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  ratio vs. the distance between BS and MS for the BS antenna height of 20 m (solid curves) and 50 m (dotted curves), the frequency of  $f = 1.8$  GHz (a) and  $f = 5.7$  GHz (b)

resulting in an increase of the vertical component of the elliptically polarized wave, and the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  increases. As the distance between the transmitter and receiver is increased, the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  decreases due to the increase of the sporadic interference phenomena caused by the strong multipath effect in the vertical plane (called the randomization of the vertical component of the elliptically polarized wave).

**Analysis of the Loss Characteristics of the Vertical and Horizontal Components**

We analyze each component of the elliptically polarized radio wave and present below the loss [in dB] for both components separately vs. buildings' density and additionally vs. the distance between Rx and Tx for only vertical component of the field energy. Computations were carried out for each type of the terrain with its specific parameters shown in Tab. 1 and for the operating carrier frequency of the BS of 2.4 GHz.

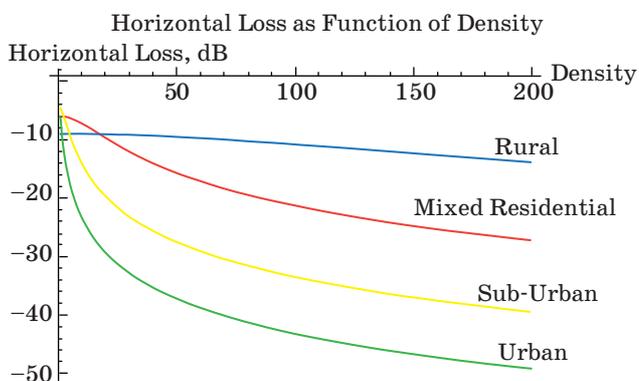
*Horizontal component of the total elliptically polarized field*

Results of computations are shown in Fig. 3. One can see that in rural areas the loss is smaller than in other area types (the difference is roughly ~10 dB) mainly due to signal power loss. In urban areas the depolarization loss increases significantly as long as density of buildings surrounding both terminal antennas, Rx and Tx, increases (averagely on ~40 dB). It is seen that with an increase of buildings' density surrounding the Rx and Tx antennas, the interference loss has tendency to increase drastically due to multipath phenomena occurring in the horizontal plane.

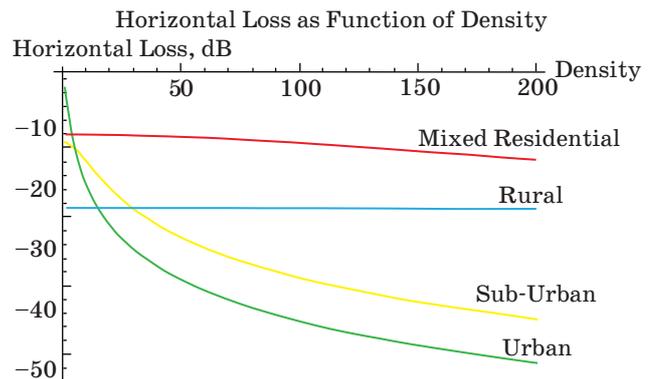
*Vertical component of the total field vs. buildings' density*

The corresponding results of computations are shown in Fig. 4.

It is seen from the presented illustrations that when the distance between the transmitter (BS)



■ Fig. 3. Loss of the horizontal component vs. buildings density for all four typical land environments



■ Fig. 4. Vertical component of the total elliptical wave field vs. buildings density for all four typical land environments

and receiver (MS) increases the loss in the vertical component is apparent. In sub-urban and mixed-residential areas the distance between the transmitter and the receiver may be increased, in order to cover more ground, because the loss is relatively reasonable. On the contrary, in purely urban areas, one cannot increase the distance between the transmitter and the receiver since the loss is significant: in such areas we need to bring the transmitter and the receiver close to each other, in order to decrease signal loss in accordance with area constraints.

**Depolarization Angle as a Function of Transmitter Height**

The angle of depolarization  $\gamma$  can be defined as (usually it is taken to be positive [8–17])

$$\gamma = \left| \sin^{-1} \frac{\sqrt{\sigma_{\parallel}^2}}{\sqrt{\sigma_{total}^2}} \right| = \left| \sin^{-1} \frac{\sqrt{\sigma_{\parallel}^2}}{\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2}} \right|. \quad (18)$$

This parameter, usually called antenna cross-polarization discrimination, plays an important role in determining the propagation channel or the corresponding antenna performance [8].  $\gamma$  determines the corresponding polarization loss factor (PLF), which is used as a figure of merit to measure the degree of polarization mismatch. The PLF is defined through the angle of depolarization as [8]

$$PLF = |\cos \gamma|^2. \quad (19)$$

To investigate the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$ , the angle of depolarization, and PLF, we examined for all four known types using the following two scenarios: a) when the transmitter antenna is higher than the average height of the buildings height and quasi-loss scenario; b) when the transmitter is at the level of the average buildings height.

As it follows from Tab. 2, in urban and sub-urban areas the angle of depolarization increases dramati-

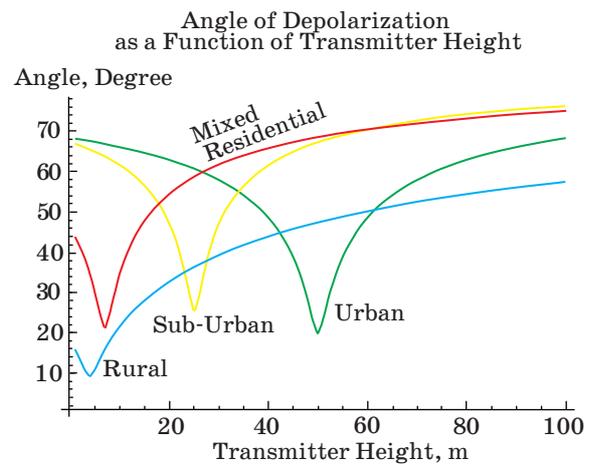
■ **Table 2.** Results for scenarios a and b, with 2.4 GHz frequency

Area	Scenario a $h_t =  \bar{h} - h_r  + h_r$			Scenario b $h_t = \bar{h}$		
	Angle of Depolarization	PLF	$\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$	Angle of Depolarization	PLF	$\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$
Rural	8.7	0.022	0.023	6.1	0.011	0.011
Mixed Residential	33.5	0.304	0.439	16.4	0.079	0.08
Sub-Urban	60.0	0.75	3.05	19.15	0.107	0.12
Urban	70.6	0.889	8.14	18.77	0.103	0.11

cally, as well as the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$  and PLF compared to the rural area, where the parameters of the polarization discrimination are negligible. It is evident that in urban and sub-urban environments, due to multiple diffractions from building roofs and corners, the vertical component of the total field intensity variations  $\sigma_{\perp}^2$ , exceeds the horizontal component  $\sigma_{\parallel}^2$ .

At the same time, the PLF can achieve small values ( $10\log_{10}(PLF) \in [-3, -1]$  dB) in these two area types, since it fully determined by deterministic multi-diffraction processes in the vertical plane, and the effects of random multi-scattering process occurring in the horizontal and vertical planes can be mitigated. As for rural and mixed-residential areas, here the angle of polarization mismatch is relatively small, the PLF can achieve higher magnitudes of  $10\log_{10}(PLF) \in [-16, -19]$  dB and the horizontal component becomes to be prevailed, indicating the importance of the multipath phenomena due to multiple scattering from obstructions located in the horizontal plane.

Results for scenario b, where the transmitter antenna is located at the rooftops level, are also given in Tab. 2. Here we observe the same tendency of an increase in the angle of depolarization, by approaching of sub-urban and urban areas from the rural areas. But this increase in the depolarization angle is too “smooth” compared to the one described above with described above following results shown for scenario a. The corresponding PLF is also relatively smaller compared to the situation described in case a. This also can be explained by the increasing of the role of the horizontal component with respect to the vertical component. This means that in the horizontal plane random processes of multipath become predominant, and the PLF parameter can achieve in urban and suburban environments magnitudes of  $-10$  dB, whereas in mixed residential and rural areas, its magnitude increases drastically achieving even  $-20$  dB, indicating role of random multi-path processes, such as multiple scattering from obstructions, in total wave field depolarization. Simultaneously, a decrease in angle of angle depolarization was accompanied by the increase of the ratio  $\sigma_{\parallel}^2 / \sigma_{\perp}^2$ , and decrease in the PLF [being negative in dB].



■ **Fig. 5.** The angle of depolarization vs. the height of the transmitter for four typical land built-up scenarios

Figure 5 shows the angle of depolarization as a function of transmitter height for a distance of 1000 m for the carrier frequency of 2.4 GHz. The illustrated graphs for all four studied built-up areas, parameters of which are introduced in Tab. 1, show the same tendency as the previous figures, that is, when transmitter height in closer to the level of the average building’s height, the angle of depolarization limits to its minimal value. With the increase in the transmitter height with respect to the buildings roofs, defined by the average height  $\bar{h}$ , the angle of depolarization increases significantly.

Moreover, the corresponding interference picture (e.g., oscillations of the field intensity with height) is clearly seen from Fig. 5 approaching the environment, from rural and mixed residential (without oscillations) to sub-urban and urban (with essential oscillations).

### Summary and Conclusions

In order to predict the influence of depolarization on propagation of the elliptically-polarized radio wave, it is necessary to obtain information on the main characteristics and parameters of the terrain.

In fact, each of the discussed terrain types acts like a communication channel that “reacts” differently on the input propagation parameters, that is, on the propagation environment within each channel: urban, sub-urban, mixed-residential and rural.

The channel “reaction” depends on different terrain factors: antenna location and elevation with respect to buildings’ heights, obstructions’ characteristics (e.g., the permittivity of the material – stone, wood, steel, glass, etc.), buildings’ density, distance between the transmitter and the receiver, degree of roughness of the walls, buildings width or length, terrain topography, and so on.

The formulas that describe the intensity distribution of the elliptically-polarized radio wave inside the ellipse, which until recently were not presented in the literature, were derived based on main formulas of signal intensity distribution in space domain based on the multi-parametric stochastic theoretical framework that describes radio propagation in various terrain environments.

The simple “engineering” formulas for radio wave intensity deviations in the vertical and horizontal planes of the ellipse, the corresponding angle of depolarization as function of its vertical and horizontal components, and the PLF were derived based on the proposed stochastic approach.

The corresponding 3D numerical code was performed for analysis of the corresponding formulas for various terrain scenarios, urban, sub-urban, mixed-residential, and rural, depending on the built-up terrain features.

Depolarization effects and polarization losses were analyzed for four types of environment: rural, mixed-residential, sub-urban, and urban.

The obtained results allow us to state additionally that:

1. In rural and mixed residential areas the vertical component of the elliptically polarized radio wave is not changed significantly (e.g., has small depolarization loss), and the angle of depolarization is too small with respect to that obtained in urban and sub-urban areas. This allows us to suggest the

increase of the range between transmitting (Tx) and receiving (Rx) antenna in such areas.

2. In urban and sub-urban areas the wave intensity loss is significant both in the vertical and the horizontal planes of the elliptically-polarized wave, caused by the random interference of its multipath components due to multi-scattering, multi-diffraction and multi-reflection phenomena from obstructions surrounding both terminal antennas.

3. As expected, the angle of depolarization is larger for urban channels with the corresponding increase of the PLF. This effect strongly depends on the height of the transmitter antenna (receiver antenna was always lower than buildings’ roofs) with respect to average buildings’ height. Thus, the angle of depolarization decreases with decrease of transmitter antenna height, and vice versa — with increase of transmitter antenna height.

4. The ratio between vertical and horizontal components of the elliptically-polarized wave increases with transfer of the channel from rural to urban scenarios. This means that the effect of depolarization becomes more significant in the more dense built-up environments.

5. Increase of depolarization of the even elliptically-polarized radio wave, passing through the sub-urban and urban channels, yields the increase the randomization of the wave intensity both in the vertical and horizontal plane leading to changes in shape of the ellipse and its rotation in a large angle (see Tab. 2).

6. Additionally, increase of depolarization loss and the angle of depolarization yield the decrease of signal power and require additional signal amplification at the receiver.

7. Knowledge of the “reaction” of each individual channel (urban, sub-urban, mixed-residential and rural) on signal depolarization allows to give for each designer of wireless communication links a powerful tool for predicting a priori the influence of the built-up channel “response” on the depolarization phenomena accounting for each specific scenario occurring at the built-up scene.

## References

1. Stutzman W. L., and G. A. Thiele. *Antenna Theory and Design*. New York, John Wiley & Sons, 1981. 598 p.
2. Kraus J. D. *Antennas*. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1988. 892 p.
3. Ponamarev G. A., Kulikov A. N., and Tel'pukhovskiy E. D. *Propagation of Ultra-Short Waves in Urban Environments*. Tomsk, Rasko Publ., 1991. 222 p. (In Russian).
4. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, 1997. 941 p.
5. Drabowitch S., Papiernik A., Griffiths H., Encinas J., and Smith B. L. *Modern Antennas*. London, Chapman & Hall, 1998. 611 p.
6. Kraus J. D., and Marhefka R. *Antennas*. New York, McGraw-Hill, 2001. 547 p.
7. Chryssomallis C., and Christodoulou Ch. *Antenna Radiation Patterns*. In: *John and Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 2001, ch. 3, pp. 164–175.
8. Blaunstein N., and Christodoulou C. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. New Jersey, Wiley and Sons-InterScience, 2008. 614 p.

9. **Morgan M., and Evans V.** Synthesis and Analysis of Polarized Ellipses. In: *Antennas of Elliptic Polarization*. New York, John Wiley & Sons, 1961. 385 p.
10. **Kanare'kin D. B., Pavlov N. F., and Potekhin V. A.** *Polarization of Radiolocation Signals*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966. 440 p. (In Russian).
11. **Gusev K. G., Filatov A. D., and Sopolev A. P.** *Polarization Modulation*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 286 p. (In Russian).
12. **Lee W. C., and Brandt R. H.** The Elevation Angle of Mobile Radio Signal Arrival. *IEEE Trans. Commun.* 1973, vol. 21, no. 11, pp. 1194–1197.
13. **Bitler Y. S.** A Two-Channel Vertically Spaced UHF Diversity Antenna System. *Proc. of Microwave Mobile Radio Symp.*, Colorado, 1973, pp. 13–15.
14. **Kozono S., Tsuruhara T., and Sakamoto M.** Base Station Polarization Diversity Reception for Mobile Radio. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1984, vol. 33, no. 4, pp. 301–306.
15. **Vaughan R. G., and Andersen J. B.** Antenna Diversity in Mobile Communications. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1987, vol. 36, no. 4, pp. 149–172.
16. **Vaughan R. G.** Polarization Diversity in Mobile Communications. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1990, vol. 39, no. 3, pp. 177–186.
17. **Lemieux J-F., El-Tanany M. S., and Hafez H. M.** Experimental Evaluation of Space/Frequency/Polarization Diversity in the indoor Wireless Channel. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1991, vol. 40, no. 3, pp. 189–198.
18. **Turkmani A. M. D., Arowojolu A. A., Jefford P. A., and Kellett C. J.** An Experimental Evaluation of the Performance of Two-Branch Space and Polarization Diversity Schemes at 1800 MHz. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1995, vol. 44, no. 2, pp. 318–326.
19. **Bertoni H. L.** *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. New Jersey, Prentice Hall PTR, Inc., 2000. 258 p.
20. **Blaunstein N.** Prediction of Cellular Characteristics for Various Urban Environments. *IEEE Antennas and Propagat. Magazine*, 1999, vol. 41, no. 6, pp. 135–145.
21. **Blaunstein N., Giladi R., Levin M.** Unified Approach to Predict of Loss Characteristics in the Urban Microcellular Environments with Rectangular Grid-plan Streets. *Radio Science*, vol. 34, no. 5, 1999, pp. 1085–1102.
22. **Blaunstein N., Censor D., Katz D., Freedman A., and Matityahu I.** Radio Propagation in Rural Residential Areas with Vegetation. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 2002, vol. 17, no. 7, pp. 1039–1041.
23. **Blaunstein N.** Distribution of Angle-of-Arrival and Delay from Array of Buildings Placed on Rough Terrain for Various Elevations of Base Station Antenna. *Journal of Communications and Networks*, 2000, vol. 2, no. 4, pp. 305–316.
24. **Blaunstein N., Katz D., Censor D., Freedman A., Matityahu I., and Gur-Arie I.** Prediction of Loss Characteristics in Built-up Areas with Various Buildings Overlay Profiles. *IEEE Anten. Propagat. Magazine*, 2001, vol. 43, no. 6, pp. 181–191.
25. **Blaunstein N., Toulch M., Bonek E., Christodoulou Ch., et al.** Azimuth, Elevation and Time Delay Distribution in Urban Wireless Communication Channels. *Journal of Antennas and Propagation Magazine*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 112–126.
26. **Blaunstein N., Toulch M., Laurila J., Bonek E., et al.** Signal Power Distribution in the Azimuth, elevation and Time Delay Domains in Urban Environments for Various Elevations of Base Station Antenna. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2006, vol. 54, no. 10, pp. 2902–2916.
27. **Lempianen J., Laiho-Steffens J. K., and Walker A. F.** Experimental Results of Cross Polarization Discrimination and Signal Correlation Values for a Polarization Diversity Scheme. *Proc. of 47th IEEE Vehicular Technology Conf.*, 1997, pp. 1498–1502.
28. **El-Sallabi H. M., and Tervonen J.** Polarization Dependence of Multipath Propagation Characteristics in Line of Sight Microcellular Channels. *Proc. of 12th Int. Conf. on Wireless Communication (Wireless 2000)*, Canada.
29. **El-Sallabi H. M.** Polarization Consideration in Characterizing Radio Wave Propagation in Urban Microcellular Channels. *Proc. of 51st Vehicular Technology Conf.*, Greece, 2001, pp. 411–415.
30. **Shapira J., and Miller S.** A Novel Polarization Smart Antenna. *Proc. of 51st Vehicular Technology Conf.*, Greece, 2001, pp. 253–257.
31. **Shapira J., and Miller S.** Transmission Considerations and Polarization Smart Antennas. *Proc. of 51st Vehicular Technology Conf.*, Greece, 2001, pp. 258–262.
32. **Bertoni H. L., and Walfisch J.** A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environment. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1988, vol. 36, no. 12, pp. 1788–1796.

УДК 621.38

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.77

## МЕТОД ТЕСТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г. С. Бритов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** разработка метода тестового диагностирования линейных динамических систем, отличающегося от известных методов, основанных на использовании специальных тестовых воздействий, тем, что применяются математические модели скалярной динамической системы в виде передаточных функций и определенных структур связи ее звеньев. **Методы:** использована теория линейных систем управления, позволившая понятным и удобным образом описать процесс тестового диагностирования. **Результаты:** разработан метод тестового диагностирования линейных динамических систем, для которых известны передаточные функции их звеньев и структуры связей этих звеньев между собой. Суть метода в том, что с помощью предложенных диагностических моделей линейной скалярной системы строится процедура тестового диагностирования, основанная на дихотомическом поиске дефекта. Благодаря этой процедуре можно не только обнаружить дефект, но и локализовать то звено системы, где он возник. Процедура тестового диагностирования позволила построить тестеры двух типов — параллельного и последовательного, что связано со способом реализации тестера: при программной реализации тестера использована последовательная, а при моделировании в Simulink — параллельная структура. **Практическая значимость:** по разработанному методу быстро и достаточно просто можно провести тестовое диагностирование скалярной линейной системы управления, указав место появившегося дефекта. В статье это сделано для двух систем третьего порядка.

**Ключевые слова** — линейная скалярная система, передаточная функция звена системы, диагностическая модель системы, диагностический признак, диагностическая процедура, тестер, одиночный дефект.

### Введение

Задача тестового контроля динамических систем важна для многих приложений — теории электрических цепей, радиотехники, теории автоматического управления, робототехники и др. В статье рассматривается метод тестового диагностирования линейных динамических систем, основанный на использовании математической модели системы.

Различные методы тестового диагностирования описаны в работах [1–13]. При всем их разнообразии в них можно выделить генератор тестовых воздействий, подаваемых на проверяемый объект, и устройство анализа реакции объекта на эти воздействия. В ряде методов используются простые генераторы, но сложные анализаторы, в других методах, наоборот стараются упростить процедуру анализа за счет усложнения входных сигналов. К методам первой группы относятся, например, контроль по параметрам импульсной весовой и переходной функций системы (входные сигналы — импульс или единичный скачок), а также контроль по частотным характеристикам (гармоническим входным сигналам).

Примерами методов второй группы могут служить метод комплементарного сигнала [4, 5, 12], в котором амплитуды импульсов входной тестовой последовательности зависят от собственных чисел проверяемого объекта; контроль в нулевом режиме, когда входные сигналы подаются на ча-

стоте передаточных нулей систем [10]; контроль по ганкелевым сингулярным числам [8] и др.

В работах [1, 8, 9] была поставлена и решена задача минимизации общей сложности тестирующего устройства, включающего генератор входных воздействий и анализатор реакций. При этом в качестве критерия сложности использовалась размерность тестирующего устройства (тестера), т. е. общий порядок описывающей его системы дифференциальных уравнений. Процедура синтеза тестера минимальной размерности, используемая в указанных работах, основывалась на концепции (A,B)-инвариантных подпространств [14] и требовала достаточно сложных матричных вычислений.

В работе [15] предлагается иной путь решения той же задачи, не требующий привлечения теории (A,B)-инвариантности. Он опирается на принцип дуальности функционального и тестового диагностирования [8], который аналогичен принципу дуальности свойств управляемости и наблюдаемости, используемому в классической теории управления.

В соответствии с ним задача синтеза тестера минимальной размерности для данной системы управления сводится к задаче синтеза устройства функционального диагностирования минимальной размерности для дуальной системы. Эта задача решается известными методами [8, 13], после чего выполняется обратный дуальный переход, дающий решение исходной задачи.

Преимуществом такого подхода является упрощение процедуры синтеза тестера за счет использования известных алгоритмов синтеза устройства функционального диагностирования. Подобным образом в теории управления анализ управляемости исходной системы нередко заменяют анализом наблюдаемости дуальной системы.

В последнее время появился новый термин — «структурное диагностирование» [17]. Применение метода структурного диагностирования для управляемых динамических систем требует знания передаточной функции (ПФ) системы.

В настоящей статье рассматриваются скалярные линейные системы, как и при структурном диагностировании описываемые с помощью ПФ:

$$y(p) = W(p) \cdot u(p), \quad (1)$$

где  $u(p)$ ,  $y(p)$  — изображения преобразования Лапласа входов и выходов системы;  $W(p)$  — ее ПФ.

Дефекты, возникающие в системе, приводят к нарушению правильного выхода, определенно уравнением (1). Ограничимся только параметрическими дефектами, которые изменяют коэффициенты ПФ.

Предлагается метод тестового диагностирования линейной динамической системы, который основан на использовании указанной ПФ и возможности получить доступ к выходам звеньев системы, ПФ которых известны.

Необходимо формировать тестовый сигнал  $u_T(t)$  и эталонную реакцию на него  $y_T(t)$ , чтобы при отсутствии дефектов в тестовом режиме выполнялось равенство  $y(t) = y_T(t)$ . При этом получается диагностический признак  $\Delta(t) = y(t) - y_T(t)$ , который должен быть равен нулю.

### Диагностические модели системы

Для решения поставленной задачи нужно построить диагностическую модель линейной динамической системы, описываемой выражением (1). Прежде всего, следует представить систему в виде звеньев с известными ПФ.

Построим первую диагностическую модель. Она представляет собой совокупность динамических звеньев, которые должны быть соединены последовательно, и их выходы должны быть доступны для измерения. Если число звеньев  $n$ , а их ПФ есть  $W_i(p)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , то выражение (1) принимает вид

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p). \quad (2)$$

Дефекты могут возникать в каждом звене системы. Они изменяют коэффициенты ПФ звена. Полагаем, что в момент диагностирования может быть нарушена работа только одного звена,

т. е. дефект является однократным. В результате выходы звеньев, следующих за дефектным звеном, будут неправильными. Например, при дефекте в первом звене будут неправильными все выходы:

$$\begin{aligned} y_1^*(p) &= W_1^*(p) \cdot u(p); \\ y_2^*(p) &= W_1^*(p) \cdot W_2(p) \cdot u(p); \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $y_i$  и  $u$  — выходы звеньев и вход системы. При дефекте в последнем звене неправильным будет только его выход.

Вторую диагностическую модель построим, предполагая, что последовательность рассмотренных раньше звеньев охвачена отрицательной обратной связью. Появление дефекта в любом звене приводит к неправильности всех выходов звеньев. Например, при дефекте в последнем звене будут неправильными все выходы:

$$\begin{aligned} y_1^*(p) &= \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_n^*(p)} u(p); \\ y_2^*(p) &= \frac{W_1 \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_n^*(p)} u(p); \\ &\dots \\ y_n^*(p) &= \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot \dots \cdot W_{n-1} \cdot W_n^*(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_n^*(p)} u(p). \end{aligned} \quad (4)$$

Для того чтобы полученное выражение было аналогично выражению (3), необходимо при диагностировании учесть одинаковый знаменатель ПФ звеньев. Тогда вновь можно будет говорить об однократности дефекта.

Третья диагностическая модель соответствует системе подчиненного регулирования [16]. Схема системы представляет собой совокупность вложенных контуров. Каждый контур можно представить второй диагностической моделью. Схема двухконтурной системы, состоящей из четырех звеньев, показана на рис. 1.

Передаточные функции системы:

$$\begin{aligned} W_{c1}(p) &= \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)}; \quad W_{c2} = \frac{W_1(p) \cdot W_{c1}(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_{c1}(p) \cdot W_3(p)}; \\ W(p) &= W_{c2}(p) \cdot W_4(p). \end{aligned}$$

Очевидно, как и во второй диагностической модели, в третьей диагностической модели одиночный дефект в любом звене приводит к неправиль-

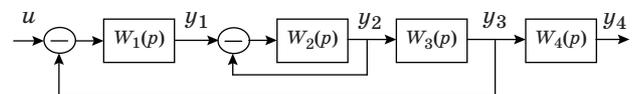


Рис. 1. Схема двухконтурной системы регулирования



■ Рис. 2. Схема системы тестового диагностирования

ности всех выходов звеньев. Но требуемая доступность всех выходов дает возможность учесть этот недостаток и по-прежнему считать дефект однократным.

Доступные выходы звеньев задаются следующими выражениями:

$$\begin{cases} y_1(p) = W_1(p) \cdot u(p) - y_3(p) \\ y_2(p) = W_{c1}(p) \cdot y_1(p) \\ y_3(p) = W_3(p) \cdot y_2(p) \\ y_4(p) = W_4(p) \cdot y_3(p) \end{cases} \quad (5)$$

Однократность дефекта позволяет поставить задачу определения наличия дефекта и номера отказавшего звена. Для ее решения может быть построен тестер, на выходе которого формируется выходной сигнал  $y_T(t)$ . С его помощью строится требуемый диагностический признак  $\Delta(t) = y - y_T$  (рис. 2).

Генератор тестового сигнала подает сигнал на линейную динамическую систему и на тестер. Выходные сигналы системы и тестера формируют диагностический признак, который затем поступает на анализатор для решения задачи локализации дефекта с точностью до звена системы.

Тестер должен представлять собой динамическую систему, описываемую ПФ:

$$y_T = W_T(p)u_T. \quad (6)$$

В качестве тестера можно выбрать модель системы, т. е.  $W_T(p) = W(p)$ . Тогда обнаружение дефекта в анализаторе осуществляется сравнением диагностического признака  $\Delta$  с допустимым значением, определяемым погрешностями в системе.

Для локализации дефекта следует использовать доступность выходов звеньев системы для измерения. В тестере должны быть реализованы специальные, тестовые ПФ, в которых последовательно исключаются ПФ звеньев. Следует иметь в виду, что при модели с обратной связью необходимо учесть одинаковый знаменатель ПФ звеньев, а при использовании третьей диагностической модели — доступность выходов всех звеньев. Рассмотрим процедуру тестового диагностирования.

### Процедура тестового диагностирования

Предлагаемая процедура тестового диагностирования основана на дихотомическом поиске. Она наиболее эффективна при числе звеньев в диагностической модели системы  $n = 2^k$ ,  $k = 1,$

2, ... . Рассмотрим случай  $k = 2$ , полагая, что этим числом звеньев тестирование системы можно ограничить. Тогда процедура тестового диагностирования будет иметь следующий вид.

**Шаг 1.** Применить схему, показанную на рис. 2, при  $W_T(p) = W(p)$ . Диагностический признак  $\Delta_{1234} = y_4 - y_{T4}$  подать в анализатор. При использовании диагностической модели системы подчиненного регулирования этот шаг выполняется иначе. Передаточная функция тестера задается в виде  $W_T(p) = W_1(p)$ . Диагностический признак при этом будет следующим:  $\delta_1 = y_1 - y_{T1}$ . Требуемый диагностический признак  $\Delta_{1234}$  вычисляется как сумма аналогичных диагностических признаков дальнейших шагов:  $\Delta_{1234} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$ . Если значение такого диагностического признака находится в допуске, то процедуру диагностирования завершить сообщением об отсутствии дефекта. В противном случае процедуру продолжить.

**Шаг 2.** Применить схему, показанную на рис. 2:

— для последовательной диагностической модели с ПФ  $W_T(p) = W_1(p) \cdot W_2(p)$ ;

— при использовании диагностической модели с обратной связью на вход тестера с ПФ  $W_T(p) = W_1(p) \cdot W_2(p)$  должна быть подана разность  $u - y_4$  для учета одинакового знаменателя ПФ звеньев:

$$\begin{aligned} y_{62}(p) &= W_6(p) \cdot (u(p) - y_4(p)) = \\ &= \frac{W_1(p) \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)} u(p); \end{aligned}$$

— для диагностической модели системы подчиненного регулирования на вход тестера с ПФ  $W_T(p) = W_{c1}(p)$ , согласно выражениям (5), должна быть подана разность  $u - y_3$ .

Диагностический признак, обозначенный как  $\Delta_{12} = y_2 - y_{T2}$ , подать в анализатор. Особо следует отметить случай использования диагностической модели системы подчиненного регулирования. Здесь сначала получается диагностический признак  $\delta_2 = y_2 - y_{T2}$ , а затем уже рассчитывается диагностический признак  $\Delta_{12} = \delta_1 + \delta_2$ . Если значение этого диагностического признака находится в допуске, то перейти к шагу 3. В противном случае — к шагу 4.

**Шаг 3.** Выполнить действия шага 2:

— для последовательной диагностической модели с ПФ  $W_T(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$ ;

— при использовании диагностической модели с обратной связью на вход тестера с ПФ  $W_T(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)$  должна быть подана разность  $u - y_4$  для учета одинакового знаменателя ПФ звеньев:

$$\begin{aligned} y_{03}(p) &= W_6(p)(u(p) - y_4(p)) = \\ &= \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)} u(p); \end{aligned}$$

— для диагностической модели системы подчиненного регулирования на вход тестера с ПФ  $W_T(p) = W_3(p)$ , согласно выражениям (5), должен быть подан сигнал  $y_2$ .

Диагностический признак, обозначенный как  $\Delta_{123} = y_3 - y_{T3}$ , подать в анализатор. При использовании диагностической модели системы подчиненного регулирования требуемый диагностический признак  $\Delta_{123}$  получается сложением диагностического признака  $\delta_3 = y_3 - y_{T3}$  с диагностическим признаком  $\Delta_{12}$  из шага 2. Если значение диагностического признака  $\Delta_{123}$  находится в допуске, то процедура диагностирования заканчивается сообщением о дефекте в 4-м звене. В противном случае — в 3-м звене.

**Шаг 4.** Выполнить действия шага 2:

— для последовательной диагностической модели с ПФ  $W_T(p) = W_1(p)$ ;

— при использовании диагностической модели с обратной связью на вход тестера с ПФ  $W_T(p) = W_1(p)$  должна быть подана разность  $u - y_4$  для учета одинакового знаменателя ПФ звеньев:

$$y_{01}(p) = W_0(p)(u(p) - y_4(p)) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)} u(p);$$

— для диагностической модели системы подчиненного регулирования на вход тестера с ПФ  $W_T(p) = W_4(p)$ , согласно выражениям (5), должен быть подан сигнал  $y_3$ .

Диагностический признак, обозначенный как  $\Delta_1$ , подать в анализатор. При использовании диагностической модели системы подчиненного регулирования требуемый диагностический признак  $\Delta_1$  получается как диагностический признак  $\delta_4 = y_4 - y_{T4}$ . Если значение диагностического признака  $\Delta_1$  находится в допуске, то процедура диагностирования заканчивается сообщением

о дефекте во 2-м звене. В противном случае — в 1-м звене.

Из схемы алгоритма процедуры тестового диагностирования (рис. 3) следует, что одна проверка потребуется при отсутствии дефектов и три проверки — в остальных случаях.

### Синтез тестера

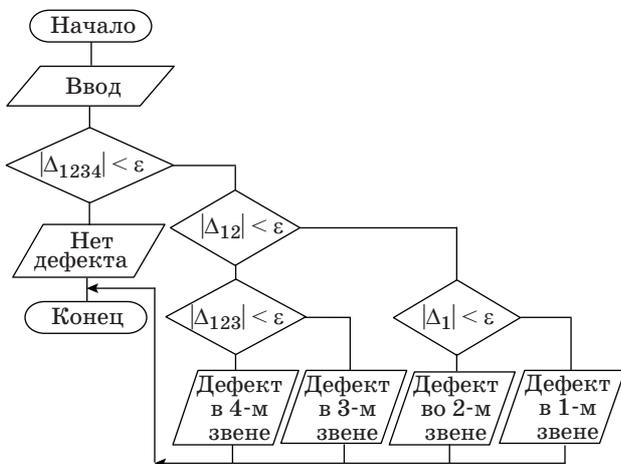
Структура тестера может быть организована в двух вариантах: параллельная (рис. 4, а) и последовательная (рис. 4, б) реализация частичных ПФ.

На рис. 4 приведены структуры тестера для первой диагностической модели. Аналогичным образом выглядят структуры тестера для второй и третьей диагностических моделей с учетом особенностей, описанных в процедуре диагностирования.

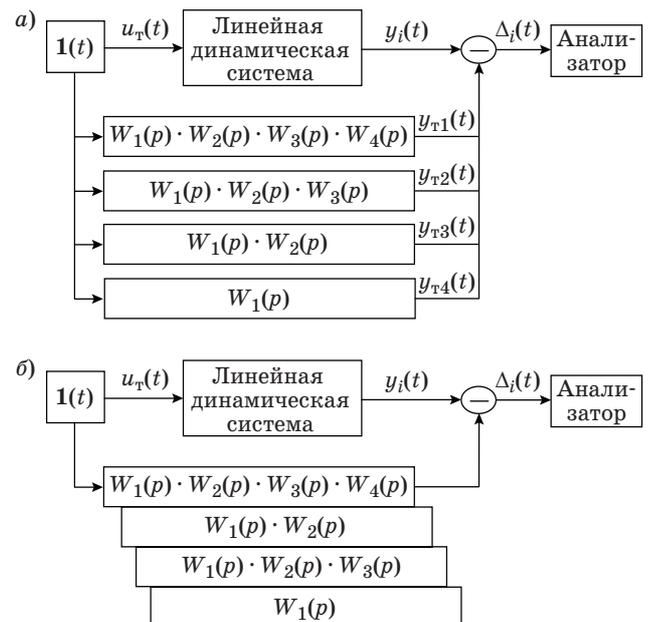
При параллельном варианте на анализатор поступают сразу все диагностические признаки. Осуществляются проверки в соответствии с алгоритмом, показанным на рис. 3. Для каждой проверки используется выход соответствующего звена  $y_i(t)$ . Из процедуры диагностирования следует, что параллельный вариант тестера должен быть использован в диагностической модели системы подчиненного регулирования.

При последовательном варианте диагностические признаки создаются по порядку, предписанному алгоритмом, и поступают затем на анализатор.

Очевидно, что последовательная структура более экономична, чем параллельная. Если исполь-



■ Рис. 3. Схема алгоритма процедуры тестового диагностирования



■ Рис. 4. Параллельная (а) и последовательная (б) структура тестера

зуется диагностическая модель с обратной связью, то на входы моделей частичных ПФ должен подаваться сигнал  $u_r(t) = 1(t) - y_4(t)$ , а при использовании диагностической модели системы подчиненного регулирования на входы моделей частичных ПФ должны подаваться сигналы, описанные в процедуре диагностирования.

### Программная реализация и результаты моделирования

Предложенная процедура синтеза тестера использует только операции с линейными звеньями динамической системы. Поэтому ее компьютерная реализация не вызывает затруднений. Написана и отлажена программа сценария на языке пакета MatLab для выполнения всех этапов процедуры синтеза и моделирования тестера.

Сценарий состоит из трех блоков: ввод данных; расчеты; вывод результатов.

При вводе задаются следующие объекты расчета и моделирования:

- число звеньев в диагностической модели;
- числители их ПФ;
- знаменатели их ПФ;
- величина ошибки;
- номер ошибочного звена.

Результаты получаются в виде графика диагностического признака и сообщения о номере ошибочного звена.

Результаты работы программы для последовательной диагностической модели приведены ниже.

**Вариант 1.** В диагностической модели системы 3-го звена первого порядка

```
>> tstdg1           Конец
Вводим:           >> Ошибка = 0.1
Число звеньев = 3 >> Номер звена = 1
Num = [1]         Считаем:
Den = [1 1]      Конец счета
Num = [2]        Смотрим:
Den = [2 1]     Дефект в 1-м звене
Num = [1]       Конец просмотра
Den = [1 2]    Конец
Ошибка = 0     >> Номер звена = 3
Номер звена = 1 Считаем:
Конец ввода    Конец счета
Считаем:      Смотрим:
Конец счета   Дефект в 3-м звене
Смотрим:     Конец просмотра
Дефект в 0-м звене Конец
Конец просмотра
```

**Вариант 2.** В диагностической модели системы 4-го звена первого порядка

```
>> tstdg1           Число звеньев = 4
Вводим:           Num = [1]
Den = [1 1]       Смотрим:
Num = [2]         Дефект во 2-м звене
```

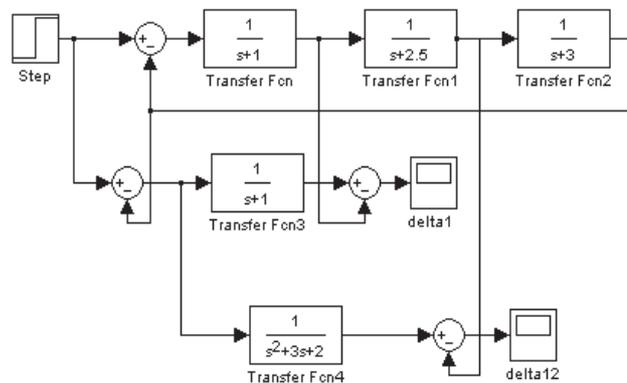
```
Den = [2 1]       Конец просмотра
Num = [1]         Конец
Den = [1 2]      >> Номер звена = 3
Num = [2]        Считаем:
Den = [1 1]     Конец счета
Ошибка = 0.1    Смотрим:
Номер звена = 2 Дефект в 3-м звене
Конец ввода    Конец просмотра
Считаем:       Конец
Конец счета    >>
```

Хорошо видно, что в обоих вариантах номер дефектного звена, который устанавливается в блоке ввода, указан затем в блоке вывода результатов.

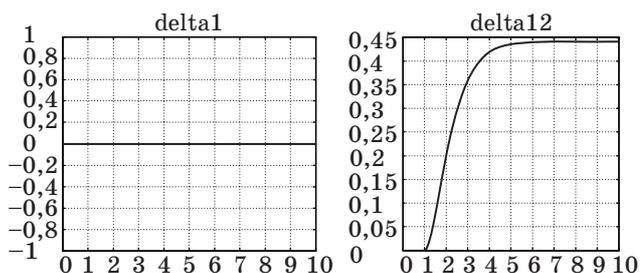
Иллюстрацию работы с диагностической моделью обратной связью удобно выполнить в Simulink (рис. 5).

Объектом диагностирования была система, в которой три звена первого порядка охвачены отрицательной обратной связью. Входной, тестовый сигнал при моделировании представлял собой единичный скачок, начинающийся на первой секунде.

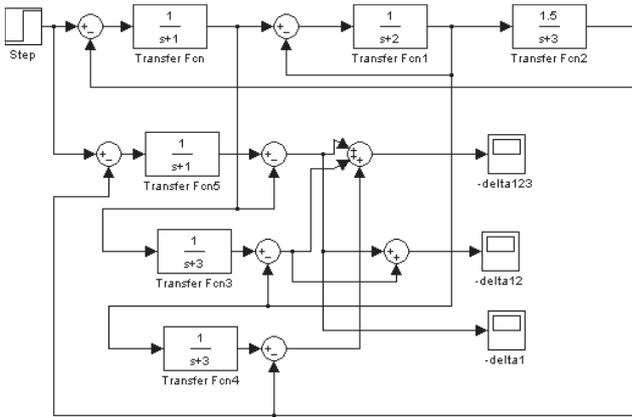
На рис. 6 приведены результаты тестирования системы с отрицательной обратной связью при наличии дефекта во втором звене системы. Дефект приводит к уменьшению на 20 % стационарного коэффициента передачи второго звена.



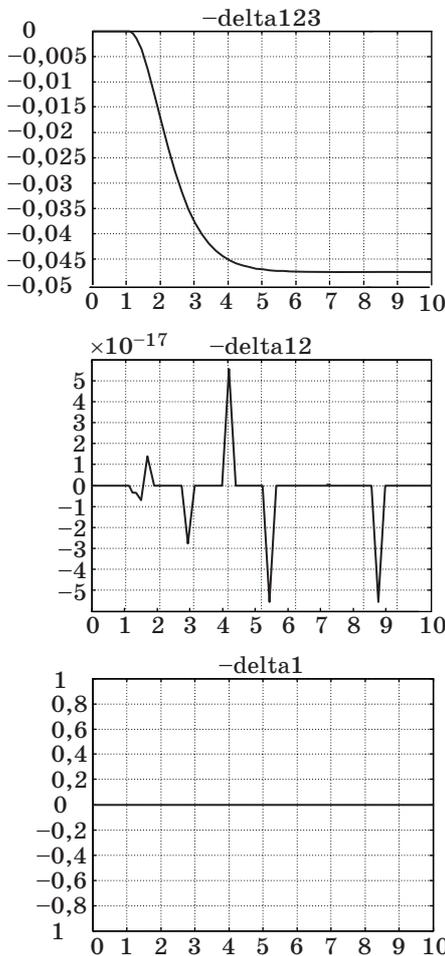
■ Рис. 5. Схема моделирования тестового диагностирования трех звеньев первого порядка, охваченных отрицательной обратной связью



■ Рис. 6. Результаты моделирования дефекта в системе с обратной связью



■ **Рис. 7.** Схема моделирования тестового диагностирования трех звеньев первого порядка, охваченных двумя отрицательными обратными связями



■ **Рис. 8.** Результаты моделирования дефекта в системе с двумя обратными связями

Первый диагностический признак *delta1* остается практически нулевыми, а второй — *delta12* — достигает значения 0,45, что говорит о дефекте во втором звене. При дефекте в первом

звене оба диагностических признака, *delta1* и *delta12*, отличны от нуля.

Иллюстрация работы с диагностической моделью системы подчиненного регулирования приведена на рис. 7 в виде схемы моделирования в Simulink.

Объектом диагностирования была двухконтурная система подчиненного регулирования. Три звена первого порядка системы охвачены соответствующими обратными связями. Входной, тестовый сигнал такой же, как и в предыдущей схеме моделирования.

На рис. 8 приведены результаты тестирования системы с дефектом в третьем звене системы, приводящим к увеличению стационарного коэффициента передачи третьего звена на 50 %.

Второй и третий диагностические признаки *delta12*, *delta1* остаются практически нулевыми, а первый — *delta123* — достигает значения  $-0,05$ , что говорит о дефекте в третьем звене. Промоделирован дефект, приводящий к увеличению стационарного коэффициента передачи третьего звена на 50 %.

### Заключение

Изложен подход к организации тестового контроля линейных динамических систем, основанный на использовании диагностической модели системы. Показано, что для рассматриваемых линейных динамических систем с известными ПФ звеньев и определенной структурой связей может быть построена тестовая система с рассчитанными ПФ тестеров. Тогда предлагаемая процедура тестового диагностирования не только обнаруживает появление однократного дефекта, но и указывает номер отказавшего звена. Результаты компьютерного моделирования показывают эффективность такого контроля по отношению к однократным параметрическим дефектам звеньев системы.

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-08-00327 и 14-08-00399.

### Литература

1. Мироновский Л. А. Тестовый контроль линейных систем управления // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2005. № 5. С. 3–8.
2. Kadim H. J. Minimal Transient Modes for Faults Detection in Analogue VLSI Circuits // Radioelectronics & Informatics. 2003. N 3. P. 82–86.
3. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Синтез оптимальных тестовых сигналов как решение обобщенной задачи Булгакова // Автоматика и Телемеханика. 2002. № 4. С. 55–66.

4. Мироновский Л. А. Диагностирование линейных систем методом комплементарного сигнала // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 5. С. 52–57.
5. Мироновский Л. А. Диагностирование систем управления методом аннулирующего сигнала // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2001. № 5. С. 3–7.
6. Abdeerrahman A., Cerny E. Worst Tolerance Analysis and CLP-based Multifrequency Test Generation for Analogue Circuits // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. 1999. Vol. 18. P. 332–345.
7. Lindermeir W., Graeb H., Antreich K. Analogue Testing by Characteristic Observation Inference // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. 1999. Vol. 18. P. 1353–1368.
8. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 340 с.
9. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования // Информационно-управляющие системы. 2010. № 2. С. 55–61.
10. Егоров А. Н., Мироновский Л. А. Использование нулей динамических систем в задачах технической диагностики // Электронное моделирование. 1996. № 6. С. 34–42.
11. Архангельский О. И., Мироновский Л. А. Диагностирование динамических систем с помощью операторных норм // Электронное моделирование. 1995. № 5. С. 40–49.
12. Бритов Г. С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 75–83.
13. Мироновский Л. А. Тестовый контроль передаточных функций стационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1984. № 10. С. 22–26.
14. Уонем М. Линейные многомерные системы управления. — М.: Наука, 1980. — 376 с.
15. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.
16. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. — Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. проф.-пед. ун-та, 2008. — 279 с.
17. Мироновский Л. А., Соловьева Т. Н. Структурное диагностирование управляемых динамических систем // Тр. XII Всерос. совещания по проблемам управления. М.: ИПУ РАН. 2014. С. 7640–7647.

UDC 621.38

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.77

**A Method for Testing Linear Dynamic Systems**Britov G. S.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, britovgs@gmail.com<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Developing a new method for test diagnostics of linear dynamic systems. Compared to the available methods based on using special test actions, this method uses mathematical models of a scalar dynamic system in the form of transfer functions and certain structures of communication between its units. **Methods:** The theory of linear control systems was used which helped to describe clearly and conveniently the process of test diagnostics. **Results:** A method was developed for test diagnostics of linear dynamic systems with given transfer functions of their links and a given structure of connections between them. Using the proposed diagnostic models of a linear scalar system, a test diagnostics procedure is built, based on dichotomous search for a defect, which allows you to not only detect the defect but also to localize the respective link. The procedure helped to build testers of two types, parallel and sequential, according to the way of tester implementation: the programmable implementation uses a sequential structure, while Simulink modeling uses a parallel one. **Practical relevance:** The method allow you to quickly and rather simply carry out test diagnostics of a scalar linear control system, having specified where the defect occurred. In the article, it was done for two systems of the third order.

**Keywords** — Linear Scalar System, Transfer Function of a System Link, System Diagnostic Model, Diagnostic Sign, Diagnostic Procedure, Tester, Single Defect.

**References**

1. Mironovsky L. A. Test Checking of Linear Control Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte*, 2005, no. 5, pp. 3–8 (In Russian).
2. Kadim H. J. Minimal Transient Modes for Faults Detection in Analogue VLSI Circuits. *Radioelectronics & Informatics*, 2003, no. 3, pp. 82–86.
3. Mironovsky L. A., Slaev V. A. Synthesis Optimal Test Signals is Solution of Bulgakov Task. *Avtomatika i telemekhanika*, 2002, no. 4, pp. 82–86 (In Russian).
4. Mironovsky L. A. Diagnosis of Linear Systems by Complementary Signal Method. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2002, no. 5, pp. 52–57 (In Russian).
5. Mironovsky L. A. Diagnosis Control Systems by Invalidating Signal Method. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte*, 2001, no. 5, pp. 3–7 (In Russian).
6. Abdeerrahman A., Cerny E. Worst Tolerance Analysis and CLP-based Multifrequency Test Generation for Analogue Circuits. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*, 1999, vol. 18, pp. 332–345.
7. Lindermeir W., Graeb H., Antreich K. Analogue Testing by Characteristic Observation Inference. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*, 1999, vol. 18, pp. 1353–1368.

8. Mironovsky L. A. *Funkcional'noe diagnostirovanie dinami-cheskih sistem* [Functional Diagnostics of Linear Dynamic Systems]. Moscow, MGU Publ., 1998. 256 p. (In Russian).
9. Britov G. S., Mironovsky L. A. Automated Design of Functional Diagnosing Devices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2010, no. 2, pp. 55–61 (In Russian).
10. Egorov A. N., Mironovsky L. A. Using Nulls of Dynamic Systems in Technical Diagnostic Tasks. *Elektronnoe modelirovanie*, 1996, no. 6, pp. 34–42 (In Russian).
11. Arkhangel'skii O. I., Mironovsky L. A. Diagnosis Dynamic Systems by Operator Norms. *Elektronnoe modelirovanie*, 1995, no. 5, pp. 40–49 (In Russian).
12. Britov G. S. Verification, Validation and Testing of Computer Models of Linear Dynamic Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, no. 2, pp. 75–83 (In Russian).
13. Mironovsky L. A. Test Checking of Transfer Functions of Stationary Objects. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 1989, no. 10, pp. 22–26 (In Russian).
14. Uonem M. *Lineinye mnogomernye sistemy upravleniia* [Linear Many-dimensional Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 376 p. (In Russian).
15. Britov G. S., Mironovsky L. A. Estimation Testing Procedure of Linear Control Systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2006, no. 11, pp. 44–49 (In Russian).
16. Shreiner R. T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniia elektropriivodov* [Slave Control Systems of Electric Drives]. Ekaterinburg, UGP-PU Publ., 2008. 279 p. (In Russian).
17. Mironovsky L. A., Solov'eva T. N. Structured Diagnosing of Control Dynamic Systems. *Trudy XII Vserossiiskogo sovetschaniia po problemam upravleniia* [Proc. of the XII All-Russian Problems of Control Conf.], Moscow, IPU RAN Publ., 2014, pp. 7640–7647 (In Russian).

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

**Формулы** набирайте в Word, не используя формульный редактор (MathType или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** в текст не заверстаются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.doc); AdobeIllustrator (\*.ai); AutoCad (\*.dxf); Matlab (\*.ps, \*.pdf или экспорт в формат \*.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат \*.ai, \*.esp, \*.wmf, \*.emf, \*.svg;

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подписочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература – СИБИБД РФ, References – один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

### Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)

УДК 004.383.8.032.26; 004.93.1

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.85

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ

Е. Н. Бендерская<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

К. В. Никитин<sup>а</sup>, канд. техн. наук, ассистент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** разработка системы распознавания динамических образов с использованием нового подхода на основе резервуарных вычислений. **Результаты:** распознавание динамических образов определяется как выявление патологических состояний сердца пациента — аритмий по изменяющемуся сигналу его электрокардиограммы. В качестве примера рассматриваются два типа аритмий — суправентрикулярная и вентрикулярная. Предложен новый эффективный метод решения поставленной задачи на основе модели машины неустойчивых состояний, состоящей из импульсной рекуррентной нейронной сети и считывателей. Представлен процесс решения задачи распознавания электрокардиограмм. Демонстрируется на понятном примере специфика используемого подхода: представление данных в импульсной форме, работа импульсной нейронной сети, считывание данных и принятие решения — классификация. В качестве исходных данных используется база данных SVDB по аритмиям из свободного ресурса Physionet. Рассчитываются показатели качества распознавания и сравниваются с показателями, полученными при использовании наиболее известных альтернативных методов. **Практическая значимость:** предложенный метод на основе машины неустойчивых состояний позволяет повысить качество решения задач распознавания динамических образов разнообразной природы по сравнению с классическими методами.

**Ключевые слова** — импульсные нейроны, рекуррентные нейронные сети, распознавание динамических образов, электрокардиограмма.

### Введение

Несмотря на то что теория распознавания образов развивается с 70-х годов прошлого века, все еще существует много нерешенных задач, относящихся к этому направлению. Особенно это касается случая динамических образов, которые в отличие от статических образов зависят от времени и, таким образом, имеют одно дополнительное измерение. Для устранения возникающей сложности в большинстве подходов предлагается перейти от динамического образа к статическому путем формирования некоторого набора признаков. Новым статистическим подходом к извлечению признаков динамического сигнала является использование рекуррентных нейронных сетей (РНС) в составе системы, реализующей парадигму резервуарных вычислений [1, 2]. Использование данного подхода, как будет показано дальше, позволяет повысить качество распознавания по сравнению с классическими решениями.

Одним из приложений теории распознавания динамических образов являются задачи диагностики динамических систем. Их состояние представляет собой набор изменяющихся во времени непрерывных сигналов или последовательностей. Примером такой задачи выступает медицинская диагностика заболеваний и патологий сердечно-сосудистой системы человека по

записям его электрокардиограммы (ЭКГ). В настоящее время распознавание ЭКГ с помощью компьютерных алгоритмов используется только для первичной диагностики пациента, а окончательная расшифровка ЭКГ выполняется врачом. Одной из главных причин этого является как раз недостаточное качество распознавания. Поэтому усовершенствование системы распознавания динамических образов на примере ЭКГ позволит автоматизировать и тем самым ускорить процесс медицинской диагностики.

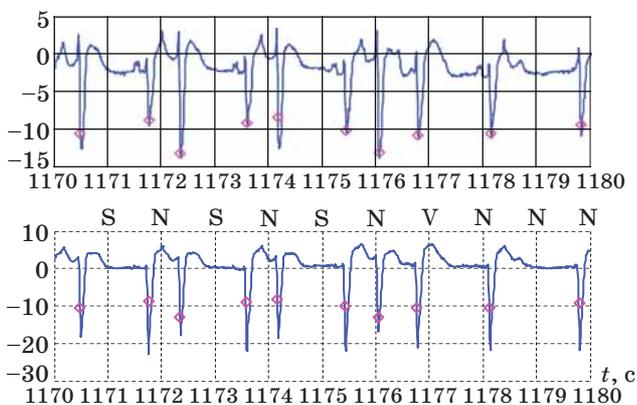
### Постановка задачи распознавания ЭКГ

Рассмотрим особенности, связанные с задачей распознавания ЭКГ — графического представления разности потенциалов, формирующейся в результате работы сердца. В ходе анализа ЭКГ выявляются различные нарушения ритма, определяется их тип и предполагаются различные причины, с которыми эти нарушения могут быть связаны. Наиболее распространенным нарушением ритма является аритмия. При аритмии происходит нарушение частоты, ритмичности и последовательности возбуждения и сокращения сердца. В зависимости от нарушенной функции сердца выделяют три группы аритмий, в каждой из которых выделяют несколько типов и подтипов. Каждый тип аритмии характеризуется своим уникальным внутренним рисунком. Однако

несмотря на это, ряд обстоятельств затрудняет постановку точного диагноза:

- у каждого человека рисунок аритмии может немного отличаться;
- различные патологии могут накладываться друг на друга и изменять общий рисунок;
- при суточном мониторинге сигнал ЭКГ может быть сильно зашумлен;
- очевидные патологии могут быть видны сразу, однако предпатологические состояния могут оставаться незаметными.

Для настройки, обучения и оценки качества разрабатываемых систем автоматического распознавания ЭКГ используются специальные медицинские базы данных ЭКГ [3]. Процесс подготовки такой базы включает в себя запись сигнала ЭКГ с некоторой частотой дискретизации, разбиение всей ЭКГ на секции. Каждая секция характеризует одно биение сердца и анализируется врачом-специалистом для маркировки своим классом («здоров», «аритмия типа 1», «аритмия типа 2» и т. д.). На рис. 1 показан пример фрагмента ЭКГ, снятой с двухканального регистрирующего прибора с частотой дискретизации 128 Гц и разбитой на секции, каждая новая секция на графиках отмечена ромбом. Между графиками отображается тип биения для каждой секции. В примере показаны три типа биения: нормальное (N), суправентрикулярное преждевременное (S) и вентрикулярное преждевременное (V). Задачей распознающей системы является определение типа биения по двухканальному сигналу ЭКГ. Несмотря на кажущуюся различимость указанных типов биений, на всем множестве имеющихся экспериментальных данных сигналы ЭКГ, соответствующие биениям, имеют множество вариаций по форме, и отличить их друг от друга довольно сложно. При формировании обучающей и тестовой выборки вначале составляются пары «вход-желаемый выход» вида  $\Pi^i = (X^i, Y^i)$ , где  $X^i$  — значения сигнала ЭКГ с  $i$ -й секции;



■ Рис. 1. Разбиение участка ЭКГ на секции и их маркировка

$Y^i$  — тип или класс биения для  $i$ -й секции. Поскольку секция представлена множеством значений сигналов ЭКГ во времени, то  $x^i$  является также набором векторов значений сигналов ЭКГ в различные моменты времени:  $X^i = \{x^i(T), x^i(2T), \dots, x^i(N^iT)\}$ , где  $T$  — период квантования, а  $N^i$  — число значений моментов времени для  $i$ -й секции.  $N^i$  может варьироваться в зависимости от частоты пульса пациента, а также от других факторов, например от пропуска биения. Класс биения  $i$ -й секции  $Y^i$  принимает дискретные значения от 1 до  $P$ , где  $P$  — число классов. Все пары объединяются в общее множество  $\Pi = \{\Pi^1, \Pi^2, \dots, \Pi^{all}\}$ . Затем это множество  $\Pi$  может быть разбито различными способами на два непересекающихся подмножества: обучающее  $\Pi_{train}$  и тестовое  $\Pi_{test}$ .

Задача распознавания формально может быть определена следующим образом. По обучающему множеству  $\Pi_{train}$  необходимо синтезировать такую систему распознавания, которая на тестовом множестве  $\Pi_{test}$  обеспечит минимальную ошибку классификации. Процедура синтеза распознающей системы сводится к поиску наилучшей конфигурации алгоритмов выделения признаков, классификаторов-аппроксиматоров, а также их параметров в смысле обеспечения минимального значения ошибки на сформированных тестовых выборках.

## Описание модели

Для выделения динамических признаков из изменяющегося сигнала ЭКГ предлагается использовать подход на основе резервуарных вычислений (РВ) [1]. Резервуар представляет собой динамическую систему, интегрирующую в своем состоянии предысторию — информацию о предыдущих входных сигналах [4]. Поэтому из текущего состояния резервуара можно извлечь полезную информацию о динамическом образе — ЭКГ и решить задачу распознавания — диагностики аритмии. По сравнению с другими известными решениями задачи на базе нейросетевых подходов [5, 6] при использовании РВ в одной системе решаются сразу две задачи: выделение информационных признаков (в том числе и за счет внутренней реконструкции ЭКГ внутри резервуара) и последующая их обработка с формированием решения (за счет работы считывателей, в качестве которых могут быть использованы известные классификаторы). Упрощение системы РВ до считывателей приводит к системам классических вычислений.

Одной из моделей РВ является модель МНС, предложенная Маассом [4], название которой дословно переводится как машина неустойчивых состояний (Liquid State Machine — LSM). В ней резервуар представлен импульсной [7] РНС.

Динамика импульсной РНС в ответ на входной сигнал похожа на динамику воды в стакане после некоторого возмущения — затухающие распространяющиеся волны. Автором модели математически строго доказано, что модель МНС при идеализированных условиях обладает универсальными вычислительными возможностями. МНС структурно представляет собой резервуар в форме импульсной РНС, последовательно соединенный со специальными устройствами — считывателями (рис. 2).

Входные сигналы на входе резервуара представлены векторной непрерывной функцией  $U(t)$ . В ответ на эти сигналы резервуар с некоторой задержкой по времени переходит в новое состояние  $X^M(t)$ . Затем это состояние подается на вход считывателей, выходы которых являются выходами всей системы и представлены векторной непрерывной функцией  $Y(t)$ . Так как считывающее отображение не имеет памяти, вся информация о входах  $u_i(s)$ ,  $s \leq t$ , должна содержаться во внутреннем состоянии  $X^M(t)$ . Подробное описание и анализ всех составляющих МНС приведен в работе [8], поэтому коснемся лишь некоторых основных моментов.

Преобразование из  $U(t)$  в  $X^M(t)$ , осуществляемое в резервуаре, можно определить через некоторый оператор (фильтр)  $L^M$ :  $X^M(t) = (L^M(U(t)))$  или систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений:  $dX^M/dt = F_L(U(t), X^M(t), t)$ . МНС состоит из считывателей и РНС, которая структурно организована в форме трехмерной решетки из  $n_{nrn}$  импульсных нейронов со случайными связями. В качестве импульсных моделей используются модели типа «интегрирование и возбуждение» и нейрон Ижикевича [9]. Связи представлены «электрическими» и «химическими» синапсами. Определенное число нейронов, составляющее  $p_{inh}$  от их общего числа, произвольно назначаются подавляющими, остальные нейроны выбираются возбуждающими. Связи между нейронами формируются на основе их взаимного расположения на решетке. Вероятность связей между двумя нейронами определяется по формуле  $P(a, b) = \min[1, C(a, b) \cdot \exp(-(D(a, b)/\lambda)^2)]$ , где

буквами  $a$  и  $b$  обозначаются два нейрона;  $C(a, b)$  — постоянная, зависящая от типов взаимодействующих нейронов (возбуждающий или подавляющий),  $C(a, b) \leq 1$ ;  $D(a, b)$  — евклидово расстояние между нейронами. Параметр  $\lambda$  управляет числом связей и средней длиной связи между нейронами. Каждый из  $n_{vh}$  входов РНС случайно соединен с определенным числом ее нейронов  $p_{vh}$ .

Основная специфика МНС заключается в том, что внутри нее — в РНС — информация передается и обрабатывается в импульсной форме. В связи с этим необходимо выполнять прямое и обратное преобразование между импульсной и аналоговой формой.

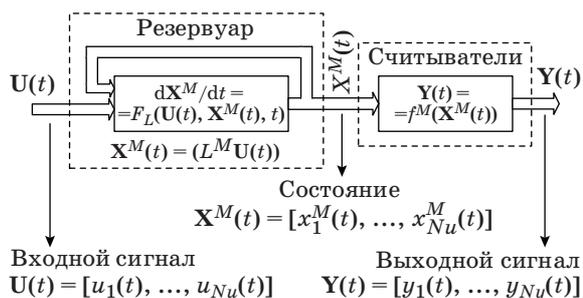
Считыватели — устройства, предназначенные для анализа динамики резервуара (РНС) и решения конкретных прикладных задач — классификации, аппроксимации и др. Считыватели могут реализовывать:

- преобработку выходного сигнала РНС (преобразование информации из импульсной формы в аналоговую; сокращение размерности выходного сигнала);
- анализ выходного сигнала РНС (определение типа динамики, вычисление различных показателей — статистических, информационных, динамических, частотных);
- решение конечной задачи классификации, аппроксимации и др.

При решении конечной задачи для контроля используется набор показателей качества: вероятности правильной/неправильной классификации, ошибки аппроксимации, различные индексы кластеризации. Можно выделить следующие основные особенности, связанные с использованием считывателей:

- сигнал с выхода импульсной РНС является многомерным и импульсным, поэтому вначале осуществляются преобразования этого сигнала в аналоговую форму;
- анализаторы динамики сигнала могут быть использованы при выборе надлежащего алгоритма преобразования импульсного сигнала. Они позволяют определить временной масштаб, скорость изменения сигнала и потом с наименьшими потерями перейти от импульсного сигнала к аналоговому;
- к набору признаков может быть применена процедура сокращения размерности, что позволяет исключить из рассмотрения слабо влияющие признаки и избежать проблемы «проклятия размерности»;
- выбор наилучшей комбинации считывателей осуществляется на основании анализа показателей качества решения конечной задачи.

Остановимся подробнее на одной из подзадач считывателей, упомянутой выше и связанной с нормализацией входных образов во временном



■ Рис. 2. Схема машины неустойчивых состояний

диапазоне. Это важно из-за специфики обрабатываемых образов ЭКГ. Длительность секций может различаться в зависимости от частоты сердцебиения. Ввиду затухающей памяти, которой обладает импульсная РНС, нет смысла подавать на ее вход образы, которые длятся дольше, чем глубина ее памяти, поскольку к моменту считывания она забудет начальную часть образа.

Для реализации процедуры нормализации определяется средняя глубина памяти РНС и задается время образа  $t_{norm}$ . Если время представления входного образа больше (меньше) этих значений, следует сжать (растянуть) входной образ во времени до  $t_{norm}$ . С математической точки зрения процедура сжатия (растяжения) во времени является очевидной — при интервальной форме задания все границы всех временных интервалов следует умножить на константу, определяющую коэффициент сжатия (растяжения).

### Методика решения задачи

Для успешного решения задачи распознавания динамических образов с помощью МНС использовалась методика синтеза импульсных РНС в составе МНС [10]. Она предусматривала выполнение ряда шагов.

1. Анализ задачи (входных данных). На данном шаге в зависимости от типа, размерности, сложности входных данных определяется форма их подачи на вход РНС (импульсная или непрерывная), а при необходимости — алгоритм преобразования данных в импульсную форму, выполняется нормализация данных во временном диапазоне и формируется набор обучающих и тестовых примеров.

2. Синтез резервуара. На данном этапе приводятся рекомендации по выбору типа и задания значений всех параметров импульсной РНС. Эти рекомендации составлены на основе экспериментального исследования. Среди основных определяемых параметров — число входов  $n_{vh}$  РНС, число нейронов  $n_{nrn}$  резервуара, вероятность связи между входами и нейронами резервуара  $p_{vh}$ , процент подавляющих нейронов  $p_{inh}$ , средняя длина связей  $\lambda$ , плотность связей (матрица  $C$ ). По этим параметрам случайным образом генерируется структура РНС. Затем в соответствии с рекомендациями задается тип нейронов, синапсов, сила связей между входами (матрица  $W_{vh}$ ), а также сила связей между нейронами (матрица  $W_{int}$ ), задержки и параметры нейронов и синапсов. В конечном итоге в соответствии с рекомендуемыми значениями параметров формируется резервуар — импульсная РНС, на вход которого будут подаваться входные сигналы.

3. Выбор считывающих модулей. Последовательность выбора считывателей можно предста-

вить следующим образом. Вначале определяется время считывания и выбирается алгоритм преобразования из импульсной формы в непрерывную. Затем выбирается алгоритм сокращения размерности числа признаков и алгоритм решения конечной задачи (классификации, аппроксимации и др.).

4. Оценка качества распознавания. После решения задачи распознавания качество оценивается с помощью процедуры кросс-валидации. В случае, если полученное качество распознавания не устраивает, можно вернуться на один из предыдущих этапов и выполнить одно из следующих действий: увеличить число обучающих примеров, повысить их репрезентативность; изменить способ подачи, представления, преобразования входных данных; сгенерировать новый резервуар с теми же параметрами или немного изменить параметры резервуара; изменить параметры считывателей.

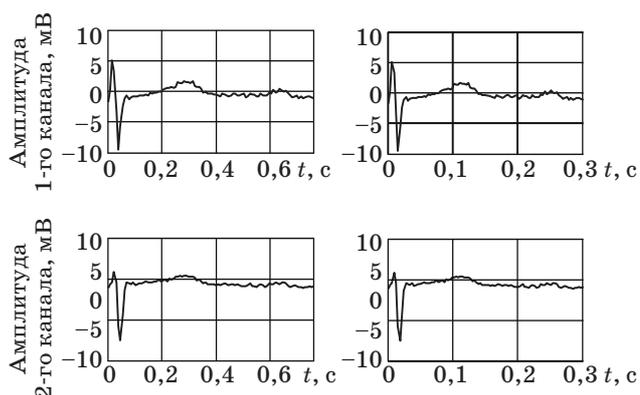
С применением этой методики осуществлялось решение задачи распознавания ЭКГ.

### Результаты синтеза РНС и распознавания электрокардиограмм

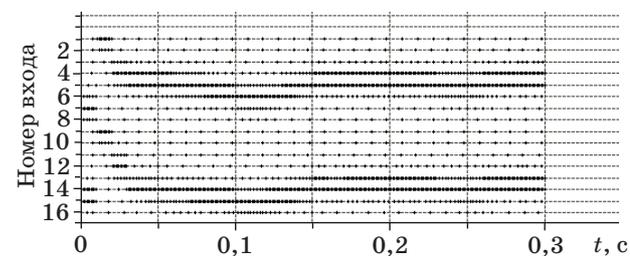
В качестве исходных данных использовался набор баз данных аритмий MIT-BIH [11], свободно распространяемый в рамках проекта PhysioNet [3]. Одна из задач, представленная в базе данных SVDB (Supraventricular Arrhythmia Database), — выявление суправентрикулярной и вентрикулярной аритмий. Эта база данных содержит 94 30-минутных записей ЭКГ (с двух датчиков) с аннотациями биений и их свойств (норма, аритмия). Пример фрагмента таких записей показан на рис. 1.

Для решения тестовой задачи в рамках предлагаемой методики выбирался способ подачи данных на вход резервуара, синтезировался резервуар, определялись параметры считывателей.

Поскольку данные ЭКГ снимаются с двух каналов, то исходная размерность входного сигнала равна двум:  $n_{in} = 2$ . Для подготовки набора обучающих и тестовых примеров из разных ЭКГ были взяты секции с биениями, соответствующими разным классам — нормальным биениям и биениям с аритмией по 100 примеров каждого типа (всего  $N_{all} = 200$  примеров). Средняя длительность одного биения — 1 с. Глубина памяти импульсной РНС меньше, поэтому производилась нормализация входного сигнала во временном диапазоне. В результате все примеры были приведены к такой форме, что каждый из них длился  $t_{norm} = 0,3$  с. Один из вариантов такой нормализации показан на рис. 3. Для подачи примеров на вход импульсной РНС они были преобразованы из непрерывной формы в импульсную. В качестве алгоритма преобразования использовался пространственно-временной алгоритм на основе рецептивных полей:



■ **Рис. 3.** Пример нормализации во временном диапазоне исходного входного сигнала (слева — исходные сигналы, справа — после нормализации во времени)



■ **Рис. 4.** Иллюстрация процесса преобразования исходного фрагмента ЭКГ из рис. 3 в импульсную форму для подачи на вход импульсной РНС

каждый аналоговый сигнал преобразуется в множество  $k_x$  импульсных сигналов (в примере  $k_x = 8$ ).

В результате  $n_{in} = 2$ -мерный непрерывный сигнал был преобразован в  $n_{vh} = 16$ -мерный импульсный сигнал (рис. 4). Минимальный период импульсов  $T_{min} = 0,1$  с.

Поскольку выявление аритмии является сложной задачей, то в соответствии с методикой было предложено использовать резервуар из нейронов Ижикевича. В целях сравнения качества распознавания были также проделаны эксперименты с резервуаром из нейронов IaF [7, 9]. Параметры резервуара из нейронов Ижикевича включали: возбуждающие нейроны — типа RS; подавляющие нейроны — типа FS; число нейронов  $n_{nrn} = 125$  (решетка  $5 \times 5 \times 5$ );  $\lambda = 2$ ;  $p_{inh} = 20\%$  нейронов пода-

вляющие;  $C = \begin{bmatrix} 0,4 & 0,4 \\ 0,2 & 0,4 \end{bmatrix}$ ;  $W_{int} = \begin{bmatrix} 0,001 & 0,01 \\ 0,01 & 0,015 \end{bmatrix}$ ;

каждый из  $n_{vh} = 16$  входов случайно связан с  $p_{vh} = 10\%$  нейронов; силы химических синапсов от входов к подавляющим и возбуждающим нейронам  $w_{vh(chem)}^i = w_{vh(chem)}^e = 0,01$ ; постоянная времени  $\tau_{syn} = 3$  мс для всех химических синапсов, кроме синапсов от подавляющих нейронов — для

них  $\tau_{syn} = 6$  мс; задержка во всех химических синапсах одинакова —  $\tau_{delay} = 1$  мс. Параметры резервуара из нейронов IaF отличаются матрица-

ми:  $C = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,4 \\ 0,2 & 0,3 \end{bmatrix}$ ,  $W_{int} = \begin{bmatrix} 0,02 & 0,01 \\ 0,01 & 0,05 \end{bmatrix}$ .

В результате анализа реакции РНС были определены следующие параметры считывателей. Время считывания равно моменту времени, соответствующему окончанию подачи двух третей образа, т. е.  $t_{readout} = 100$  мс. Алгоритм преобразования из импульсной формы в непрерывную выбран на основе преобразования каждого импульса в затухающую экспоненту с постоянной времени  $\tau_{window} = 10$  мс. Были рассмотрены два варианта сочетания алгоритма сокращения размерности и классификатора:

- алгоритм PCA,  $n_{comp} = 2(3)$  компоненты и байесовский классификатор;
- классификатор k-NN без сокращения размерности.

В ходе проверки работы МНС образы подавались по очереди (нормальный и с аритмией) в два цикла. Вначале решалась простая задача с 12 вариантами ЭКГ. k-NN-классификатор, используя в качестве обучающих первые два образа, успешно распознал все следующие 10 образов. Также без ошибок справился с задачей и обычный байесовский линейный классификатор при использовании двух главных компонент (125 сигналов с нейронов использовать нельзя в силу невозможности получить удовлетворительную ковариационную матрицу). После этого решалась задача со всеми 200 образами: 70% образов были случайно выбраны обучающими, а остальные 30% — тестовыми. Качество распознавания оценивалось с помощью вероятностей правильного распознавания для случая нормального биения  $p_{r2}^{norm}$  и аритмии  $p_{r2}^{arhythm}$ . В таблице приведены результаты качества распознавания исследуемой

Алгоритм распознавания	$p_{r2}^{norm}, \%$	$p_{r2}^{arhythm}, \%$
Структурный	85,9±3,6	74,5±6,5
Статистический, признаки — сам сигнал	78,2±0,0	76,1±0,0
Статистический, признаки — быстрое преобразование Фурье	84,4±2,4	74,5±5,0
Статистический, признаки — вейвлеты	87,1±2,6	72,3±3,3
Статистический, с помощью резервуара — импульсной РНС из IaF нейронов	85,4±2,2	75,8±1,2
Статистический, с помощью резервуара — импульсной РНС из нейронов Ижикевича	88,0±1,1	81,4±1,7

системы с помощью МНС и применением классических подходов при одних и тех же условиях и входных данных [12].

Вероятности правильного распознавания приведены в форме «математическое ожидание  $\pm$  среднеквадратичное отклонение». Из таблицы следует, что лучше всего с поставленной задачей справилась система распознавания на основе МНС с резервуаром в форме импульсной РНС из нейронов Ижикевича. Качество распознавания нормальных биений выше наилучшего (наихудшего) из классических методов на 1 % (10 %), а биений с аритмией — на 5 % (9 %).

### Заключение

Как следует из приведенных результатов, теоретически обоснованные возможности РНС в рамках парадигмы РВ достаточно хорошо согласуются с результатами их применения при решении реальных практических задач — распознавания аритмий по ЭКГ. Использование нового подхода позволяет повысить качество распознавания даже по сравнению с проблемно-ориенти-

рованными методами. Действительно, качество распознавания системы распознавания на основе МНС выше наилучших вариантов использования классических структурных и статистических подходов на 5 %. Отсюда явно вытекает перспективность использования предлагаемого подхода при решении новых задач распознавания динамических образов, для которых сама природа и свойства образов являются мало или совсем не изученными.

Несмотря на полученные положительные результаты, еще есть много задач, требующих решения: выбор оптимального алгоритма кодирования входных и декодирования выходных импульсных образов; аппаратная реализация модели, позволяющая значительно повысить быстродействие системы распознавания; усовершенствование внутренней структуры резервуара в зависимости от входных образов; построение самоорганизующихся резервуаров и др. Вполне вероятно, что решение этих задач будет способствовать повсеместному использованию различных моделей РВ в новых перспективных информационных и управляющих системах.

### Литература

1. Schrauwen B., Verstraeten D., Campenhout J. V. An Overview of Reservoir Computing Theory, Applications and Implementations // Proc. of the 15th European Symp. on Artificial Neural Networks. 2007. P. 471–482.
2. Бендерская Е. Н., Никитин К. В. Рекуррентная нейронная сеть как динамическая система и подходы к ее обучению // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. № 4(176). С. 29–40.
3. PhysioNet: The Research Resource for Complex Physiological Signals. <http://www.physionet.org> (дата обращения: 01.04.2014).
4. Maass W., Natschläger T., Markram H. Real-Time Computing without Stable States: A New Framework for Neural Computations Based on Perturbations // Neural Computation. 2002. Vol. 11. P. 2531–2560. doi:10.1162/089976602760407955
5. Пат. US20130345580 A1, US. Reconstruction of a Surface Electrocardiogram from an Endocardial Electrogram Using Non-linear Filtering/ Fabienne Porée (FR). — N 14/015,770; заявл. 30.08.2013; опубл. 26.12.2013.
6. Пат. CN102129509 A, CN. Coronary Heart Disease Self-diagnosis System Based on Electrocardiographic Monitoring and Back-Propagation Neural Network/ Wan Hung (CN). — N CN 201110042458; заявл. 22.02.2011; опубл. 20.07.2011.
7. Gerstner W., Kistler W. M. Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity. — Cambridge: Cambridge University Press, 2002. — 480 p.
8. Бендерская Е. Н., Никитин К. В. Анализ модели импульсной рекуррентной нейронной сети в составе машины неустойчивых состояний // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014. № 1. С. 17–22.
9. Izhikevich E. M. Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons? // IEEE Transactions on Neural Networks. 2004. Vol. 15. N 5. P. 1063–1070. doi:10.1109/TNN.2004.832719
10. Никитин К. В. Методика синтеза рекуррентных нейронных сетей для распознавания динамических образов // Список-2013: Материалы Всерос. науч. конф. по проблемам информатики, Санкт-Петербург, 25–27 апреля 2012 г. СПб.: ВВМ, 2013. С. 489–495.
11. Moody G. B., Mark R. G. The MITBIH Arrhythmia Database on CDROM and Software for Use with it // Computers in Cardiology. 1990. Vol. 17. P. 185–188.
12. Olszewski R. T. Generalized Feature Extraction for Structural Pattern Recognition in Time-Series Data: PhD Thesis. — Pittsburgh, 2001. — 125 p.

UDC 004.383.8.032.26; 004.93.1  
doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.85

### Using Spiking Recurrent Neural Networks for ECG Analysis

Benderskaya E. N.<sup>a</sup>, PhD, Associate Professor, helen.bend@gmail.com

Nikitin K. V.<sup>a</sup>, PhD, Assistant Professor, exciter@mail.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State Polytechnical University, 21, Politechnicheskaya St., 194021, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** The paper describes dynamic pattern recognition system engineering using a new approach on the base of reservoir computing. Dynamic pattern recognition is defined as detecting failures in the patient's heart known as arrhythmias, by the changeable signal of his or her electrocardiogram (ECG). Two types of arrhythmia, supraventricular and ventricular, are discussed as examples. **Results:** A new efficient method is proposed, based on Liquid State Machine (LSM) model which consists of biologically realistic spiking recurrent neural network and several special devices called readouts. Using a popular example, the paper demonstrates the specifics of the new approach: representing the data in the impulse form, functioning of a spiking neural network, reading the data and making a classification decision. SVDB arrhythmia database from Physionet free internet resource is used as input data. Finally, the calculated parameters of the system performance are compared with those of the most popular alternative methods. The conclusion is that the proposed recognition system allows you to increase the recognition quality compared to the classical approaches. **Practical relevance:** The proposed LSM-based recognition system can improve the quality of recognizing dynamic patterns of various types.

**Keywords** — Spiking Neurons, Recurrent Neural Networks, Dynamic Pattern Recognition, ECG.

### References

- Schrauwen B., Verstraeten D., Campenhout J. V. An Overview of Reservoir Computing Theory, Applications and Implementations. *Proc. of the 15th European Symposium on Artificial Neural Networks*, Bruges, 2007, pp. 471–482.
- Benderskaya E. N., Nikitin K. V. Recurrent Neural Network as Dynamical System and Approaches to its Training. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikatsii. Upravlenie*, Saint-Petersburg, Politechnicheskii universitet Publ., 2013, no. 4(176), pp. 29–40 (In Russian).
- PhysioNet: the Research Resource for Complex Physiological Signals*. Available at: <http://www.physionet.org> (accessed 1 April 2014).
- Maass W., Natschläger T., Markram H. Real-time Computing Without Stable States: a New Framework for Neural Computations Based on Perturbations. *Neural Computation*, 2002, vol. 11, pp. 2531–2560. doi:10.1162/089976602760407955
- Fabienne Porée, et al. *Reconstruction of a Surface Electrocardiogram from an Endocardial Electrogram Using Non-linear Filtering*. Patent US, no. US20130345580 A1, 2013.
- Wan Hung, et al. *Coronary Heart Disease Self-diagnosis System Based on Electrocardiographic Monitoring and Back-propagation Neural Network*. Patent CN, no. CN102129509 A, 2011.
- Gerstner W., Kistler W. M. *Spiking Neuron Models. Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge University Press, 2002. 480 p.
- Benderskaya E. N., Nikitin K. V. Analysis of a Spiking Recurrent Neural Network as a Part of the Liquid State Machine. *Nejrokomputery: razrabotka, primeneniye*, 2014, no. 1, pp. 17–22 (In Russian).
- Izhikevich E. M. Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons? *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, vol. 15, no. 5, pp. 1063–1070. doi:10.1109/TNN.2004.832719
- Nikitin K. V. Method of Recurrent Neural Networks Synthesis for Dynamic Pattern Recognition. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii po problemam informatiki "Spisok-2013"* [Proc. All-Rus. Conf. "Spisok-2013"]. Saint-Petersburg, VVM Publ., 2013, pp. 489–495 (In Russian).
- Moody G. B., Mark R. G. The MITBIH Arrhythmia Database on CDROM and Software for Use with it. *Computers in Cardiology*, 1990, vol. 17, pp. 185–188.
- Olszewski R. T. *Generalized Feature Extraction for Structural Pattern Recognition in Time-Series Data*. PhD Thesis. Pittsburgh, 2001. 125 p.

УДК 004.942

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.92

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ

А. Г. Степанов<sup>а</sup>, доктор пед. наук, профессор

С. Г. Семин<sup>б</sup>, экономист 2-й категории

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>ОАО «АТОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** оценка эффективности капиталовложений является неотъемлемой частью процесса инвестиционной деятельности, управления инвестиционными проектами, проектами технического перевооружения в частности. Несовершенство специализированного программного обеспечения, наличие множества факторов, влияющих на эффективность проекта, уменьшение возможности обладания исчерпывающими данными о внутренней структуре проекта с течением времени зачастую создают условия неопределенности для принятия решения. Одним из вариантов решения данной проблемы является применение программного обеспечения для имитационного моделирования. **Постановка задачи:** на предприятии производственная линия состоит из станков, один из которых пришел в негодность. Из двух существующих выходов из ситуации — отремонтировать имеющийся станок или приобрести новый — необходимо найти оптимальный. **Результаты:** для выбора решения в среде AnyLogic построена имитационная модель, которая воспроизводит структуру производственной линии с возможностью моделирования как ремонта имеющегося станка, так и приобретения нового станка. Модель позволяет произвести расчет показателей эффективности в автоматическом режиме. Пользовательский интерфейс предусматривает возможность переключения между вариантами модели. Проведено два эксперимента для двух вариантов. Входные данные для экспериментов принимались одинаковыми. Исследование показало, что вариант ремонта станка является менее предпочтительным, чем приобретение нового. Риск последующих поломок слишком велик, и затраты на ремонт будут регулярно сопутствовать производственному процессу. **Заключение:** применение системного подхода, и имитационного моделирования в частности, в целях повышения эффективности инвестиционной деятельности, например, при планировании проектов по техническому перевооружению, позволяет представить возможные риски в качестве неопределенностей и учесть их влияние на конечный результат.

**Ключевые слова** — модель, проект, управление, моделирование, системный подход, системно-динамическое моделирование, имитационное моделирование.

### Введение

Проведение работ по техническому перевооружению производственных мощностей в современных условиях требует привлечения денежных средств. На практике выполнение подобных работ ведется в рамках инвестиционного проекта. В соответствии с методологией управления проектами [1] такие работы должны быть направлены на достижение поставленных целей, привлечение заданного результата, минимизацию возможных рисков в условиях ограничения по ресурсам, времени и бюджету. Исходные параметры проекта фиксируются в бизнес-плане. С течением времени на разных стадиях жизненного цикла проекта условия его выполнения, а также условия достижения поставленных целей могут меняться. Структурная декомпозиция работ проекта по перевооружению технических мощностей нередко включает тысячи отдельных подзадач, единиц ресурсов, сотни бизнес-процессов. Несмотря на множество видов проводимых работ, специальностей исполнителей, большого числа человеческих ресурсов, исполнение проекта должно происходить согласно утвержденному

бизнес-плану. Несомненно, подробное планирование работ на доинвестиционной фазе жизненного цикла проекта как инструмент управления имеет существенные преимущества по сохранению утвержденных сроков и стоимости, а также по успешному выполнению перед интуитивным ручным управлением.

Информационные системы в современном управлении проектами — это неотъемлемая часть инструментария руководителей проектов, в том числе и при осуществлении инвестиционной деятельности. Современный рынок программного обеспечения предлагает специалисту по управлению проектами несколько популярных и зарекомендовавших себя специализированных программ в этой области. Сфера применения таких программных средств становится все более разнообразной, что способствует их распространению, а их использование входит в регламенты производственных процессов предприятий. Тем не менее при управлении инвестиционными проектами руководители сталкиваются с разного рода вопросами, которые могут оказать решающее воздействие на конечный результат проекта. Речь идет о различных неопределенностях, без

которых редко протекает жизненный цикл проекта: неполная или недостоверная информация о занятости трудовых ресурсов в заданный момент времени; нестабильное финансирование и возможные корректировки бюджета проекта; наличие внешних факторов, которые могут оказать существенное влияние на проект, и внутренних факторов, присущих научно-исследовательским учреждениям. Для того чтобы определить степень влияния вышеописанных факторов на ход инвестиционных проектов, а также расширить возможности специализированного программного обеспечения в сфере поддержки принятия решения (компьютерного комплекса, используемого в процессе принятия решений [2]), предлагается на доинвестиционной фазе, а также при управлении проектом применять метод имитационного моделирования.

В коммерческой деятельности имитационные модели часто помогают принять решение, позволяющее максимизировать прибыль предприятия. Путем имитации на компьютере различных ситуаций, значений параметров системы с помощью построенной модели можно решать такие оптимизационные задачи, которые нельзя решить аналитически [3]. Моделирование применяется в случаях, когда проведение экспериментов над реальной системой невозможно или нецелесообразно, например, из-за высокой стоимости или длительности проведения эксперимента в реальном масштабе времени [4]. Имитационная модель имеет ряд преимуществ перед аналитической моделью [2]. Она учитывает временные и причинные взаимосвязи и ограничения любой сложности, случайные факторы, выдает детальное поведение системы во времени, позволяет показать и измерить практически все параметры. На сегодняшний момент специализированное программное обеспечение для имитационного моделирования позволяет применять все известные подходы к созданию имитационных моделей: процессно-ориентированный (дискретно-событийный), системно-динамический и агентный, а также любую их комбинацию [5]. Данное обстоятельство открывает перед специалистами по управлению проектами новые возможности для исследования бизнес-процессов.

В Руководстве к Своду знаний по управлению проектами (A Guide to the Project Management Body of Knowledge, далее — Руководство) принципы управления с учетом описанных выше проблем отражены в главе 11 «Управление рисками проекта» [1]. В соответствии с Руководством управление рисками состоит из следующей группы процессов:

- 1) планирование управления рисками;
- 2) идентификация рисков;
- 3) качественный анализ рисков;

- 4) количественный анализ рисков;
- 5) планирование реагирования на известные риски;
- 6) мониторинг и управление рисками.

Управление рисками проекта в Руководстве предполагает итерационную методiku. Главная идея Руководства по рассматриваемому вопросу заключается в следующем: «Причиной возникновения рисков является неопределенность, которая присутствует во всех проектах. Известные риски — это те риски, которые были определены и проанализированы. В отношении таких рисков можно спланировать ответные действия. Но для неизвестных рисков спланировать ответные действия невозможно. В таких случаях разумным решением для команды проекта является выделение общего резерва на возможные потери» [1]. Подход, представленный в Руководстве, успешно практикуется в проектных и научно-исследовательских организациях [6].

В работе [7] изложен метод, основанный на «линейной аппроксимации вероятностных распределений и вычислении рисков по задачам, связанным отношениями следования. Метод представляет собой порядок расчетов, позволяющий оценивать риск и перепланировать цепочки связанных задач непосредственно в реальном времени, когда распределение задач по сотрудникам постоянно меняется в связи с непредвиденными событиями» [7]. Основная идея метода заключается в следующем: за случайную величину принимается отклонение от планируемого срока выполнения задачи, а распределение отклонения подчиняется нормальному закону. Срок выполнения задачи равен сумме планируемого времени выполнения задачи и отклонения от срока выполнения. Также предлагается метод подсчета суммарного отклонения от планируемого срока окончания проекта.

Для задачи с описанными неопределенностями, сопутствующими практически каждому проекту, предлагается на доинвестиционной фазе проекта научно-исследовательского направления проводить дополнительное исследование с применением имитационного моделирования. С течением времени, по мере продвижения проекта по жизненному циклу, возможны дополнительные корректировки имитационной модели в соответствии с актуальными условиями проекта для прогнозирования результатов после произошедших событий. Имитационное моделирование — это разновидность компьютерного моделирования, при котором логико-математическая модель исследуемой системы представляет собой алгоритм функционирования системы, программно реализуемый на компьютере [8]. А эксперимент [9] — это многократное проигрывание модели в целях исследования поведения моделируемого объекта при изменении его параметров.

**Исходные условия для создания системы поддержки принятия решения**

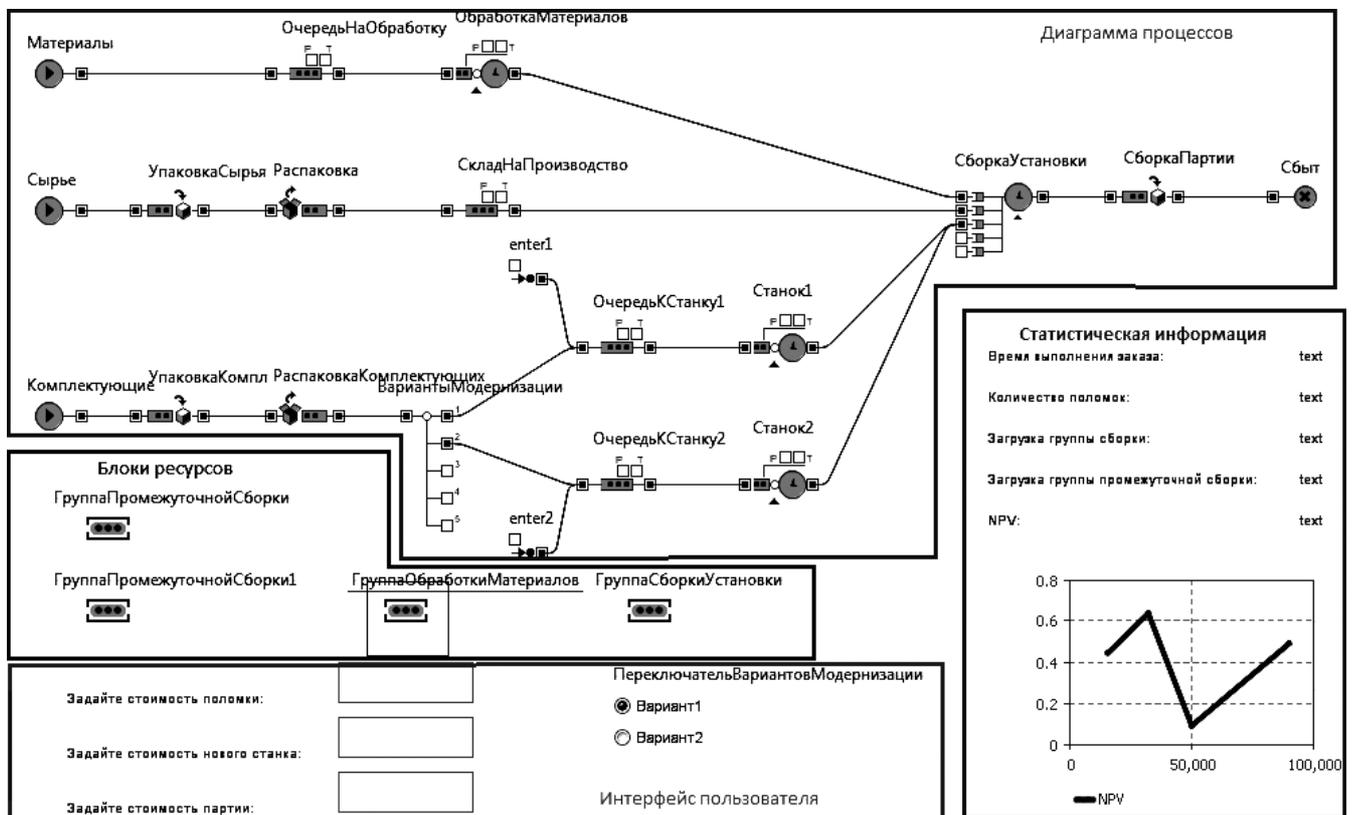
В составе основных фондов предприятия имеется производственная линия по сборке продукции. Назовем выпускаемую ею продукцию установками. Товарной единицей является партия установок. Предположим, что партия установок состоит из пяти штук. Производственная линия имеет три необходимых для производства компонента: материалы, сырье и комплектующие. Установка состоит из 32 единиц материалов, 20 единиц сырья, 9 единиц комплектующих.

Также для осуществления работ требуются трудовые ресурсы. Предположим, что сборку установки осуществляет Группа сборки установки в составе трех специалистов. Перед тем как материалы для сборки установки поступают на склад сборки установки, они обрабатываются Группой обработки материалов, в состав которой включены семь специалистов. Перед тем как сырье поступает на склад Группы сборки установки, оно распаковывается из заводской упаковки и хранится на складе. Перед тем как комплектующие поступают на склад сборки установки, они распаковываются из заводской упаковки и обрабатываются на станке Группой промежуточной сборки, состоящей из одного специалиста.

По условиям задачи, станок, на котором обрабатываются комплектующие, пришел в негодность и не соответствует требованиям заказчика. Есть два варианта инвестирования в данную производственную линию. Первый вариант — ремонт существующего станка. Стоимость капитального ремонта станка — 1 млн руб. Ремонтная служба не дает гарантии, что после ремонта станок будет обеспечивать устойчивую безотказную работу. Второй вариант — приобретение нового станка. На рынке профильного оборудования продается современный станок-аналог сломавшегося станка. Он работает быстрее, и производитель дает долгосрочную гарантию. Требуется создать систему поддержки принятия решения по определению наиболее выгодного варианта инвестиций в основные фонды предприятия. Пользователь должен иметь возможность менять стоимость нового станка, понесенные потери от поломки старого станка, стоимость партии установок.

**Реализация решения в среде AnyLogic 7.0**

Предлагается для решения данной задачи использовать специализированное программное средство AnyLogic. Разработанная по условиям сформулированной задачи имитационная модель в среде AnyLogic представлена на рис. 1. Поле



■ Рис. 1. Структура имитационной модели в среде AnyLogic 7.0

имитационной модели условно разделено на четыре области.

Как материалы и сырье, так и комплектующие в модели участвуют в качестве заявок. Заявка — пассивный объект, составляющий материальный поток [10]. Для генерации трех соответствующих потоков в модели присутствуют три библиотечных блока — Материалы, Сырье, Комплектующие.

Потоки обработки заявок сходятся в библиотечном блоке СборкаУстановки (рис. 2). Для моделирования очередей в потоках обработки в соответствии в постановкой задачи применяются библиотечные блоки ОчередьНаОбработку, СкладНаПроизводство, ОчередьКСтанку1, ОчередьКСтанку2. Для моделирования процесса упаковки-распаковки сырья и комплектующих в модели автором используются библиотечные блоки УпаковкаСырья, Распаковка, Упаковка Комплектующих, РаспаковкаКомплектующих. Для моделирования задержки заявки в целях ее производственной обработки с захватом соответствующих ресурсов в модели применяются библиотечные блоки ОбработкаМатериалов, Станок1, Станок2. Все заявки покидают модель через блок Сбыт. Поскольку в соответствии с условиями задачи конечные заявки формируются из заявок, созданных в трех разных блоках (Ма-

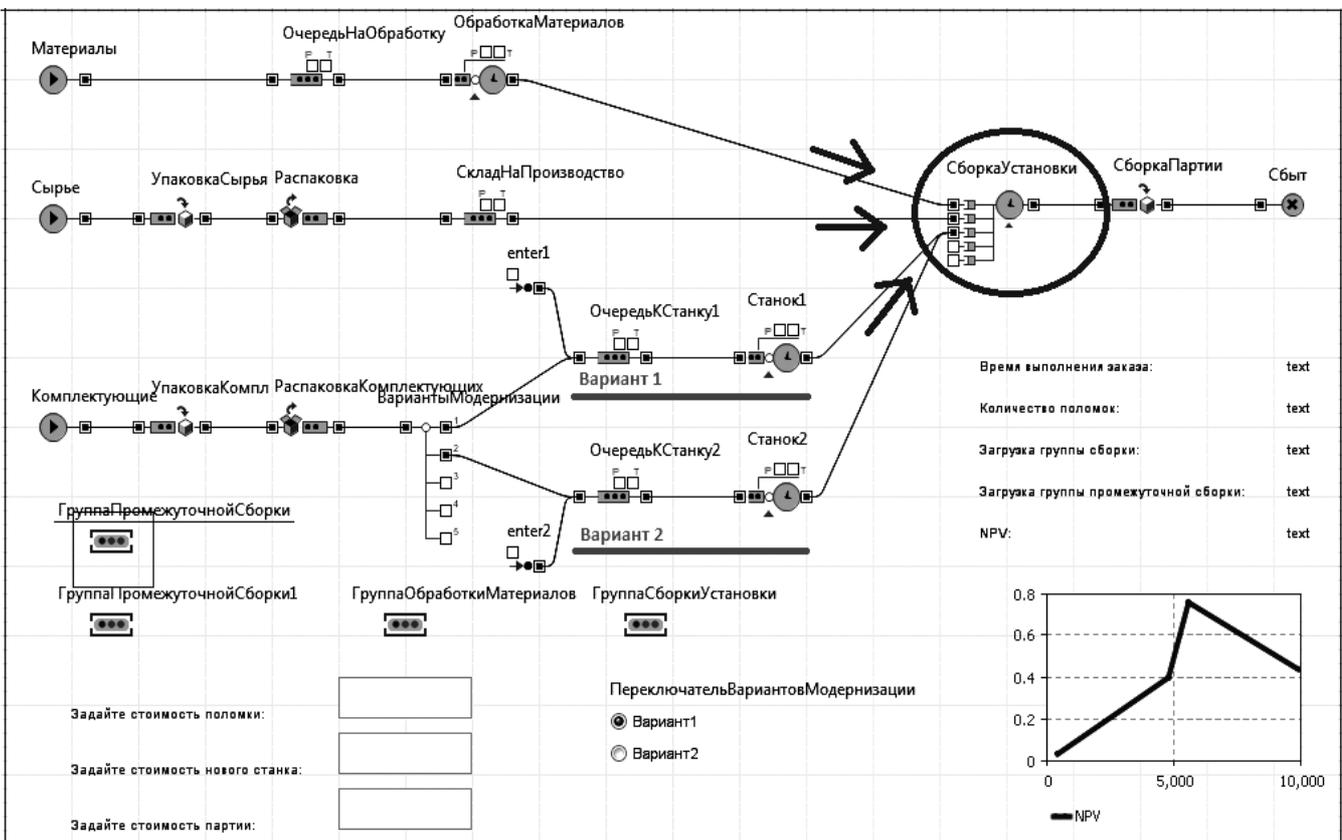
териалы, Сырье, Комплектующие), блок Сбыт является единственным в модели.

Варианты инвестирования представлены в ветви диаграммы, моделирующей процесс обработки материалов (см. рис. 2). Для моделирования наличия двух ветвей модернизации производственной линии автором на диаграмме используется библиотечный блок ВариантыМодернизации. С целью осуществить возможности пользовательского управления ходом имитации модели данный блок связан с элементом управления ПереключательВариантовМодернизации.

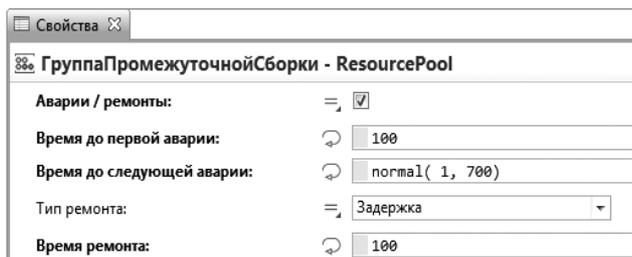
**Вариант 1.** Библиотечный блок Станок1 моделирует подлежащий ремонту станок. В качестве ресурса он использует блок ГруппаПромежуточнойСборки, специально настроенный для моделирования периодических случайных задержек, которые возникают при выходе станка из строя. Отдельный блок свойств представлен на рис. 3.

Функция Java normal генерирует значение согласно нормальному распределению (рис. 4) [5]. Таким образом, событие выхода станка из строя происходит в модельном времени без участия пользователя и по заранее заданному закону распределения.

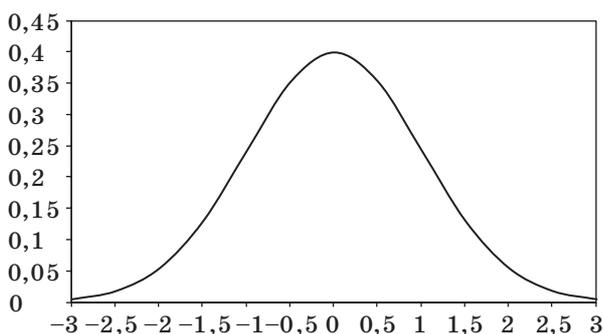
**Вариант 2.** Библиотечный блок Станок2 моделирует ввод в эксплуатацию нового станка. В качестве ресурса он использует блок Группа



■ Рис. 2. Блок сборки установки и варианты модернизации



■ Рис. 3. Свойства блока ГруппаПромежуточнойСборки



■ Рис. 4. Нормальное распределение функции normal

ПромежуточнойСборки1, который не имеет настроек аварий и ремонтов, так как используется новым станком, что предполагает безаварийную эксплуатацию. Для управления экспериментом автором предусмотрено наличие в модели следующих элементов: переключателя вариантов модернизации производственной линии и полей для текстового ввода стоимости поломки, стоимости нового станка, стоимости готовой партии продукции. Переключатель вариантов предназначен для управления потоком заявок. В соответствии с условиями задачи одновременно может работать только один вариант производственной линии. По этой причине в программу добавлен код, позволяющий перенести заявки, оставшиеся внутри ветви после переключения, в поток, выбранный пользователем:

```
int n = ОчередьКСтанку2.size();
for(int i = 0; i < n; i++)
enter1.take(ОчередьКСтанку2.
remove(ОчередьКСтанку2.getFirst()));
```

Поля текстового ввода предназначены для пользовательского ввода соответствующих значений до начала имитации модели. Ввод таких значений, как стоимость поломки станка, стоимость нового станка, стоимость готовой партии продукции, необходим для задания параметров модели, которые участвуют в расчете экономических показателей. Пользовательское управление данными параметрами модели расширяет возможности для более детального исследования без изменения свойств библиотечных блоков модели.

Для поддержки принятия решения в ходе эксперимента на диаграмме отображается статистическая информация о ходе или результатах исполнения имитационной модели. В текстовых полях отображаются следующие числовые значения: Время выполнения заказа, Количество поломок, Загрузка группы сборки, Загрузка группы промежуточной сборки, NPV (Net Present Value). Для наглядности и возможности определения темпа роста NPV на графике она отображается суммарно. Для расчета NPV в модели предусмотрена функция РасчетВыручкиСПартии. Код функции расчета использует заданные пользователем параметры:

```
double Выручка;
if (ВариантыМод==0)
    Выручка=СтоимостьПартии-
(СтоимостьПоломки*КоличествоПоломокМежду
Партиями);
else
    Выручка=СтоимостьПартии;
return Выручка;
```

### Результаты эксперимента

Проведены два эксперимента по выпуску пяти партий готовой продукции. Начальные настройки модели одинаковы для обоих экспериментов.

Первый эксперимент проведен с использованием ветви капитального ремонта имеющегося станка (табл. 1; рис. 5, а). Переключатель вариантов модернизации производственной линии находится в положении Вариант1.

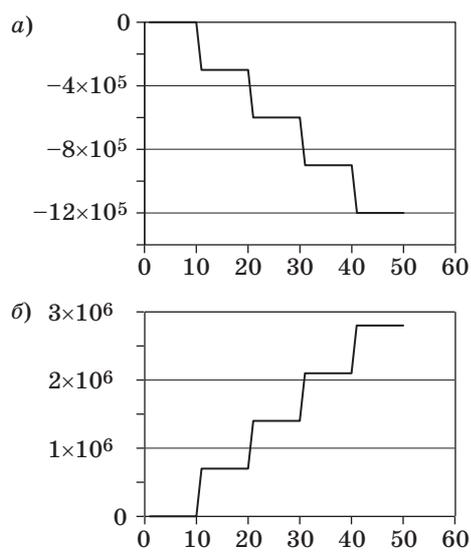
Второй эксперимент проведен с использованием ветви приобретения нового станка (табл. 2; рис. 5, б). Переключатель вариантов модернизации производственной линии находится в положении Вариант 2.

■ Таблица 1. Параметры и результаты эксперимента № 1

Входные данные	Значение	Выходные данные	Значение
Стоимость поломки	500 000	Время выполнения заказа	7858
Стоимость нового станка	1 500 000	Количество поломок	10
Стоимость готовой партии продукции	700 000	Загрузка группы сборки	7858
		Загрузка группы промежуточной сборки	7923
		NPV	-2 500 000

■ Таблица 2. Параметры и результаты эксперимента № 2

Входные данные	Значение	Выходные данные	Значение
Стоимость поломки	500 000	Время выполнения заказа	2732
Стоимость нового станка	1 500 000	Количество поломок	0
Стоимость готовой партии продукции	700 000	Загрузка группы сборки	2732
		Загрузка группы промежуточной сборки	2762
		NPV	2 000 000



■ Рис. 5. График NPV по эксперименту № 1 (а) и № 2 (б)

Первый вариант модернизации производственной линии является невыгодным вложением. Положительные потоки не окупают затрат на регулярный ремонт изношенного оборудования. Приобретение нового станка является наиболее приемлемым вариантом инвестирования. По графику NPV можно определить, что вложение в обновление фондов в текущей ситуации окупится с выпуском третьей партии продукции и с этого момента начнет приносить прибыль.

Построенная имитационная модель отвечает требованиям поставленной задачи: диаграмма соответствует описанному бизнес-процессу, пользователю доступны различные элементы управления для настройки эксперимента, модель наглядно отображает результаты для комплексного анализа вариантов модернизации производственной линии.

Построенная имитационная модель может быть усовершенствована по следующим направлениям:

- расширение перечня статистических данных, собираемых во время имитации;
- расширение перечня рассчитываемых показателей экономической эффективности;
- включение в модель дополнительных бизнес-процессов для более глубокой детализации

и большего соответствия реальной ситуации на предприятии;

- применение встроенной в AnyLogic 3D-анимации для улучшения зрительного восприятия модели непрофильными специалистами;
- встраивание модели в общую модель предприятия при применении подхода поэтапного распределенного моделирования [10].

### Заключение

Планирование проектов в высокотехнологичных и наукоемких отраслях невозможно без учета специфики инвестиционной деятельности. Жизненный цикл инвестиционного проекта предполагает возникновение множества известных и неизвестных рисков. Пренебрежение такими рисками может оказать существенное влияние на результаты проекта.

При разработке инвестиционных проектов применяются многочисленные методы прогнозирования, в частности: методы генерирования идей, ситуационный анализ, трендовый анализ, экспертные методы. Однако практически единственным методом, позволяющим не только формировать различные структуры модельных сценариев, но и количественно оценивать планируемые показатели, является имитационное моделирование [11]. При планировании инвестиционной деятельности предприятия риски возможно представить в качестве неопределенностей соответствующих величин.

Таким образом, в управлении инвестиционными проектами представляется возможным применение системного подхода. Использование имитационного моделирования дает возможность составить перечень наиболее значимых для проекта рисков, провести разносторонний анализ нескольких вариантов бюджета проекта, сравнить различные варианты оптимизации бизнес-процесса проекта. Кроме того, модель проекта может послужить эффективным средством визуализации идеи проекта [12]. Визуализированная модель наглядно отражает суть процесса, повышает качество диалога, совершенствует связи в команде проекта, ускоряет процесс генерации идей.

Использование программных средств для имитационного моделирования позволяет построить

систему поддержки принятия решений для дополнительного исследования и обоснования инвестиционного проекта. Применяя библиотечные блоки и язык программирования Java, в среде AnyLogic возможно построить имитационную модель инвестиционного проекта перевооружения технических мощностей на заданном уровне детализации описания бизнес-процесса. Построение подобных имитационных моделей

может быть ориентировано на различные цели — от оптимизации бизнес-процессов до обоснования экономической эффективности инвестиций.

Представленный подход может быть успешно использован при управлении инвестиционными проектами различных направлений: перевооружение технических мощностей, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, инфраструктурные, инновационные проекты и др.

## Литература

1. **A Guide to the Project Management Body of Knowledge PMBoK®.** — Project Management Institute, 2008. — 463 p.
2. Сулов С. А. Система поддержки принятия решения для планирования развития региональных сетей газоснабжения // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2009. № 12. С. 34–38.
3. Кораблина Н. А., Миронов Е. С. Создание имитационной модели поставщика сервиса для мобильной связи с помощью «ППП AnyLogic» // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. № 2. С. 181–183.
4. Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. — 86 с.
5. Инструмент имитационного моделирования AnyLogic: обзор. <http://www.anylogic.ru/overview> (дата обращения: 17.02.2013).
6. Проекты проектирования и конструкторских работ (ПИР и НИОКР). <http://www.turboproject.ru/service/profs/> (дата обращения: 02.02.2014).
7. Метод оценки рисков в мультиагентной системе управления проектами НИР и ОКР в реальном времени/ Е. М. Клейменова, А. Л. Феоктистов, П. О. Скобелев и др. // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 29–37.
8. Габрин К. Э., Козлова Е. А. Основы имитационного моделирования в экономике и управлении/ ЮУрГУ. — Челябинск, 2004. — 108 с.
9. Титова Ю. Ф. Имитационные модели в среде AnyLogic. — СПб.: ГУАП, 2012. — 132 с.
10. Радаев А. Е., Левенцов В. А. Системы поэтапного имитационного моделирования производственных процессов // Организатор производства. 2011. № 3. С. 30–33.
11. Трумова М. А., Новиков В. Н. Применение агент-ориентированного подхода для моделирования инновационного проекта // Молодежный вестник УГАТУ. 2013. № 3. С. 107–110.
12. Osterwalder A., Pigneur Y. Business Model Generation. — John Wiley & Sons, 2010. — 286 p.

UDC 004.942

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.92

### Production Line Technical Upgrading Investment Project Simulation Model

Stepanov A. G.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Educ., Professor, georgich\_spb@mail.ru

Semin S. G.<sup>b</sup>, Economist, sjomin2006@yandex.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>JSC «АТОМПРОЕКТ», 82, Savushkina St., 197374, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Investment effectiveness evaluation is an integral part of investment project management including technical upgrading projects. Important decisions often have to be made under uncertainty because the specialized software is imperfect, the project effectiveness is affected by various factors, and the data on the internal structure of the project is more difficult to get as the time passes. One of the possible solutions for this problem is using simulation software. **Statement of the problem:** A company has a production line consisting of machines, one of which has become unfit for use. There are two options to solve the problem: to repair the unfit machine or to buy a new one. We have to choose the better option out of these two. **Results:** In AnyLogic environment, a simulation model was built, reproducing the production line structure with the ability to model both options: the existing machine repair and purchasing a new one. The model enables you to calculate the effectiveness indicators in automatic mode. The user interface provides the ability to switch between variants of the model. In two experiments, two cases were tested respectively. The input data for the experiments were the same. The study showed that repairing the machine is a less preferable option than buying a new one. The risk of further damage is too great, and the production process will be continuously accompanied by repair costs. **Conclusion:** The use of the systematic approach, simulation in particular, in order to improve the investment efficiency, for example, in planning technical upgrading projects helps to represent the possible risks as uncertainties and to take into account their impact on the final result.

**Keywords** — Model, Design, Control, Simulation, System Approach, System Dynamic Simulation, Simulation.

## References

1. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge PMBoK®*. Project Management Institute, 2008. 463 p.
2. Suslov S. A. Decision Support Tool for Development Planning of Regional Gas Networks. *Problemy ekonomiki i upravleniia neftegazovym kompleksom*, 2009, no. 12, pp. 34–38 (In Russian).
3. Korablina N. A., Mironov E. S. Creation of a Simulation Model of Mobile Network Service Provider Using the Anylogic Application. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, no. 2, pp. 181–183.
4. Kiseleva M. V. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem v srede AnyLogic* [Simulation Systems in AnyLogic]. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ., 2009. 86 p. (In Russian).
5. *Instrument imitatsionnogo modelirovaniya AnyLogic* [Simulation Tool AnyLogic]. Available at: <http://www.anylogic.ru/overview> (accessed 17 February 2013).
6. *Proekty proektirovaniya i konstruktorskikh rabot (PIR i NIOKR)* [Projects Design and Development Work]. Available at: <http://www.turboproject.ru/service/profs/> (accessed 02 February 2014).
7. Kleymenova E. M., Feektistov A. L., Skobelev P. O., Larukhin V. B., Mayorov I. V., Simonova E. V., Polonchuk E. V. The Method of Risk Assessment for a Multi-Agent System of Real-Time Management of Research and Development Projects. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, no. 2, pp. 29–37 (In Russian).
8. Gabrin K. E., Kozlova E. A. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya v ehkonomie i upravlenii* [Fundamentals of Simulation Modeling in Economics and Management]. Chelyabinsk, YUUrGU Publ., 2004. 108 p. (In Russian).
9. Titova Y. F. *Imitatsionnye modeli v srede AnyLogic* [Simulation Models in AnyLogic]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2012. 132 p. (In Russian).
10. Radaev A. E., Leventsov V. A. Phased System Simulation of Manufacturing Processes. *Organizator proizvodstva*, 2011, no. 3, pp. 30–33 (In Russian).
11. Trumova M. A., Novikov V. N. Application of Agent-Oriented Approach for Innovation Project Modeling. *Molodezhnyj vestnik UGATU*, 2013, no. 3, pp. 107–110 (In Russian).
12. Osterwalder A., Pigneur Y. *Business Model Generation*. John Wiley & Sons, 2010. 286 p.

## Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2013 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>), НЭБ (<http://www.elibrary.ru>) и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/journal/n/informatsionno-upravlyayushchie-sistemy>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2013 гг. вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4200 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4800 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru),

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: [Alfimov@viniti.ru](mailto:Alfimov@viniti.ru), сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: [interpochta@interpochta.ru](mailto:interpochta@interpochta.ru), сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: [krasnodar@interpochta.ru](mailto:krasnodar@interpochta.ru)

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru), сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru), сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.

УДК 338.27:65.011.56

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.100

## ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАСПОРТ КАК ОСНОВА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

С. Г. Бурлуцкий<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцентВ. В. Езерский<sup>б</sup>, доктор техн. наук, профессорИ. А. Хахаев<sup>б</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ<sup>б</sup>ОАО «Научно-исследовательский институт программных средств», Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** при разработке современных систем поддержки принятия решений существует проблема формирования информационного обеспечения, связанная с разнородностью используемой информации по актуальности, качеству и полноте описания субъектов или объектов управления. Целью работы является формирование модифицированного взгляда на функциональное содержание электронного паспорта как базового элемента информационного обеспечения автоматизированных систем поддержки принятия решений. **Результаты:** предложено объединять всю информацию по конкретному объекту или субъекту в метаинформационную структуру — электронный паспорт субъекта (объекта) управления. При этом электронный паспорт целесообразно рассматривать с новых позиций — как комплексное описание объекта или юридического лица (субъекта), включающее сведения о текущих показателях (индикаторах) его состояния или деятельности, что позволяет объединить в одном информационном пространстве статические (условно-постоянные) и динамические изменяющиеся данные о контролируемых объектах или юридических лицах (субъектах). Электронный паспорт представляется как динамическая метаинформационная структура, в которой установлены логические связи между различными аспектами описания реального объекта или субъекта и которая содержит программно-методическое обеспечение, позволяющее на базе первичных статистических данных об объекте (субъекте) контроля формировать набор ключевых показателей деятельности и представлять отчетность о целенаправленном процессе функционирования последних в реальном режиме времени. **Практическая значимость:** электронный паспорт как метаинформационный объект обеспечивает эффективное решение задач мониторинга, бизнес-анализа и управления и может использоваться для организации хранилищ данных разных контролируемых объектов и субъектов самого различного масштаба и назначения — от единичных объектов (зданий и сооружений, технических изделий или устройств) до сложных организационно-технических, социально-экономических и других субъектов управления.

**Ключевые слова** — системы поддержки принятия решений, мониторинг деятельности, электронный паспорт.

### Введение

Управленческое решение в общем случае представляется как социальный акт, направленный на разрешение проблемной ситуации. Принятие решений — один из основных и наиболее ответственных видов деятельности менеджера, поскольку от правильности и своевременности управленческих решений зависит эффективность управления.

Любая задача принятия решения (задача выбора) описывается в виде семиотической системы

$$\langle T, A, K, X, F, G, D \rangle,$$

где  $T$  — постановка задачи;  $A$  — множество допустимых альтернатив;  $K$  — множество критериев выбора (способов оценки эффективности вариантов решения);  $X$  — множество методов измерения отношения между вариантами;  $F$  — отображение множества допустимых вариантов на множество критериальных оценок;  $G$  — система предпочтений экспертов;  $D$  — решающее правило, отражающее эту систему предпочтения [1].

В общем случае схема процесса принятия решения не зависит от той области, в которой принимается решение. Иначе говоря, законы принятия решений едины для всех предметных областей.

Современные системы поддержки принятия решения (СППР), возникшие как естественное развитие и продолжение управленческих информационных систем и систем управления базами данных, представляют собой системы, максимально приспособленные к решению задач повседневной управленческой деятельности, и являются инструментом, призванным оказать помощь лицам, принимающим решения. С помощью СППР могут решаться неструктурированные и слабо структурированные многокритериальные задачи [2].

### Модификация содержания электронного паспорта контролируемого объекта

Важной особенностью применения СППР является наличие исходной информации, позволяющей сформировать множество допустимых

альтернатив, использование которых дает возможность лицу, принимающему решения, впоследствии сделать «правильный» выбор — принять «верное» решение.

Информация, используемая в СППР, должна удовлетворять определенным требованиям [3].

1. *Необходимое и достаточное количество и качество информации*, причем доминирующее значение имеет качественная сторона.

2. *Достоверность и точность информации*. Совершенно недопустимо пользоваться недостоверной и неточной информацией. Если информация является недостаточной или приблизительной, возможно принятие решения с катастрофическими последствиями. Противоречие заключается в том, что абсолютно достоверной и точной информации не существует, а приближающаяся к ней информация мало пригодна для принятия управленческих решений — она довольно быстро устаревает. Недостоверность информации обусловливается не только источниками ее получения, неправильной или неэффективной методикой ее обработки, но и целевыми установками ее преобразования, интерпретацией применения.

3. *Своевременность получения информации*. Информация, необходимая для управления, должна быть своевременной. Требование более раннего представления информации часто может быть связано со значительными материальными и финансовыми затратами (повышенная скорость обработки на ЭВМ и пропускная способность каналов связи, экспертная обработка массивов информации и т. п.). С другой стороны, и запоздалая информация также не представляет практического интереса.

4. *Полнота информации*. В распоряжение руководителя должна поступать информация в достаточном объеме, обеспечивающем эффективное решение всех задач. Редуцированная (усеченная) информация способна резко снизить эффективность управления или даже привести к ошибкам в управлении. Вместе с тем требование полноты информации может граничить с ее избыточностью. Как полнота информации, так и ее неполнота не имеют объективных критериев и ограничений, что не следует относить к достоинствам или недостаткам информации. Это объективное противоречие, которое разрешается в процессе творческого труда каждого руководителя.

5. *Полезность*. Для принятия решения необходима определенная, конкретная информация, остальная образует информационный шум. Выделение полезной информации из шума является сложной аналитической работой и требует больших затрат.

6. *Технологические характеристики информации*, к которым следует отнести плотность ее размещения, возможность сохранения в раз-

личных условиях, скорость обработки, извлечения, распечатки, представления, формы сервиса и т. д. Здесь весьма важны техническое и технологическое совершенство систем, унификация терминологии, порядок составления документов и их представления. Информация должна быть разделена по уровням и звеньям управления, а также по нормативно-справочным, расчетно-аналитическим и другим направлениям. Важной характеристикой является помехоустойчивость информации — способность противостоять как активным, так и пассивным помехам. Высокая помехоустойчивость обеспечивает устойчивое управление, его необходимую конфиденциальность (сохранение коммерческой и государственной тайны). Стоимость информации в системах управления неуклонно возрастает, что обязывает стремиться к постоянному повышению эффективности ее получения и использования.

Одним из важнейших источников информации для СППР может стать электронный паспорт субъекта или объекта управления при условии видоизменения взглядов на его содержательную и функциональную составляющие.

В настоящее время понятие «электронный паспорт» трактуется либо как набор сведений об объектах недвижимости (паспорт фасада, энергетический паспорт, электронный паспорт многоквартирного дома [4]), либо как универсальный идентификатор физического лица (электронный паспорт гражданина [5]).

Однако электронный паспорт также можно рассмотреть с новых позиций — как комплексное описание объекта или юридического лица (субъекта), включающее сведения о текущих показателях (индикаторах) его состояния или деятельности.

Таким образом, в одном информационном пространстве появляется возможность объединить статические (условно-постоянные) и динамически изменяющиеся данные о контролируемых объектах или юридических лицах (субъектах).

К статическим (условно-постоянным) данным можно отнести те, которые уже входят в состав электронных паспортов объектов недвижимости и энергетических паспортов организаций, при необходимости дополнив эти данные сведениями о географическом расположении объекта или субъекта контактной информацией, фотографиями и т. д. Точный состав условно-постоянных данных электронного паспорта зависит от уровня их востребованности в системах поддержки принятия решения (СППР или BI — Business Intelligence [6]).

Новой составляющей электронного паспорта в подобной трактовке являются сведения о состоянии и деятельности описываемого объекта или юридического лица, получаемые в результате

мониторинга деятельности или состояния. К данным мониторинга относятся изменяющиеся со временем характеристики контролируемых объектов или юридических лиц, существенные для формирования управленческих решений.

Электронный паспорт при таком подходе является динамической метаинформационной структурой, в которой установлены логические связи между различными аспектами описания реального объекта или субъекта.

Такие электронные паспорта формируются в хранилище данных системы поддержки принятия решений при сборе информации о контролируемых субъектах (объектах) из различных источников (включая средства автоматизированного сбора первичных данных о текущем состоянии подконтрольного субъекта (объекта)).

Первичные данные, собираемые в процессе мониторинга состояния субъекта (объекта) контроля или деятельности юридического лица, преобразуются в ключевые показатели состояния или деятельности искомых субъектов (объектов) посредством использования программно-методического обеспечения СППР (ПМО СППР). Кроме того, ПМО СППР на основании первичных данных может обеспечить оценки рисков деятельности или состояния в соответствии с predetermined алгоритмами. Далее средствами ПМО СППР проводится анализ ключевых бизнес-показателей и рисков и формируется электронная отчетность, представляемая в виде таблиц и диаграмм. Основной проблемой в данном случае является полнота и непротиворечивость системы ключевых показателей и рисков — соблюдение вышеизложенных требований к представляемой информации для СППР.

Накопление данных мониторинга со временем позволяет выявлять закономерности и строить прогнозы динамики ключевых показателей, применять технологии OLAP для выявления факторов, влияющих на эту динамику. Разнообразие источников первичных данных позволяет реализовать технологии Data Mining при анализе причин инцидентов, использовать методики корреляционного и дисперсионного анализа.

Таким образом, на сегодняшний момент учет текущих ключевых бизнес-показателей в электронном паспорте — это наилучший инструмент для мониторинга и анализа информации об эффективности бизнес-процессов. Это не просто набор графиков и таблиц, а полноценная информационная система, способная интегрировать данные из функциональных автоматизированных информационных систем и проводить бизнес-анализ. Если коммерческая компания или государственная организация прошла все этапы построения системы управления результативностью, но не был создан инструмент для регуляр-

ного сбора и анализа достоверной информации о результативности, то такая система окажется нежизнеспособной. Данные могут остаться разбросанными по различным учетным системам, быть неформализованными и даже основанными на субъективных оценках, которые необходимо регулярно собирать с экспертов. Если процесс сбора, расчета и хранения показателей не автоматизировать и не обобщать в едином информационном пространстве, которое и формируется в электронном паспорте, то информация о результативности бизнес-процессов, подразделений и сотрудников будет собираться не оперативно, может стать устаревшей и бессмысленной с точки зрения принятия решений.

Применение нового подхода к формированию содержательной составляющей электронного паспорта посредством инкапсуляции ключевых показателей состояния — бизнес-показателей субъекта (объекта) управления — позволяет решить эту проблему на новом уровне организации управления бизнес-процессами, соответствующем современным требованиям.

Соответственно изменяется и функциональная составляющая электронного паспорта. Выделим наиболее значимые функции электронного паспорта в нашей трактовке.

1. Мониторинг. Показатели, измеряющие эффективность бизнес-процессов, в электронном паспорте представляются в обобщенном, укрупненном виде. Посредством представления информации в графической форме в виде диаграмм, графиков и таблиц ПМО СППР позволяет мгновенно выявлять критически важную информацию на основании актуальных и релевантных данных, выдавать предупреждающие сигналы при возникновении потенциальных проблем. На информационную панель могут быть выведены ключевые показатели деятельности субъекта (объекта) управления и риски принятия решений.

2. Бизнес-анализ (BI). ПМО СППР, используемое для этих целей, позволяет проводить исследование и анализ данных об эффективности в различных измерениях и с различной степенью детализации, выявлять закономерности и причинно-следственные связи между различными факторами, влияющими на эффективность процесса функционирования субъекта (объекта) управления. При проведении такого анализа лицо, принимающее решение, самостоятельно определяет параметры и измерения формируемых отчетов, может перейти с верхнего уровня группировки (агрегирования) данных до самого нижнего уровня — документа (транзакции) для лучшего понимания ситуации (техника Drill Down).

3. Управление — реализуется через информирование сотрудников о существующих целях

организации, их роли и ответственности в реализации этих целей. ПМО СППР позволяет распределить ответственность между сотрудниками, подразделениями за конкретные бизнес-показатели. Через него реализуется координация усилий подразделений, обеспечивается регулярная обратная связь и стимулирование персонала. Таким образом, для каждого подразделения и сотрудника формируется матрица показателей, за которые они несут ответственность, и она ложится в основу системы премирования сотрудников по результатам их деятельности.

## Заключение

Видоизменение подходов к содержательной и функциональной составляющим электронного паспорта позволит регулярно отвечать на вопросы «Что происходит в субъекте (объекте) управления? Кто виноват? Что делать?». Использование электронного паспорта, содержащего статиче-

скую и динамически обновляемую информацию о состоянии подконтрольного объекта — мощный инструмент организационных изменений. При правильном использовании он может многократно повысить эффективность любой работающей организации. С одной стороны, при таком подходе координируются усилия всех сотрудников в направлении реализации стратегических целей, а с другой стороны, менеджерам всех уровней предоставляется актуальная и достоверная информация о степени достижения этих целей и существующих угрозах.

Подход к формированию электронных паспортов посредством инкапсуляции ключевых показателей состояния контролируемых объектов или субъектов применим для систем поддержки принятия решения в самых различных областях — от обеспечения эксплуатационных характеристик колес железнодорожных вагонов до управления деятельностью территориальных органов федеральных структур и служб.

## Литература

1. **Интеллектуальные системы** принятия проектных решений / А. В. Алексеев, А. Н. Борисов, Э. Р. Вилюмс, Н. Н. Слядзь, С. А. Фомин. — Рига: Зинатне, 1997. — 320 с.
2. **Соболь И. М.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. — М.: Дрофа, 2006. — 175 с.
3. **Баин А. М.** Современные информационные технологии систем поддержки принятия решений. — М.: Форум, 2009. — 240 с.
4. **Постановление** Правительства РФ от 28 декабря 2012 № 1468 «О порядке предоставления органам местного самоуправления информации лицами,

- осуществляющими поставки ресурсов, необходимых для предоставления коммунальных услуг, и (или) оказывающими коммунальные услуги в многоквартирных и жилых домах либо услуги (работы) по содержанию и ремонту общего имущества собственников помещений в многоквартирных домах» // Российская газета. 2013. 1 янв. № 5979.
5. **Проект** Федерального закона Российской Федерации «Об основном документе, удостоверяющем личность гражданина Российской Федерации». <http://www.rg.ru/2013/01/29/elektr-pasport-site-dok.html>. (дата обращения: 15.10.2014).
  6. **Russel J., Cohn R.** Business Intelligence. — М.: Книга по Требованию, 2012. — 101 с.

UDC 338.27:65.011.56

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.100

## Electronic Passport as a Basis of Information Support in Automated Decision Support Systems

Burlutsky S. G.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, sergey\_burluckiy@mail.ru

Ezersky V. V.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, vezerskiy@nii-ps.ru

Khakhaev I. A.<sup>b</sup>, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, ikhakhaev@nii-ps.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Open Joint Stock Company «Scientific Research Institute of Software», 22, ltr. "N". Politekhnikheskaia St., 194021, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** In developing modern Decision Support Systems (DSS), there is a problem of providing information support, as the information in use greatly differs in its relevance, quality and the completeness of the description of objects and management entities. The goal of this research is modifying the view on the functional contents of Electronic Passport as the main component of automated DSS information support. **Results:** It is suggested to merge all the information on a particular object or subject into a meta-information structure named Electronic Passport of the management entity (subject of management). An Electronic Passport should be considered from a new position, as a complex description of an object or legal body (entity) which includes information on its current status or activity values (indexes). This allows us to merge static (semi-constant) and foreground data about the objects under control or subjects

of management in a single information space. An Electronic Passport is a dynamic meta-information structure with established logical associations between different aspects of real object or entity description. It also contains software and methodological support which allows you to form a set of key activity indexes on the basis of initial statistic data on the object or entity and to submit reports on their operation process in a real-time mode. **Practical relevance:** Electronic Passport as a meta-information object provides efficient solutions for monitoring, business-analysis and management problems. Moreover, these innovative Electronic Passports can be widely used to organize data warehouses for various objects and entities of all scales and purposes, from single objects (in construction, machinery or engineering) up to complex management entities: technical, social, economical, etc.

**Keywords** — Decision Support Systems, Operation Monitoring, Electronic Passport.

### References

1. Alekseyev A. V., Borisov A. N., Vilyums E. R., Slyadz N. N., Fomin S. A. *Intellektual'nye sistemy priniatiia proektnykh reshenii* [Intelligent Systems in Engineering Design]. Riga, Zinatne Publ., 1997. 320 p. (In Russian).
2. Sobol I. M. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriiami* [Selection of Multiple Criteria Problems Optimal Parameters]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 175 p. (In Russian).
3. Bain A. M. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii sistem podderzhki priniatiia reshenii* [Modern Information Technologies in Decision Support Systems]. Moscow, Forum Publ., 2009. 240 p. (In Russian).
4. The Russian Federation Government Decree dated December 28, 2012, No. 1468. "O poriadke predostavleniia organam mestnogo samoupravleniia informatsii litsami, osushchestvliaiushchimi postavki resursov, neobkhodimyykh dlia predostavleniia kommunal'nykh uslug, i (ili) okazuyaiushchimi kommunal'nye uslugi v mnogokvartirnykh i zhi-lykh domakh libo uslugi (raboty) po sodержaniyu i remontu obshchego imushchestva sobstvennikov pomeshchenii v mnogokvartirnykh domakh" [On the Procedure of Providing Information to Local Self-Government Authorities by the Bodies Engaged in Supply of Resources Necessary for Communal Services Providing and (or) Communal Services Rendering in Apartment Building and Houses or Maintenance and Repair Services (Works) for the Premises Owners Common Property in the Apartment Blocks]. *Rossiiskaia Gazeta*, 2013, Jan. 11, no. 5979.
5. Draft of the Russian Federation Federal Law "Ob osnovnom dokumente, udostoveriaiuushchem lichnost' grazhdanina Rossiiskoi Federatsii" [About Main Identity Document of a Citizen of the Russian Federation]. Available at: <http://www.rg.ru/2013/01/29/elektr-pasport-site-dok.html>. (accessed 15 October 2014).
6. Russel J., Cohn R. *Business Intelligence*. Moscow, Kniga po Trbovaniuu Publ., 2012. 101 p.

### ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail ([ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

УДК 338.312

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.105

## СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ РЕСУРСНОГО МЕНЕДЖМЕНТА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Е. С. Балашова<sup>а</sup>, канд. экон. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** обеспечение конкурентоспособности бизнеса в условиях стагнации рынка, отягощенной высоким уровнем конкуренции, является непростой управленческой задачей, которая не может быть решена традиционными способами. Фундаментальный вопрос современного менеджмента промышленного предприятия состоит в том, как достигнуть конкурентного преимущества и удержать его. Целью исследования является систематизация современных моделей ресурсного менеджмента промышленного предприятия, выявление их влияния на достижение предприятиями устойчивых конкурентных преимуществ. **Результаты:** проведена систематизация школ ресурсного менеджмента — бережливого производства, теории ограничений, ресурсной теории. Сравнительный анализ их целей показал, что схожие цели — оптимизация затрат и максимизация прибыли — достигаются принципиально по-разному: в бережливом производстве — путем сокращения производственных потерь, в теории ограничений — увеличением пропускной производственной способности, в ресурсной теории — созданием ключевых конкурентных преимуществ. Выявлено, что возможными результатами применения проанализированных школ ресурсного менеджмента на практике может быть повышение качества готовой продукции, снижение уровня операционных затрат, максимизация прибыли, достижение конкурентных преимуществ деятельности. Показано, что организационные построения компаний в зависимости от выбранной модели ресурсного управления принципиально отличаются подходом к удержанию или делегированию основных функциональных областей деятельности. **Практическая значимость:** предложенная систематизация современных моделей ресурсного менеджмента позволит обоснованно выбирать модель, максимально соответствующую сложившейся рыночной конъюнктуре, что в свою очередь даст промышленному предприятию возможность достичь устойчивых конкурентных преимуществ.

**Ключевые слова** — ресурсный менеджмент, бережливое производство, теория ограничений, ресурсная теория, ресурсы, конкурентное преимущество.

### Введение

Одной из главных проблем низкой конкурентоспособности отечественных предприятий на рынке можно назвать проблему ресурсного обеспечения не только текущей производственной деятельности, но и стратегического развития. При этом одним из ключевых факторов низкой эффективности российских предприятий является неполная разработанность методологии сбалансированного комплексного ресурсного управления (менеджмента) основной производственной и инновационной деятельности предприятия, что не позволяет компаниям конкурировать в мировом рыночном пространстве наравне с иностранными производителями. Консолидация экономических ресурсов, используемых в процессе создания добавочной ценности, и их более эффективная организация делают возможным выявление незадействованных производственных резервов и на их основе создание новой организационной архитектуры, способной изменять корпоративную стратегию, генерируя новые технологические и организационные компетенции. В связи с этим возрастает актуальность формирования единой концепции и методологического механизма поиска производственных резервов предприятия на основе современных, доказавших свою эффективность организационно-управленческих инструментов, моделей, методов и методик.

### Систематизация современных моделей ресурсного менеджмента промышленного предприятия

Все научные школы и направления современного ресурсного менеджмента, несмотря на принципиальные отличия в ключевых утверждениях, полемизируют с неоклассической теорией фирмы, рассматривающей экономическую организацию (предприятие) в виде «черного ящика», преобразующего ресурсы в готовый продукт [1]. Поскольку эта теория положена в основу многих экономических моделей, стоит более подробно остановиться на некоторых спорных моментах. Идея «черного ящика» предполагает рассмотрение деятельности предприятия исключительно через производственную функцию, под которой понимается технологическая зависимость количества применяемых ресурсов и объемов произведенной продукции. Различие фактически полученных производственных результатов деятельности обосновывается зависимостью от множества ресурсных комбинаций. Внутренние процессы, происходящие на предприятии, не рассматриваются, считаются несущественными и принципиально не влияющими на результат. Современное исследовательское мнение вне зависимости от принадлежности к конкретной научной школе ресурсного управления считает

подобное упрощение принципиально неверным, так как «модель фирмы в неоклассической теории... не предназначается для объяснения и предсказания поведения конкретных фирм, фирма является теоретическим звеном,... помогающим объяснить связь причины и следствия» [2].

Современное ресурсное управление — это область науки, представленная научными школами и направлениями, рассматривающими проблему эффективности с различных точек зрения и сторон. Однако основные модели имеют сходные цели:

- 1) минимизация совокупных затрат;
- 2) повышение эффективности использования располагаемых ресурсов;
- 3) максимизация прибыли компании;
- 4) максимизация рыночной стоимости бизнеса.

Взрыв интереса к ресурсному управлению во второй половине XX века был обоснован рыночной конъюнктурой, что привело к практически одновременному появлению разных подходов.

Обзор популярных бизнес-философий показывает, что их цели и предположения одновременно поразительно похожи и крайне контрастны. Достоинства каждой модели неизбежно сопровождаются ее недостатками. Достижение заявленных целей (оптимизация затрат и максимизация прибыли) в каждой модели предполагается в соответствии с присущим только ей алгоритмом. Изучение уникальных особенностей моделей ресурсного управления, их достоинств и недостатков дает возможность менеджменту применять соответствующие текущей конъюнктуре управленческие схемы. На наш взгляд, пристальному вниманию заслуживают, прежде всего, такие бизнес-модели, как:

— *Lean Production* (LP) — бережливое производство;

— *Theory of constraints* (ТОС) — теория ограничений;

— *Resource-Based View* (RBV) — ресурсная концепция, ресурсная теория.

Эти модели отличаются, в первую очередь, научными школами, на которых базируются современные ресурсные модели. Так, например, модель менеджмента LP представляет собой чрезвычайно популярную и крайне распространенную систему высокоэффективного менеджмента. *Lean production* построено на одновременном достижении следующих внутренних целей, обеспечивающих конкурентное преимущество компании:

- постоянное сокращение затрат на производство и реализацию продукции;
- непрерывное повышение качества продукции;
- оптимизация скорости движения материального потока согласно логике *just in time* («точное в срок»).

Основная идея заключается в выявлении производственных потерь — действий, за которые потребитель платить не намерен (рис. 1). При этом необходимо отметить, что здесь есть некий разрыв логической цепи — потребитель не платит за действия, в момент совершения покупки им оплачивается конечный продукт или оказываемая услуга. Понимание того, какие действия приводят к созданию этого продукта или услуги, позволяет разделить осуществляемую на предприятии-производителе деятельность на условные группы и по-разному управлять ими. *Lean production* предполагает одновременное воздействие на весь материальный поток (поток создания ценности), основные инструменты LP (*kaizen*, *SPC* и пр.) основаны на идее непрерывного усовершенствования всего процесса деятельности на предприятии. При этом центральным объектом управления является поток создания ценности, а основную идею можно сформулировать как «улучшая процесс, улучшаем результат».

Поток создания ценности — это совокупность всех действий, которые требуется совершить, чтобы определенный продукт (товар, услуга или все вместе) прошел через три важных этапа менеджмента, свойственных любому бизнесу: решение проблем (от разработки концепции и рабочего проектирования до выпуска готового изделия), управление информационными потоками (от получения заказа до составления детального графика проекта и поставки товара), физическое преобразование (от сырья до того, как в руках у потребителя окажется готовый продукт) [3].

По статистике, большинство бизнес-процессов на 90 % состоят из потерь и лишь на 10 % из работы, добавляющей ценность [4].

Другая, не менее известная модель ресурсного управления промышленным предприятием, известная как «теория ограничений», была разработана и предложена Э. Голдраттом в 1980-е гг. Теория ограничений ставит перед менеджментом те же цели, что и LP, но достижение их предпола-



■ Рис. 1. Анализ добавленной стоимости методом Д. Харрингтона

гается по иному принципу, а именно методом так называемой «критической цепи».

В виде цепи предлагается рассмотреть предприятие, при этом основная идея данной модели состоит в сосредоточении управленческого внимания на самом слабом звене цепи. Имеющаяся ресурсная база должна быть направлена на ликвидацию ограничения самого «слабого звена» производственной системы предприятия. Его ликвидация приведет к тому, что прочность цепи — эффективность деятельности всего предприятия — вырастет, но только до следующего в очереди ограничения, т. е. до следующего слабого звена. Таким образом, теория ограничений Голдратта противопоставляет обширному ресурсному управлению системы LP точечную стратегию управления ресурсным потенциалом. Другими словами, LP предлагает рассредотачивать управленческие усилия и имеющиеся ресурсы по компании в целом и добиваться тем самым реализации процесса непрерывного совершенствования — *kaizen*. Теория ограничений, в свою очередь, построена на идее фокусизации ресурсного управления в одной точке производственной системы компании.

Принято считать, что LP и ТОС охватывают, в первую очередь, сферы производственного и оперативного управления промышленным предприятием. При этом ученые-экономисты и практикующие специалисты в области менеджмента отмечают, что «...оба подхода преследуют одну и ту же задачу — управление материальным потоком и непрерывное его улучшение» [5–8]. Логичным и целесообразным представляется их отнесение к моделям ресурсного менеджмента, так как фокус управленческого внимания находится именно в ресурсном управлении. Знаменитая классификация производственных потерь LP (перепроизводство, ожидание, лишние действия, излишняя обработка, складские запасы, дефекты, брак, переработка, потери при транспортировке) строится вокруг повышения эффективности использования располагаемых ресурсов предприятия, их оптимизации и достижения на этой основе заявленных целей. ТОС рассматривает организацию как системы, состоящие из ресурсов, связанных процессами, которые они выполняют. В пределах этой системы ограничение определено тем, что сдерживает ее в достижении более высокой производительности относительно главной цели системы. Р. Мооре и Л. Шайнкоп считают, что две из трех групп ограничений<sup>1</sup> тесно связаны с управлением ресурсными группами — недостаточный объем приобретаемых материальных ресурсов и недостаточная производительность

внутренних (собственных) ресурсов или недостаточная компетентность персонала.

Третья модель современного ресурсного управления — RBV — является новейшей, появившейся в конце XX в. Ресурсная теория так же, как и первые две рассмотренные выше бизнес-модели, представляет собой широкое обобщение производственной функции, отражающей связь между показателями (и результатами деятельности) и затратами ресурсов [9]. С точки зрения ресурсной теории любая организация — это, прежде всего, совокупность различных производительных ресурсов. В дальнейшем ресурсная теория показала свою эффективность для анализа организации в целях ее успешного развития.

Оригинальная особенность данной модели ресурсного менеджмента заключается в логике организационного построения бизнеса. Для минимизации общего уровня затрат следует отдавать на *outsourcing* (использование внешнего источника/ресурса) функции бизнеса, не являющиеся «специфическими относительно фирмы», специфические (их принято называть «ключевыми компетенциями бизнеса» [10]) должны оставаться внутри бизнес-субъекта, т. е. предприятия, их развитие должно принести компании требуемый уровень конкурентоспособности. Следовательно, подобную стратегию ресурсного управления можно условно называть «выборочной», так как, в первую очередь, она основана на отборе ресурсов, являющихся ключевыми компетенциями. Содержательная идея ключевых компетенций состоит в том, что в рамках ресурсного управления их следует всячески развивать и оберегать, в то время как прочие, неоригинальные ресурсы бизнеса следует брать в аренду или отдавать на снабжение со стороны, если сравнительный анализ затрат показывает, что таким образом совокупные затраты на производство и реализацию продукции или сокращаются, или переходят из постоянной компоненты в переменную, зависящую прямо пропорционально от объема производства и реализации.

### Анализ сравнительных характеристик и отличий школ ресурсного менеджмента

Понимание сути отличий моделей ресурсного менеджмента позволяет практически применять ту, достоинства которой могут быть использованы в полной мере, а влияние недостатков — минимизировано. Анализ сравнительных характеристик и отличий различных направлений ресурсного менеджмента (таблица) позволяет определить, при каких исходных условиях применение той или иной теории даст максимальный эффект и как различные теории могут взаимно дополнить друг друга.

<sup>1</sup> Третья группа рассматривает ограничения, возникающие на рынке, — недостаточный объем продаж.

■ Анализ сравнительных характеристик и отличий школ ресурсного менеджмента

Характеристика	LP	ТОС	RBV
Цель	Сокращение производственных потерь	Увеличение пропускной способности	Создание, использование и возобновление конкурентных преимуществ
Фокус управленческого внимания	Поток создания ценности	Ключевые ограничения	Ключевые компетенции
Результат	Снижение производственных затрат и повышение качества продукции	Увеличение производственных мощностей	Устойчивые конкурентные преимущества
Организационное построение предприятия	Удержание функций менеджмента и производственных функций	Системное построение с учетом причинно-следственных связей между ресурсами, процессами и ограничениями	Удержание ключевых компетенций вне зависимости от их функционала
Система управленческого контроля	Встроенный контроль качества процессов	Контроль процессов и элементов системы, содержащих ограничения	Контроль ключевых компетенций
Недостатки	«Производственные потери» подменяют «производственные резервы». Менеджмент сфокусирован только на устранение и (или) минимизацию потерь, что существенно сокращает его эффективность	Реализация теории на практике предполагается через набор практических инструментов, при этом все многообразие форм хозяйственной деятельности, отраслевой специфики, масштабов предприятия и прочих объективных факторов приводит к появлению неоднозначных ситуаций оперативного управления, ответы для которых не конкретизированы	Развитие ключевых компетенций связано, в первую очередь, с обучением персонала. Не умаляя достоинства этого подхода, необходимо отметить, что естественная ротация кадров минимизирует ожидаемый положительный эффект

Модели LP и ТОС появились в бизнес-пространстве практически одновременно. Точнее, LP как TPS<sup>1</sup> была зафиксирована на несколько десятилетий раньше, но полноценное развитие ее методология получила так же, как и ТОС, в середине 80-х г. прошлого века. Как следствие, долгое время в мировом бизнес- и научном пространствах велись дебаты — что делать: применять ТОС или внедрять LP. Обе школы преследуют одну и ту же задачу — управление потоком создания добавочной ценности и непрерывное его улучшение. Автор ТОС Э. Голдратт в одном из своих трудов выступил с критикой подхода «или-или» и предложил «двигаться вместе» [11]. Данный вопрос является по-прежнему предметом оживленных дискуссий, однако практика показывает, что синергия LP и ТОС позволяет добиться потряса-

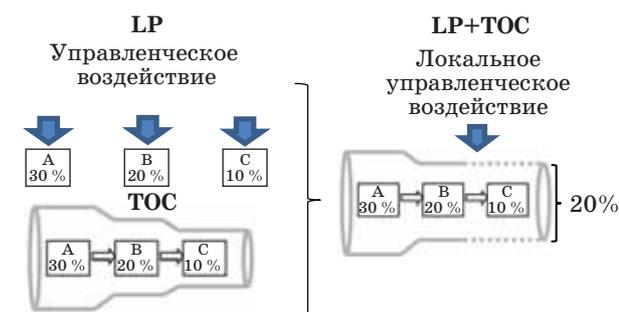
ющих результатов. Так, например, в программе *Tocico 2012 International Conference* был анонсирован доклад Катсуми Оэки (Katsumi Ozeki) [12], в котором обсуждался достигнутый синергетический эффект от комплексного применения данных моделей. Исходя из этой точки зрения, мы думаем, логично параллельно рассмотреть содержательную компоненту обеих школ в сравнении, основные аспекты их интеграции и возможный положительный эффект от их одновременно практического применения.

Сочетание LP и ТОС должно начинаться с определения добавленной ценности конкретной производственной системы, создание которой описывается картой потока процесса, представляющей собой графическую визуализацию процесса производства.

Улучшение потока создания добавочной ценности представляет собой основную цель операционного менеджмента. ТОС по сравнению с LP предлагает более логичную схему процесса непрерывного совершенствования. Методология LP считает, что все участки производственной цепи должны в каждый момент времени подвергаться совершенствованию.

Графически это показано на рис. 2 (вверху слева). Участки А, В и С имеют разные фактические пропускные способности (30, 20 и 10 %).

<sup>1</sup> TPS — Toyota Production System — производственная система Тойоты. В 1985 г. в процессе разработки целевого исследовательского проекта в рамках «Международной программы „Автомобили“» (International Motor Vehicle Program — IMVP) Массачусетского Технологического Института и исследования TPS Джон Крафчик (John Krafcik) предложил в промежуточном отчете A Methodology for Assembly Plant Performance Determination проекта термин «Lean Production». Этот факт считается моментом появления новой современной теории организационного построения промышленного предприятия.



■ Рис. 2. Интеграция LP и TOC

Стратегия непрерывного улучшения по LP предполагает всеобъемлющее воздействие менеджмента — на все три участка, в то время как TOC полагает, что локализация усилий менеджмента приведет к быстрым результатам с меньшей трудоемкостью. Приоритет для проведения улучшений должны получать ресурсы с ограниченной мощностью, т. е. не имеющие достаточной мощности для поддержания потока. Следующими по важности можно назвать ресурсы, не имеющие ограничения, но вызывающие перебои в работе ограниченных ресурсов или приводящие к значительным задержкам потока. Поскольку в реальности всегда есть необходимость идти на компромисс, так как все компании имеют ограниченные ресурсы, синергия TOC и LP представляется весьма оправданной. На ее основе в рамках ресурсного менеджмента появляется возможность выявлять «узкие места» производственной системы предприятия, далее конкретизировать качественно и количественно требуемые ресурсы для «расшировки узких мест» с тем, чтобы достичь необходимого уровня конкурентоспособности системы производственного менеджмента предприятия. Параметры конкурентоспособности могут меняться в зависимости от текущей цели деятельности предприятия и условий внешней среды, в которых оно функционирует. Так, для наукоемких производств ресурсный менеджмент позволяет достичь конкурентоспособности в области снижения себестоимости конечного продукта; для инновационных технологических процессов — сокращения продолжительности этапов разработки и вывода инновационного продукта на рынок; для массового производства — сокращения времени цикла на производство единицы изделия; для материалоемких или энергоемких производств — компенсации используемых материалов организационными технологиями, позволяющими сократить их расход на единицу изделия.

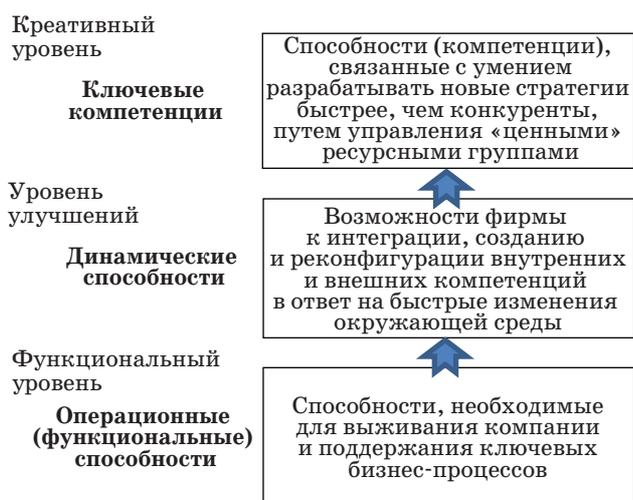
Теория RBV концептуально основывается на принципиально иной позиции по сравнению с LP и TOC, чем и обосновывается ее научная и практическая обособленность. Имея аналогичную первым двум теориям основную стратегическую

цель — достижение долгосрочной конкурентоспособности, она сосредоточивает фокус управленческого внимания не на потоке создания добавочной ценности (LP) или не на его отдельных звеньях (TOC), а исключительно на ресурсных группах. При этом основная дискуссия лежит в научном поле — какие ресурсные группы нужно считать носителями ключевых компетенций. Истоком ресурсной концепции принято считать точку зрения Б. Вернерфельта, который впервые указал на «...полезность анализа фирмы скорее с точки зрения ее ресурсов, чем продуктов...». В новое направление управления бизнесом ресурсный подход выделился в начале 90-х гг. прошлого века. Главный тезис RBV состоит в том, что источником экономических рента являются присущие только этой фирме ресурсы. При этом внимание акцентируется на способности комбинировать имеющиеся ресурсы и тем самым создавать стратегические возможности развития организации.

Центральное понятие RBV трактуется следующим образом: ресурсы — «это специфические относительно фирм активы, которые трудно, если вообще возможно, имитировать» [13]. Эти ресурсы, способные генерировать ренты, Р. М. Грант определяет как «индивидуальные». Под «недифференцированными» понимают вводимые ресурсы, которые «...не характеризуются специфичностью относительно конкретной фирмы...» [14]. RBV, изучая значимость влияния различных ресурсных групп на результат деятельности компании и ее стратегическую конкурентоспособность, особое значение придает рекомбинации ресурсов в ответ на сложившуюся рыночную ситуацию. Таким образом, по мнению авторов RBV, компания обеспечивает требуемые ключевые компетенции, уделяя самое пристальное внимание не формальному анализу факторов производства и управлению ими, а качественному состоянию ключевых ресурсных групп.

В настоящий момент выделяют две концептуальные вариации RBV. Первая из них, традиционная, или структурная, версия исходит из того, что фирмы функционируют на рынках с предсказуемыми параметрами поведения. Комбинация ресурсов задается не самой фирмой, а диктуется процессами, происходящими на рынке. Слабым местом классического подхода является его статичность и отсутствие ответа на вопрос, как ресурсное обеспечение предприятия может адаптироваться к изменениям в рыночной обстановке [15].

Решение данной проблемы первым пытался найти Дж. Тис с соавторами [13], предложивший дополнить RBV методом «динамических способностей» и включить в предмет анализа и управления такие составляющие, как компетенции (способности) и организационный процесс.



■ Рис. 3. Иерархия способностей организации

Динамические способности предприятий являются важными компонентами их конкурентоспособности в рыночных условиях, при этом они во многом определяются имеющимися интеллектуальными ресурсами.

Таким образом, вторая вариация (динамическая, или процессная, концепция) считает, что влияние на формирование комбинаций ресурсов оказывают внутрифирменные процессы, а приносимые ресурсные ренты рассматриваются в духе концепции предпринимательских рент Й. Шумпетера. На наш взгляд, динамическая (процесс-

ная) концепция является наиболее современной и позволяет в полной мере анализировать и оценивать бизнес-процессы промышленных предприятий. Впервые иерархия организационных способностей (компетенций) была проанализирована Д. Коллизом [16] в 1994 г., им было высказано предположение, что она состоит из трех уровней (рис. 3).

На настоящий момент ресурсная теория, как видно из анализа, методологически является наименее проработанной. Это находит свое отражение в том, что LP и ТОС анализируются и сравниваются на основе результатов их практического внедрения, в то время как RBV в деятельности промышленных предприятий представлена крайне эпизодически.

### Заключение

Проведенный анализ эволюции основных школ ресурсного управления, состояния современного ресурсного менеджмента промышленного предприятия, особенностей его подходов, их структурных компонент позволил сформировать сравнительную оценку их достоинств и недостатков и выявить основные пути совершенствования практического ресурсного управления. Результаты исследования говорят об актуальности развития методологии и создания концептуальной модели формирования и достижения долговременных конкурентных преимуществ промышленных предприятий.

### Литература

1. Акулов В. Б. Неоклассическая теория фирмы (рациональность экономических субъектов, решение проблемы рыночного равновесия). <http://economy.ru.com/teoriya-organizatsii-rf/neoklassicheskaia-teoriya-firmyi-ratsionalnost-29955.html> (дата обращения: 03.11.2014).
2. Machlup F. Theories of the Firm: Marginalist, Behavioral, Managerial // The Theory of the Firm: Critical Perspectives on Business and Management. — N. Y.: Routledge, 2000. P. 49–80.
3. Womack J. P., Jones D. T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. — N. Y.: Simon and Schuster, 2003. — 400 p.
4. Liker J. The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. — N. Y.: McGraw-Hill, 2004. — 330 p.
5. Moore R., Scheinkopf L. Theory of Constraints and Lean Manufacturing: Friends or Foes? <http://www.tocca.com.au/uploaded/documents/lean%20and%20toc.pdf> (дата обращения: 03.11.2014).
6. Коуэн О. Теория ограничений и бережливое производство вместе. [http://www.up-pro.ru/library/production\\_management/lean/vmeste\\_teoriya\\_ograicheij\\_i\\_berezhlivoe\\_proizvodstvo.html](http://www.up-pro.ru/library/production_management/lean/vmeste_teoriya_ograicheij_i_berezhlivoe_proizvodstvo.html) (дата обращения: 03.11.2014).
7. Леоншина И. В., Мебадури З. А. Производственные концепции: совместное применение теорий управления производством // Российское предпринимательство. 2010. Вып. 2. № 12(174). С. 42–46.
8. Чакраворти С. Формула успеха: Бережливое производство и Теория ограничений. <http://www.klubok.net/article2571.html> (дата обращения: 03.11.2014).
9. Клейнер Г. Б. Ресурсная теория системной организации экономики // Российский журнал менеджмента. 2011. Т. 9. № 3. С. 3–28.
10. Prahalad C. K., Hamel G. The Core Competence of the Corporation // Harvard Business Review. 1990. Vol. 68. N 3. P. 79–91.
11. Goldratt E. M. Late Night Discussions on the Theory of Constraints. — Great Barrington: North River Press, 1998. — 71 p.
12. Ozeki K. How to Improve Toyota Production System Flow Factory Performance in 6 Days by 60% Increase // TOCICO Intern. Conf. 10th Annual Worldwide

Gathering of TOC Professionals, TOCICO, Chicago, IL, 2012. [http://c.ymcdn.com/sites/www.tocico.org/resource/resmgr/2012\\_conf\\_pdfs/ozeki\\_katsumi\\_toc\\_ico\\_20120.pdf](http://c.ymcdn.com/sites/www.tocico.org/resource/resmgr/2012_conf_pdfs/ozeki_katsumi_toc_ico_20120.pdf) (дата обращения: 03.11.2014).

13. Тис Д. Дж., Пизано Г., Шуен Э. Динамические способности фирмы и стратегическое управление // Вестник СПбГУ. 2003. Сер. 8. Вып. 4. С. 133–185.
14. Грант Р. М. Ресурсная теория конкурентных преимуществ: практические выводы для формулирова-

ния стратегии // Вестник СПбГУ. Сер. 8. 2003. Вып. 3. С. 43–75.

15. Евдокимова С. В. Подходы к проблеме развития динамических способностей организации в сверхконкурентной среде // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 2(22). С. 131–139.
16. Collis D. J. Research Note: How Valuable are Organizational Capabilities? // *Strategic Management Journal*. 1994. Vol. 15. Winter Special Iss. P. 143–152.

UDC 338.312

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.105

### Modern Models of Industrial Enterprise Resource Management

Balashova E. S.<sup>a</sup>, PhD, Econ., Associate Professor, [elenabalashova@mail.ru](mailto:elenabalashova@mail.ru)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya St., 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Ensuring competitiveness of business when the market is stagnant and the competition is strong is a difficult administrative task which cannot be solved by traditional methods. The fundamental problem of modern industrial enterprise management is reaching and holding a competitive advantage. The purpose of this work is systematization of modern models of industrial enterprise resource management and identification of their influence on how enterprises achieve steady competitive advantages. **Results:** The major resource management schools were systematized: lean production, theory of constraints, resource-based view. Their comparative analysis showed that similar goals (cost optimization and profit maximization) are achieved in completely different ways: by minimizing waste in lean production, by increasing productive capacity in TOC, by creating key competitive advantages in RBV. In practice, using the approaches of these resource management schools can result in better quality of finished goods, lower operating expense, profit maximization and achieving competitive advantages. It was shown that organizational structures of companies, depending on the chosen model of resource management, can greatly differ in their approaches to holding or delegating the major functional areas of activity. **Practical relevance:** The proposed systematization of modern resource management models can help you choose the model most appropriate for certain market conditions and achieve steady competitive advantages.

**Keywords** — Resource Management, Lean Production, Theory of Constraints, Resource-Based View, Resources, Competitive Advantage.

### Reference

1. Akulov V. B. *Neoklassicheskaya teoriya firmy (ratsional'nost' ekonomicheskikh sub'ektov, reshenie problemy rynochnogo ravnovesiya)* [Neoclassic Theory of Firm (Rationality of Economic Subjects, Solution of the Problem of Market Balance)]. Available at: <http://economy.ru.com/teoriya-organizatsii-rf/neoklassicheskaya-teoriya-firmyi-ratsionalnost-29955.html> (accessed 03 December 2014).
2. Machlup F. Theories of the Firm: Marginalist, Behavioral, Managerial. In: *The Theory of the Firm: Critical Perspectives on Business and Management*. New York, NY, Routledge, 2000. Pp. 49–80.
3. Womack J. P., Jones D. T. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York, NY, Simon and Schuster, 2003. 400 p.
4. Liker J. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York, NY, McGraw-Hill, 2004. 330 p.
5. Moore R., Scheinkopf L. *Theory of Constraints and Lean Manufacturing: Friends or Foes?* Available at: <http://www.tocca.com.au/uploaded/documents/lean%20and%20toc.pdf> (accessed 03 December 2014).
6. Kouen O. *Teoriya ogranichenii i berezhlyvye proizvodstvo vmeste* [Theory of Restrictions and Economical Production Together]. Available at: [http://www.up-pro.ru/library/production\\_management/lean/vmeste\\_teoriya\\_ograicheij\\_i\\_berezhlyvye\\_proizvodstvo.html](http://www.up-pro.ru/library/production_management/lean/vmeste_teoriya_ograicheij_i_berezhlyvye_proizvodstvo.html) (accessed 03 December 2014).
7. Leonshina I. V., Mebaduri Z. A. Production Concepts: Combined Use of Theories of Production Management. *Rossiiskoe predprinimatel'stvo*, 2010, iss. 2, no. 12(174), pp. 42–46 (In Russian).
8. Chakravorti S. *Formula uspekha: Berezhlyvye proizvodstvo i Teoriya ogranichenii* [Formula of Success: Economical Production and Theory of Restrictions]. Available at: <http://www.klubok.net/article2571.html> (accessed 03 December 2014).
9. Kleiner G. B. The Resource-Based View and the System Organization of Economy. *Rossiiskii zhurnal menedzhmenta*, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 3–28 (In Russian).
10. Prahalad C. K., Hamel G. The Core Competence of the Corporation. *Harvard Business Review*, 1990, vol. 68, no. 3, pp. 79–91.
11. Goldratt E. M. *Late Night Discussions on the Theory of Constraints*. Great Barrington, MA, North River Press, 1998. 71 p.
12. Ozeki K. How to Improve Toyota Production System Flow Factory Performance in 6 Days by 60% Increase. *TOCICO International Conference: 10th Annual Worldwide Gathering of TOC Professionals*, TOCICO, Chicago IL, 2012. Available at: [http://c.ymcdn.com/sites/www.tocico.org/resource/resmgr/2012\\_conf\\_pdfs/ozeki\\_katsumi\\_toc\\_ico\\_20120.pdf](http://c.ymcdn.com/sites/www.tocico.org/resource/resmgr/2012_conf_pdfs/ozeki_katsumi_toc_ico_20120.pdf) (accessed 03 December 2014).
13. Teece D. J., Pisano G., Shuen A. Dynamic Capabilities and Strategic Management. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 8*, 2003, iss. 4, pp. 133–185.
14. Grant R. M. The Resource-Based Theory of Competitive Advantage: Implications for Strategy Formulation. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 8*, 2004, iss. 3, pp. 43–75.
15. Yevdokimova S. V. Approaches to the Development of Organisational Dynamic Capabilities in Hyper Competitive Environment. *Prikaspiyskiy zhurnal: Upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2013, no. 2(22), pp. 131–139 (In Russian).
16. Collis D. J. Research Note: How Valuable are Organizational Capabilities? *Strategic Management Journal*, 1994, vol. 15, winter special iss., pp. 143–152.

**БАЛАШОВА**  
Елена  
Сергеевна



Доцент кафедры экономики и менеджмента недвижимости и технологий Инженерно-экономического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 1997 году окончила Саратовский государственный технический университет по специальности «Экономика и управление в строительстве». В 2000 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Является автором более 30 научных публикаций, в том числе десяти монографий и учебников. Область научных интересов — производственный и ресурсный менеджмент, менеджмент наукоемких отраслей.  
Эл. адрес: elenabalashova@mail.ru

**БЕНДЕРСКАЯ**  
Елена  
Николаевна



Доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 1993 году окончила Ленинградский политехнический институт по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 1996 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 99 научных публикаций. Область научных интересов — мягкие вычисления и нейронные сети, распознавание образов и обработка изображений, нелинейная динамика и теория хаоса, самоорганизация интеллектуальных систем.  
Эл. адрес: helen.bend@gmail.com

**БЛАУНШТЕЙН**  
Натан  
Шаевич



Гражданин Израиля. Профессор кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль. В 1972 году окончил Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника, включая квантовую». В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором около 200 научных публикаций, в том числе десяти монографий, шести учебников, пяти патентов и трех изобретений. Область научных интересов — радиофизика, системы проводной и беспроводной связи, радары, оптика и лидары.  
Эл. адрес: nathan.blaunstein@hotmail.com

**БАЛОНИН**  
Николай  
Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 80 научных публикаций, в том числе трех монографий. Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книги с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети.  
Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

**БЕН-ШИМОЛ**  
Иегуда



Гражданин Израиля. Профессор кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль. В 1986 году окончил Негевский университет им. Бен-Гуриона по специальности «Электротехника и вычислительная техника». В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD). Область научных интересов — проводные и беспроводные системы связи, комбинаторная оптимизация, параллельные, распределенные и символьные вычисления.  
Эл. адрес: benshimo@bgu.ac.il

**БРИТОВ**  
Георгий  
Семенович



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1963 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Авиационное приборостроение». В 1968 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 13 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория надежности и техническая диагностика информационных систем.  
Эл. адрес: bgs@ibi.metrocom.ru

**БУРЛУЦКИЙ  
Сергей  
Геннадьевич**



Заместитель заведующего кафедрой управления и эксплуатации аэрокосмических систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Вильнюсское высшее командное училище радиоэлектроники ПВО по специальности «Командная, тактическая, автоматизированные системы управления», в 1994 году — Гуманитарную академию Вооруженных Сил. В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 27 научных публикаций и восьми патентов на изобретения. Область научных интересов — управление аэрокосмическими системами. Эл. адрес: sergey\_burluckiy@mail.ru

**ГОРОДЕЦКИЙ  
Андрей  
Емельянович**



Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки и техники. В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматика и телемеханика». В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций и 70 изобретений. Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика. Эл. адрес: gorodetskiy@mail23.ipme.ru

**ГРЫЗУНОВ  
Виталий  
Владимирович**



Начальник лаборатории, старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1999 году окончил Военную инженерно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций, одного патента на полезную модель и трех авторских свидетельств на программы для ЭВМ. Область научных интересов — адаптивное управление ИУС в условиях дестабилизации, самоорганизующиеся ИУС. Эл. адрес: viv1313r@mail.ru

**ДОКУЧАЕВА  
Александра  
Николаевна**



Ассистент кафедры высшей математики Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург. В 2004 году окончила Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова по специальности «Информационные системы и технологии». Область научных интересов — математическое моделирование, теория автоматического управления, информационные технологии. Эл. адрес: a.n.dokuchaeva@gmail.com

**ЕЗЕРСКИЙ  
Владимир  
Васильевич**



Профессор, начальник научно-исследовательского отдела ОАО «Научно-исследовательский институт программных средств», Санкт-Петербург. В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Летательные аппараты». В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 190 научных публикаций и восьми патентов на изобретения. Область научных интересов — теория управления сложными организационно-техническими системами, методы разработки, внедрения и сопровождения крупномасштабных IT-проектов. Эл. адрес: ezerskiy2010@yandex.ru

**ЕМЕЛЬЯНОВ  
Валентин  
Юрьевич**



Профессор кафедры систем управления и компьютерных технологий Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург. В 1979 году окончил Ленинградский механический институт по специальности «Системы автоматического управления». В 1987 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 50 научных публикаций и десяти авторских свидетельств. Область научных интересов — проектирование, моделирование и оценка эффективности систем управления летательными аппаратами и автоматизированных систем. Эл. адрес: v.emelyanov@bk.ru

**ЗИНЯКОВ  
Владимир  
Юрьевич**



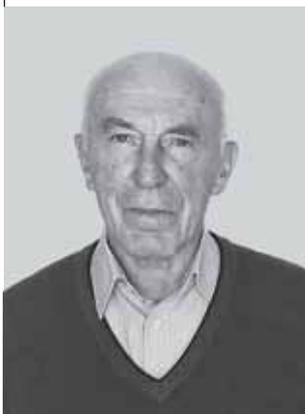
Аспирант кафедры систем и технологий управления Института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Информатика и вычислительная техника». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — системы автоматизированного управления, обработка изображений. Эл. адрес: [vziniakov@gmail.com](mailto:vziniakov@gmail.com)

**КОЗИНОВ  
Игорь  
Александрович**



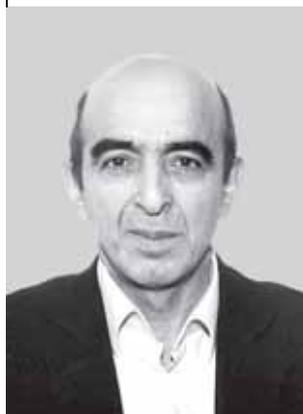
Доцент, докторант кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. В 1999 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах, космические радиотехнические комплексы управления, сбора и передачи информации. Эл. адрес: [garry-spb@yandex.ru](mailto:garry-spb@yandex.ru)

**КУЛИК  
Борис  
Александрович**



Старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электромеханических систем Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург. В 1963 году окончил Ленинградский горный институт им. Г. В. Плеханова по специальности «Техника разведки месторождения полезных ископаемых». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором 90 научных публикаций, включая четыре монографии, один патент и три изобретения. Область научных интересов — искусственный интеллект, методы логического анализа систем, логико-вероятностный анализ. Эл. адрес: [ba-kulik@yandex.ru](mailto:ba-kulik@yandex.ru)

**КУРБАНОВ  
Вугар  
Гариб оглы**



Старший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург. В 1976 году окончил Азербайджанский государственный университет им. С. М. Кирова по специальности «Прикладная математика». В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 50 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование процессов управления, методы логического анализа систем, логико-вероятностные методы. Эл. адрес: [vugar\\_borchali@yahoo.com](mailto:vugar_borchali@yahoo.com)

**ЛАХИН  
Олег  
Иванович**



Руководитель направления ООО «НПК «Разумные решения», Самара. В 1998 году окончил Поволжский институт информатики, радиотехники и связи по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», в 2006 году — Самарский государственный экономический университет по Федеральной программе подготовки управленческих кадров. Является автором 30 научных публикаций. Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени, использующих принципы самоорганизации и эволюции. Эл. адрес: [lakhin@yandex.ru](mailto:lakhin@yandex.ru)

**ЛЕСНЯК  
Денис  
Александрович**



Начальник учебной лаборатории кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2001 году окончил Военный инженерно-космический университет им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы». Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов — защита информации, информационная безопасность. Эл. адрес: [denislesnyk@mail.ru](mailto:denislesnyk@mail.ru)

**МАЛЬЦЕВ**  
**Георгий**  
**Николаевич**



Профессор кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского. В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского. В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций и 26 патентов на изобретения. Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах и др. Эл. адрес: georgy\_maltsev@mail.ru

**НИКИТИН**  
**Кирилл**  
**Вячеславович**



Ассистент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Управление в технических системах». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций. Область научных интересов — теория распознавания образов, нейронные сети и интеллектуальные системы, теория автоматического управления, цифровая обработка сигналов и изображений. Эл. адрес: executer@mail.ru

**ПАНКРАТОВ**  
**Алексей**  
**Владимирович**



Докторант кафедры инженерного анализа Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2001 году окончил Военный инженерно-космический университет им. А. Ф. Можайского по специальности «Системный анализ». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 23 научных публикаций, трех патентов на изобретение и одного на полезную модель. Область научных интересов — проектирование ПЛИС, микроэлектроника, инженерный анализ. Эл. адрес: pankratov-av@rambler.ru

**ПОЛНИКОВ**  
**Александр**  
**Сергеевич**



Аналитик ООО «НПК «Разумные решения», Самара. В 2011 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева по специальности «Техническое обслуживание и эксплуатация авиационных электрических систем и пилотажно-навигационных комплексов», в 2012 году — по специальности «Организация и управление перевозками на транспорте». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени, использующих принципы самоорганизации и эволюции. Эл. адрес: polnikov@smartsolutions-123.ru

**Сеин**  
**Станислав**  
**Георгиевич**



Экономист 2-й категории ОАО «АТОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург. В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Прикладная информатика в экономике». Является автором четырех научных публикаций. Область научных интересов — математические методы в экономике, имитационное моделирование. Эл. адрес: sjomin2006@yandex.ru

**СИМОНОВА**  
**Елена**  
**Витальевна**



Ведущий аналитик ООО «НПК «Разумные решения», доцент кафедры информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С. П. Королева (национального исследовательского университета). В 1985 году окончила Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева по специальности «Автоматизированные системы управления». В 1994 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 125 научных публикаций. Область научных интересов — разработка интеллектуальных систем управления мобильными ресурсами на основе мультиагентных технологий и др. Эл. адрес: simonova.elena.v@gmail.com

**СКОБЕЛЕВ  
Петр  
Олегович**



Ведущий научный сотрудник Института проблем управления сложными системами РАН, профессор кафедры инженерии знаний Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Самара. В 1983 году окончил Куйбышевский авиационный институт им. акад. С. П. Королева по специальности «АСУ и прикладная математика». В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 190 научных публикаций и трех патентов на изобретения. Область научных интересов — мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами в реальном времени и др.  
Эл. адрес: petr.skobelev@gmail.com

**ТАРАСОВА  
Ирина  
Леонидовна**



Доцент, старший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург. В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Автоматические системы управления». В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.  
Эл. адрес: til@msa2.ipme.ru

**ХАХАЕВ  
Иван  
Анатольевич**



Доцент, руководитель Центра компетенции свободного программного обеспечения ОАО «Научно-исследовательский институт программных средств», Санкт-Петербург. В 1988 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Опτικο-электронные приборы». В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором 69 научных публикаций. Область научных интересов — оптимизация архитектур гетерогенных открытых автоматизированных информационных систем государственных учреждений и бюджетных организаций.  
Эл. адрес: ivankhakhaev@gmail.com

**СТЕПАНОВ  
Александр  
Георгиевич**



Доцент, заведующий кафедрой информационных технологий в экономике и менеджменте Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1972 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоинженер». В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора педагогических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — методика преподавания информатики в высшей школе, цифровая обработка сигналов.  
Эл. адрес: georgich\_spb@mail.ru

**ФРИДМАН  
Александр  
Яковлевич**



Профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий управления промышленно-природными системами Института информатики и математического моделирования Кольского научного центра РАН, Апатиты. В 1975 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина). В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 230 научных публикаций, в том числе трех монографий, 22 учебных пособий и 16 изобретений. Область научных интересов — моделирование комплексных технологий и их воздействия на окружающую среду, прикладные интеллектуализированные системы.  
Эл. адрес: fridman@iimm.ru

**ЧЕПРУКОВ  
Юрий  
Васильевич**



Доцент кафедры сервиса инженерных систем и естественно-научных дисциплин Российского государственного университета туризма и сервиса, филиал в Сочи. В 1976 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Радиофизика и электроника». В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 20 научных публикаций и трех авторских свидетельств на изобретения. Область научных интересов — теория радиолокации и связи, методы проектирования устройств формирования и обработки сложных сигналов, вычислительные и информационные системы.  
Эл. адрес: chuv52@mail.ru



ISSN 1684-8853



**XI Международная специализированная выставка  
Передовые Технологии Автоматизации  
ПТА-Урал 2015**



**17-19 ноября**

**Екатеринбург, ЦМТЕ, ул. Куйбышева, д. 44Д**

**Тематика:**

- Автоматизация промышленного предприятия и технологических процессов
- Бортовые и встраиваемые системы
- Системная интеграция и консалтинг
- Автоматизация зданий
- Системы пневмо- и гидроавтоматики
- Измерительные технологии и метрологическое обеспечение
- Электротехника. Электроэнергетика



*Совместно с выставкой «Электроника-Урал 2015»  
и VI Специализированной конференцией «АПСС-Урал 2015»*

**Организатор:**  
**Экспотромтех**  
**www.pta-expo.ru**

**Москва**  
Тел.: +7 (495) 234-22-10  
E-mail: info@pta-expo.ru

**Екатеринбург**  
Тел.: +7 (343) 376-24-76  
E-mail: info@ural.pta-expo.ru