

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

---

---

Информатика. Телекоммуникации.  
Управление

---

---

**4(224) 2015**

Издательство Политехнического университета  
Санкт-Петербург  
2015

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА**

**Председатель**

*Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН;

**Редакционный совет:**

*Абрамов С.М.*, чл.-кор. РАН;

*Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;

*Воеводин В.В.*, чл.-кор. РАН;

*Заборовский В.С.*, д-р техн. наук, профессор;

*Козлов В.Н.*, д-р техн. наук, профессор;

*Фотиади А.Э.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;

*Черноруцкий И.Г.*, д-р техн. наук, профессор.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА**

**Главный редактор**

*Коротков А.С.*, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

**Редакционная коллегия:**

*Бабкин А.В.*, д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

*Ицыксон В.М.*, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

*Prof. Dr. Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

*Карнов Ю.Г.*, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

*Клавдиев В.Е.*, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

*Prof. Dr. Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

*Кучерявый Е.А.*, канд. техн. наук, профессор, Tampere University of Technology, Finland.

*Dr. Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

*Макаров С.Б.*, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

*Prof. Dr. Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

*Устинов С.М.*, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

*Цикин И.А.*, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

*Шкодывев В.П.*, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия.

*Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.*

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Подписной индекс **47517** в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тел. редакции (812) 552-62-16.

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



**ST. PETERSBURG STATE  
POLYTECHNICAL UNIVERSITY  
JOURNAL**

---

---

Computer Science.  
Telecommunications and Control Systems

---

---

**4(224) 2015**

Polytechnical University Publishing House  
Saint Petersburg  
2015

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL  
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

**EDITORIAL COUNCIL**

**Head of the editorial council**

Prof. Dr. *Rafael M. Yusupov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences)

**Members:**

Prof. Dr. *Sergey M. Abramov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

Prof. Dr. *Vladimir V. Voevodin* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

**EDITORIAL BOARD**

**Editor-in-chief**

Prof. Dr. *Alexander S. Korotkov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

**Members:**

Prof. Dr. *Alexandr V. Babkin*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsykson*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Prof. Dr. *Yuri G. Karpov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir E. Klavdiev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Yevgeni Koucheryavy*, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Prof. Dr. *Sergey B. Makarov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

*The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).*

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The publications are presented in the VINITI RAS Abstract Journal and Ulrich's Periodical Directory International Database.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

Subscription index **47517** in the «Press of Russia» Joint Catalogue.

The journal is on the Russian Science Citation Index (RSCI) database

© Scientific Electronic Library (<http://elibrary.ru/>).

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015

## Содержание

### **Информационные технологии**

**Ефремова О.А., Плеханов С.В., Саубанов О.С.** *Интеграция информационных систем городских экстренных служб на основе многомерных моделей данных* ..... 7

### **Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов**

**Пятак И.М., Леонтьев Е.В.** *Моделирование радиотехнических устройств с регулируемыми параметрами в среде LABVIEW*..... 19

### **Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем**

**Устинов С.М.** *О решении линейной задачи наименьших квадратов с линейными ограничениями-неравенствами*..... 25

### **Программное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем**

**Подкопаев А.В., Коровянский А.Ю., Озерных И.С.** *Языконезависимое форматирование текстов программ на основе сопоставления с образцом и синтаксических шаблонов* ..... 37

### **Аппаратное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем**

**Алябьев А.Ю.** *Применение технологии атомно-слоевого осаждения оксида гафния в производстве элементов электронной компонентной базы* ..... 51

### **Системный анализ и управление**

**Козионов А.П., Пяйт А.Л., Мохов И.И., Иванов Ю.П.** *Алгоритм обнаружения аномального состояния дамбы на основе вейвлет-преобразования и одноклассовой классификации одномерных сигналов*..... 59

**Бурдаков С.Ф., Шагннев О.Б.** *Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля*..... 70

### **Информационные, управляющие и измерительные системы**

**Муравьев С.В., Маринушкина И.А.** *Обоснование выбора числа участников межлабораторных сличений*..... 81

### **Интеллектуальные системы и технологии**

**Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А.** *Формальное построение цепочек транспортной активности городского населения*..... 91

**Буштрук Т.Н., Царыгин М.В., Кленюшин Д.С.** *Компьютерный обучающий комплекс для персонала предприятий вагонного хозяйства с модулем идентификации и прогнозирования временных рядов*..... 105

## Contents

### Information Technologies

- Efremova O.A., Plekhanov S.V., Saubanov O.S.** *Integration of the Urban Emergency Services Information Systems on the Basis of Multidimensional Data Models* ..... 7

### Circuits and Systems for Receiving, Transmitting and Signal Processing

- Piatak I.M., Leontiev E.V.** *Design of Electronic Devices with Adjustable Parameters in LABVIEW*..... 19

### Simulations of Computer, Telecommunications, Control and Social Systems

- Ustinov S.M.** *On the Solution of a Linear Least Squares Problem with Linear Inequality Constraints* ..... 25

### Software of Computer, Telecommunications and Control Systems

- Podkopaev A.Yu., Korovianskii A.Yu., Ozernykh I.S.** *A Language-Independent Code Formatting by Syntactic Matching and Templates* ..... 37

### Hardware of computer, Telecommunications and Control Systems

- Aliabev A.A.** *Atomic Layer Deposition Technology for Electronic Components Production*..... 51

### System Analysis and Control

- Kozionov A.P., Pyayt A.L., Mokhov I.I., Ivanov Yu.P.** *An Algorithm for Detecting Abnormal Dike State Based on Wavelet Transform and One-Class Classification of One-Dimensional Signals*..... 59

- Burdakov S.F., Shagniev O.B.** *Mechanics Models in the Control Problem of the Force Interaction between a Robot and a Free-Formed Surface*..... 70

### Information, Control and Measurement Systems

- Muravyov S.V., Marinushkina I.A.** *Towards a Justification of Choosing the Number of Participants for Interlaboratory Comparisons* ..... 81

### Intellectual Systems and Technologies

- Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** *The Formal Development of Patterns of Daily Travel Activity Chains of the Urban Population*..... 91

- Bushtruk T.N., Tsarygin M.V., Klenjushin D.S.** *A Training Computer Complex for the Staff of Railcar Depot Enterprises with Identification and Time Series Forecasting Module* ..... 105

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.1

УДК 004:046

*О.А. Ефремова, С.В. Плеханов, О.С. Саубанов*

**ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ГОРОДСКИХ ЭКСТРЕННЫХ СЛУЖБ НА ОСНОВЕ  
МНОГОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДАННЫХ**

*О.А. Efremova, S.V. Plekhanov, O.S. Saubanov*

**INTEGRATION OF THE URBAN EMERGENCY SERVICES INFORMATION  
SYSTEMS ON THE BASIS OF MULTIDIMENSIONAL DATA MODELS**

Изучено проектирование информационных систем для поддержки принятия решений по организации экстренной помощи населению на муниципальном уровне. Рассмотрены вопросы, возникающие при интеграции разнородных информационных систем с различной архитектурой и структурой баз данных. Предложено применение многомерных и расширенных многомерных информационных объектов для совместного описания баз данных разной структуры. Рассмотрены различные схемы интеграции ведомственных информационных систем.

**ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА; ЭКСТРЕННЫЕ СЛУЖБЫ ГОРОДА; ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ; МНОГОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ДАННЫХ; МНОГОМЕРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОБЪЕКТЫ; СИСТЕМА-112; ИНТЕГРАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.**

The article deals with the integration of information systems for emergency assistance decision support at the municipal level. There are different emergency services maintaining their own information systems with incompatible data structures. In many cases, information interchange for a coordinated response from more than one service is required. The article studies the problems of the integration of heterogeneous information systems with different architectures and database structures. The use of multidimensional and extended multidimensional objects for combined description of the databases with different structures is considered. Various integration schemes for different information systems are discussed. An example of the integration of information systems of emergency services of the city of Ufa is given.

**INFORMATION SYSTEM; THE CITY EMERGENCY SERVICES; DECISION MAKING SUPPORT; MULTIDIMENSIONAL DATA MODEL; MULTIDIMENSIONAL DATA OBJECTS; THE SYSTEM-112; THE INTEGRATION OF INFORMATION SYSTEMS.**

В различных субъектах РФ согласно Постановлению Правительства РФ от 16 марта 2013 года № 233 ведутся работы по созданию системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру 112 (Система-112).

Основная цель создания данной системы – повышение безопасности населения РФ и снижение социально-экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций и про-

исшествий путем сокращения времени реагирования экстренных оперативных служб при обращении населения по единому номеру 112.

В рамках создания «Системы-112» предполагается решить следующие задачи:

- 1) создать телекоммуникационную инфраструктуру системы;
- 2) создать информационно-техническую инфраструктуру системы;

3) разработать научно-методическое обеспечение создания и функционирования системы;

4) создать систему обучения персонала.

На территории Республики Башкортостан начаты работы по созданию «Системы-112» для города Уфы. Так как Уфа является крупным мегаполисом, а также центром нефтехимической промышленности Республики, создание подобного рода системы актуально.

В ходе разработки научно-методического обеспечения «Системы-112» в Уфе возникла проблема интеграции уже существующих и успешно функционирующих информационных систем различных экстренных служб города (01, 02, 03, 04) в единое информационное пространство.

Анализ функционирования экстренных служб Уфы показал, что в каждой из них имеется собственная уникальная информационная система, которая решает специфические задачи данной службы. В качестве особенностей информационных систем экстренных служб Уфы можно выделить следующее. Во-первых, рассматриваемые

информационные системы (ИС) реализованы с применением различных информационных технологий и представлены в виде облачных, клиент-серверных или настольных ИС. Во-вторых, для управления данными в этих ИС используются разные системы управления базами данных (СУБД), такие как MS SQL Server, SQLite, MySQL, Oracle и др. В-третьих, рассматриваемые информационные системы развернуты и функционируют на различных платформах: Windows, Mac OS, Linux, IOS, Android и др. Для работы с информационными системами экстренные службы используют различные устройства и клиенты, такие как мобильные приложения, тонкий клиент (браузер), полноценное приложение для персональных компьютеров и др.

Так, для решения задач, поставленных перед станциями Скорой медицинской помощи населению, создана система, базирующаяся на облачной технологии, архитектура которой приведена на рис. 1. Для регистрации и обработки сообщений о происшествиях, поступающих на телефон дежурному оператору 02 и операторам 02

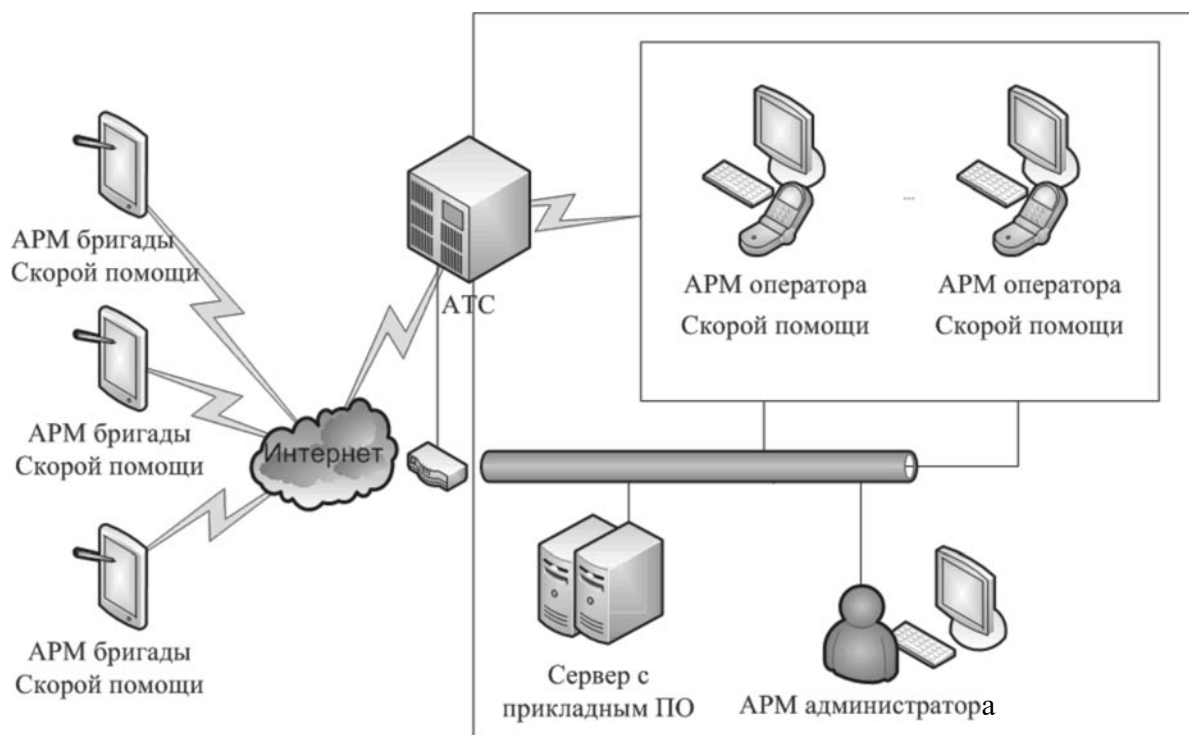


Рис. 1. Архитектура информационной системы экстренной службы «03»



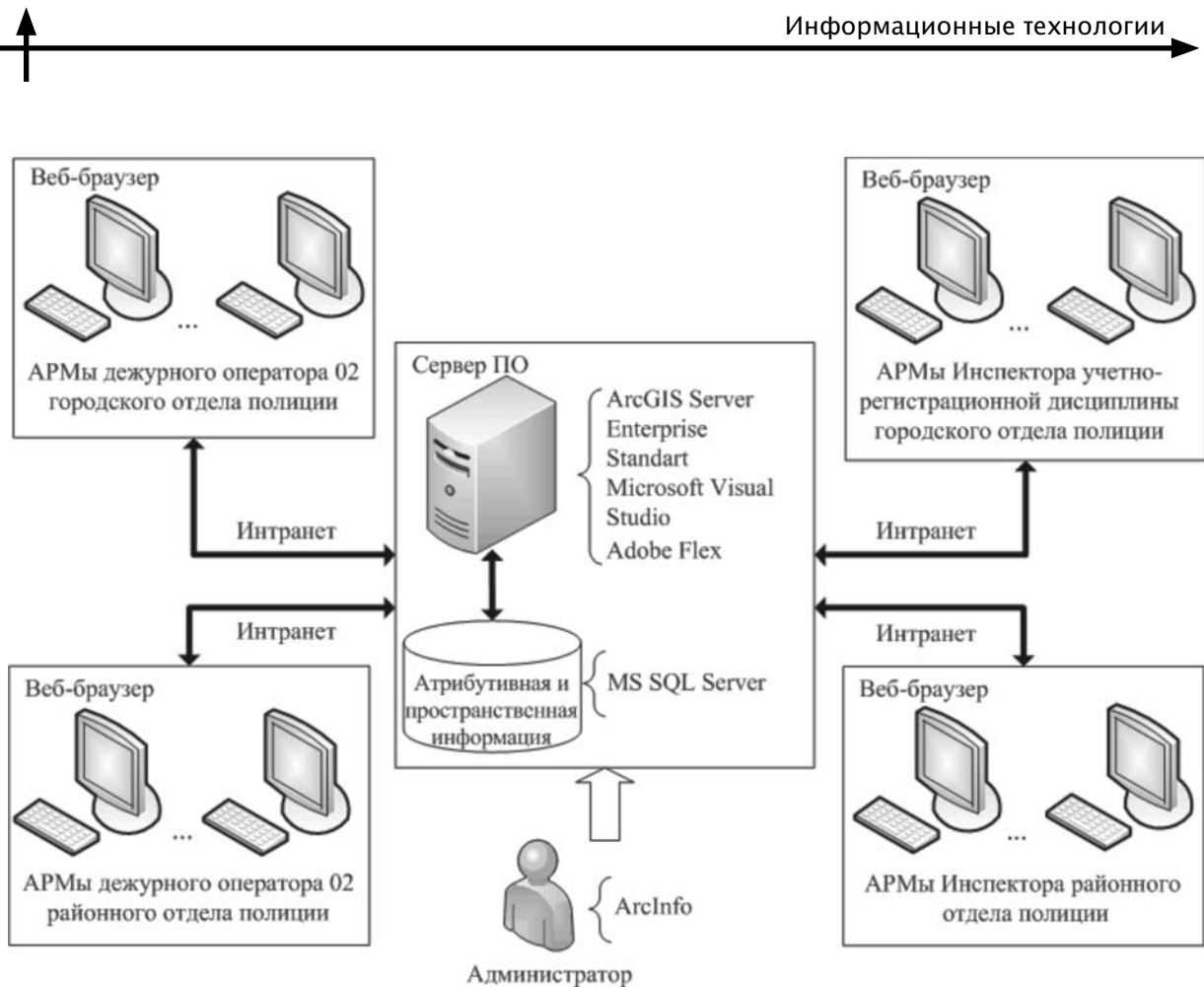


Рис. 2. Архитектура информационной системы экстренной службы «02»

городских отделов полиции Уфы, а также для поддержки принятия решений сотрудниками органов внутренних дел по реагированию на поступившие сообщения создана информационная система экстренной службы «02» [1, 2], архитектура которой приведена на рис. 2. Для регистрации сообщений о пожарах в экстренной службе «01» установлено настольное программное обеспечение, реализующее функцию ведения журнала учета звонков о пожарах на территории города.

Однако, как показывает практика, в крупных мегаполисах часто происходят происшествия, требующие привлечения нескольких экстренных служб одновременно. Для осуществления правильной координации экстренных служб по реагированию на происшествие необходимо решить задачу создания единого информационного пространства обмена информацией между экстренными службами города [3, 4].

Из-за отличий архитектурных решений информационных систем экстренных служб, для организации единого информационного пространства обмена данными между ними и службой «112» (рис. 3) возникает необходимость в разработке технологии интеграции данных систем [5, 6].

**Цели и задачи исследования.** Цель исследования – разработка технологии интеграции информационных систем экстренных служб города, в рамках которой должно быть обеспечено полноценное функционирование «Системы-112», а также взаимодействие информационных систем экстренных служб по оказанию помощи населению для уменьшения социально-экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций и происшествий, путем сокращения времени реагирования экстренных служб при обращении населения по единому номеру 112.

В рамках исследования необходимо осуществить:

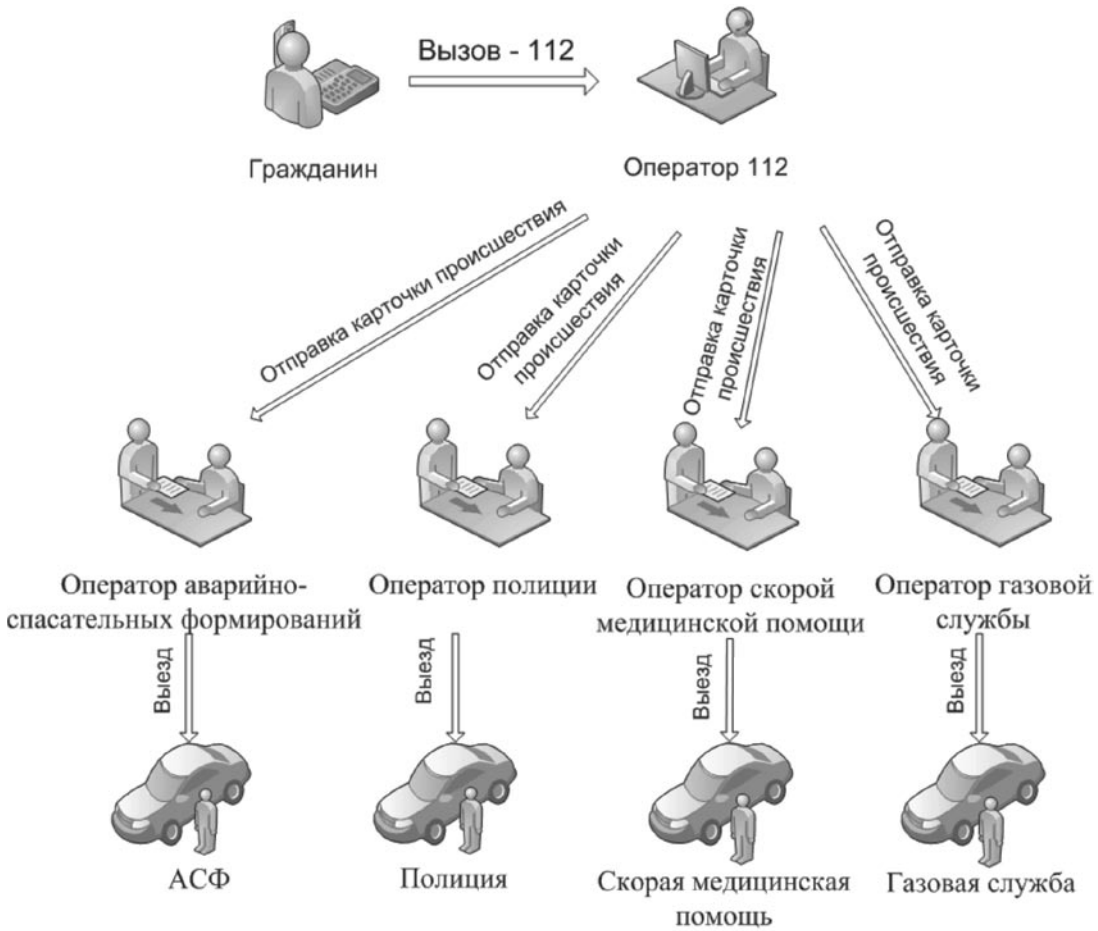


Рис. 3. Функциональная модель взаимодействия экстренных служб города при обращении по единому номеру 112

1. Анализ состава и структуры данных в этих системах.

2. Разработку методов совместного описания данных информационных систем экстренных служб города.

3. Анализ способов интеграции информационных систем экстренных служб города.

**Анализ состава и структуры данных информационных систем экстренных служб города.** Для осуществления интеграции информационных систем экстренных служб города необходимо в первую очередь провести анализ данных, с которыми работают существующие информационные системы экстренных служб города: следует выяснить, какую структуру они имеют, какую информацию нужно получить для принятия предварительного решения об оказании помощи при происшествии.

Анализ состава и структуры данных информационных систем показал, что все информационные системы оперируют как атрибутивной, так и пространственной информацией. Причем, исходя из специфики функционирования информационных систем экстренных служб, каждая из них оперирует некоторым множеством данных  $U_i$ , в котором можно выделить некоторое общее подмножество данных  $V$ , общее для всех:

$$U_i = \{V, T_i\}, \quad (1)$$

где  $i = \overline{1, n}$  – номер экстренной службы.

Подмножество  $V$  содержит данные о месте происшествия (адрес, координаты) и данные о заявителе (фамилия, имя, отчество, адрес, телефон):

$$V = \{A, F, K\}, \quad (2)$$

где  $A$  – множество данных о происшествии;



$F$  – множество данных о заявителе;  $K$  – координаты места происшествия.

Как видно из представленной на рис. 4 логической информационной модели взаимодействия информационных систем экстренных служб города, состав и структура данных систем частично совпадает. Однако это совпадение не позволяет сформировать структуру интегрированной базы данных «Системы-112» как простую сумму структур баз данных ведомственных информационных систем, т. к. это приведет как минимум к дублированию информации. Для исключения дублирования и обеспечения целостности и непротиворечивости данных в разрабатываемой информационной системе необходимо описание всех ведомственных данных в рамках общей информационной модели.

**Разработка методов совместного описания данных информационных систем экстренных служб города.** Как показано в ряде работ [7–10], существуют различные способы построения баз данных на основе отдельных массивов разнородных данных, структура которых частично совпадает. Для построения интегрированной базы данных городских экстренных служб предлагается использовать описанные в [7, 8] многомерные информационные объекты (МИО) и их модификацию – расширенные многомерные информационные объекты (РМИО). Данные объекты соответствуют МИО той же размерности по схеме и МИО меньшей размерности по информационному наполнению, что позволяет описывать базы данных разной структуры и операции над ними в рамках одной модели.

В случае совместного описания атрибутивных и пространственных данных, использование упомянутых выше объектов позволяет представлять отношения базы данных в виде РМИО размерности 3 – такой же, как и МИО, описывающие соответствующие объекты в базе пространственных данных с учетом различных уровней детализации (масштабов). При этом информационное наполнение таких объектов соответствует двумерным МИО, а согласование размерностей достигается за счет введения фиктивной размерности, соответствующей

размерности степени детализации (масштаба). Проекция РМИО по любому элементу фиктивной размерности дает двумерный МИО, соответствующий исходному отношению в базе данных (БД).

Обозначим РМИО как

$$T^{a,b}, \quad (3)$$

где  $a$  – количество реальных размерностей;  $b$  – количество фиктивных размерностей;  $T^{a,0} = T^a$ .

Для получения РМИО из МИО меньшей размерности введем операцию расширения:

$$T^{n,1} = I(T^n, Y) = \{T^n\} * Y, \quad (4)$$

где множество  $Y$  определяет элементы фиктивной размерности и соответствует схеме той же размерности в МИО, с которым предполагается объединять РМИО.

Последовательное применение нескольких операций расширения позволяет получить РМИО любой размерности, больше размерности исходного МИО, что может быть обозначено как

$$T^{n,m} = I(T^n, \{Y_i\}) = T^n * \{Y_i\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где множество  $Y_i$  задает порядок вхождения  $T^{n,i-1}$  в  $T^{n,i}$ .

Схема такого объекта будет иметь вид:

$$S^{n,m} = S(T^{n,m}) = \{S^n, D_1, \dots, D_m\}, \quad (6)$$

где  $S^n$  – реальные размерности;  $D_1, \dots, D_m$  – фиктивные размерности.

На рис. 5 а и б изображены графические представления МИО для описания классов объектов атрибутивной и географической (БГД) баз данных при помощи многомерной и расширенной многомерной моделей. Как видно из рис. 5 в, расширенное многомерное представление позволяет рассматривать атрибутивные и пространственные данные как МИО одной структуры. Такое согласование позволяет объединять их при помощи операции (4) в единый МИО (6).

Используя введенное понятие расширенного многомерного информационного объекта, можно представить многомерную модель данных «Системы-112» в виде РМИО  $T^{3,1}$  со следующей схемой  $S^{3,1}$ :

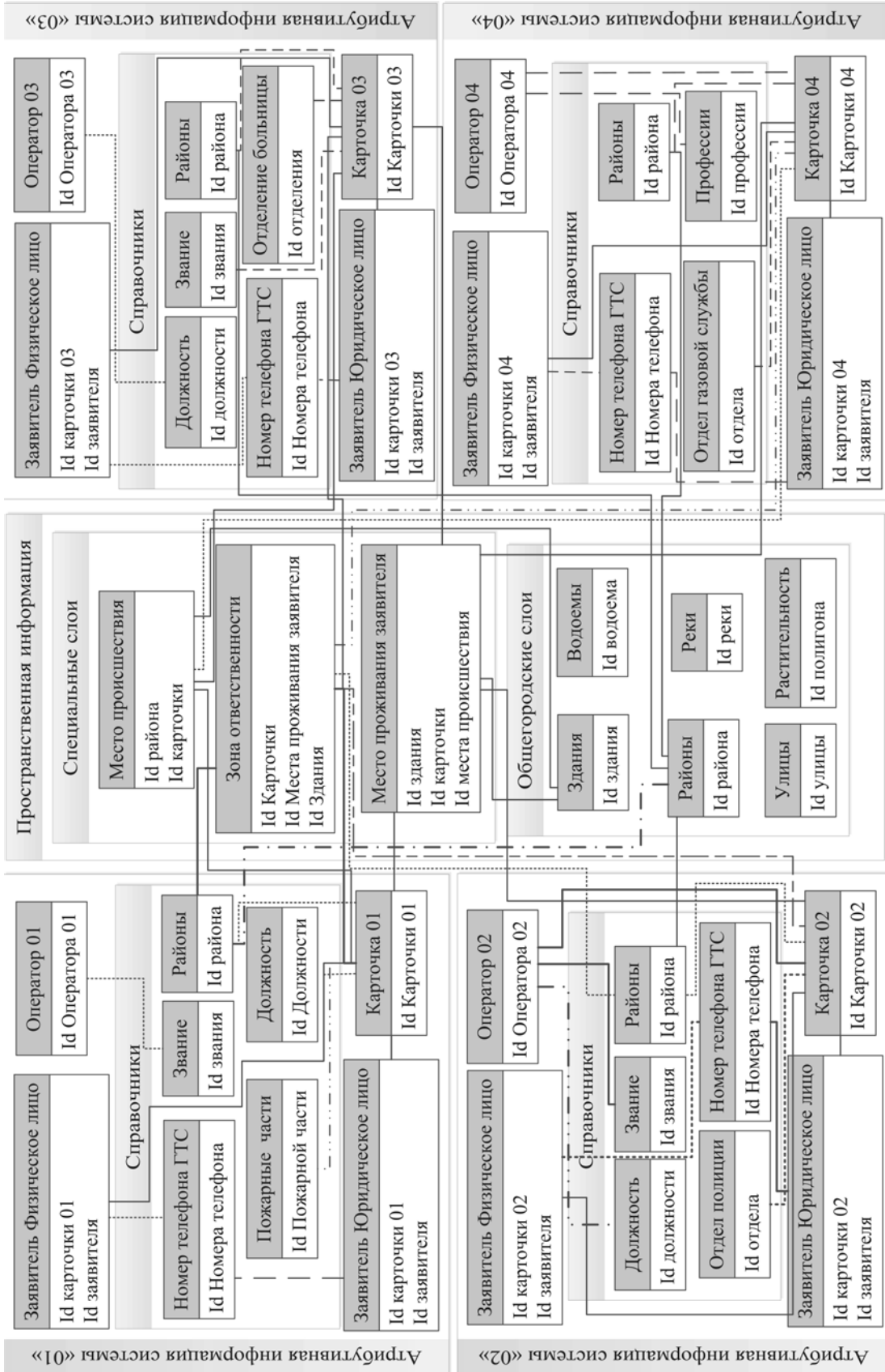


Рис. 4. Логическая информационная модель взаимодействия ИС экстренных служб города

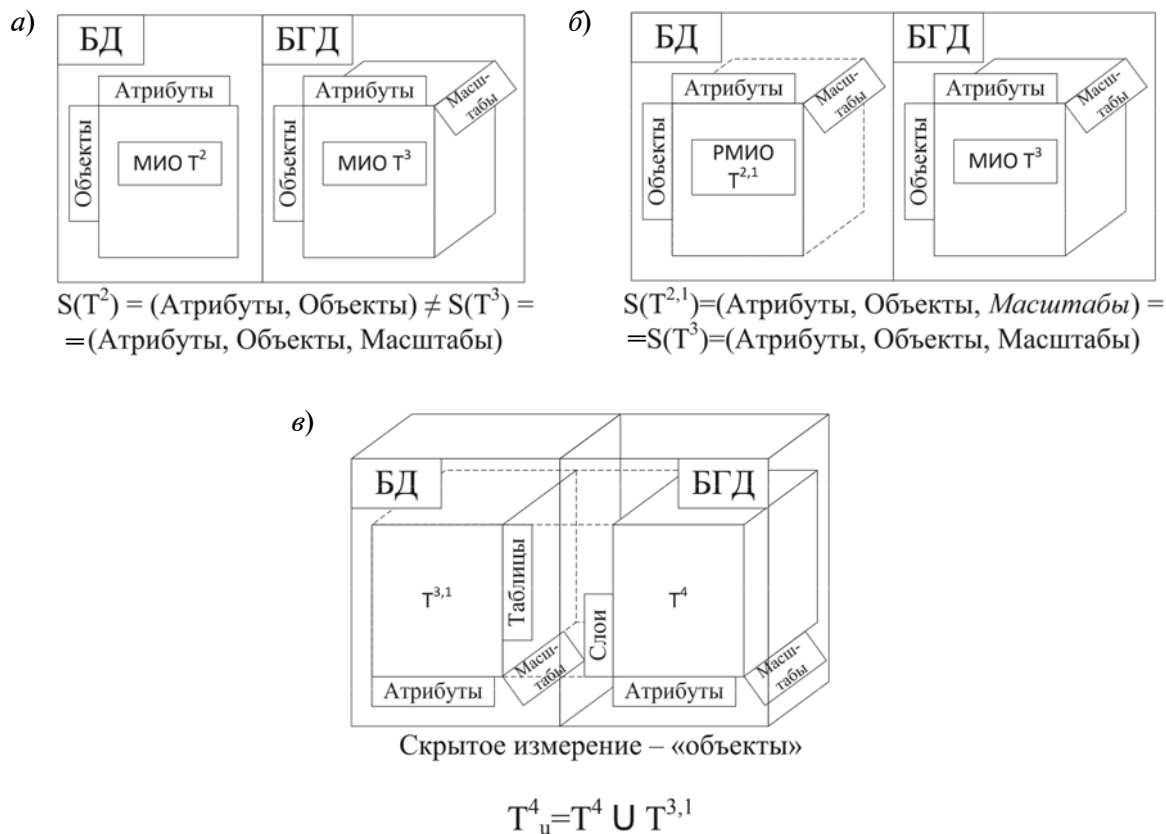


Рис. 5. Варианты многомерного представления разнородных данных:

- a* – многомерное представление атрибутивных и пространственных данных о классе объектов;
- б* – расширенное многомерное представление атрибутивных и пространственных данных о классе объектов;
- в* – создание МИО на основе расширенного представления атрибутивных данных

$S^{3,1} = \{S_1, S_2, S_3, D_1\};$   
 $S_1 = \{\text{Идентификаторы атрибутов}\} = \{\text{id, name, owner, ...}\};$   
 $S_2 = \{\text{Идентификаторы объектов}\} = \{1, 2, 3, 4, 5, \dots\};$   
 $S_3 = \{\text{Типы объектов}\} = \{\text{здания, улицы, коммуникации, ...}\};$   
 $D_1 = \{\text{Уровни детализации (масштабы)}\} = \{1:1000, 1:5000, 1:25000, \dots\}.$

При этом атрибутивная база данных «Системы-112» представляет собой совокупность отдельных баз данных ИС экстренных служб города:

$$T^{3,1} = T_1^{3,1} \cup T_2^{3,1} \dots \cup T_k^{3,1} = \bigcup_{i=1..k} T_i^{3,1}. \quad (7)$$

Так как схема РМИО атрибутивной БД  $T^{3,1}$  отличается от схемы МИО пространственной БД  $T^4$  лишь на один элемент ( $S_1$ ), они могут быть объединены в единый МИО  $T_u^4$ :

$$T_u^4 = T^4 \cup T^{3,1} \quad (8)$$

со схемой  $S_u^4$

$$S_u^4 = \{S_{1r}, US_{1a}, S_2, S_3, S_4\}. \quad (9)$$

Полученный МИО  $T_u^4$  (8) содержит описание всех необходимых атрибутивных и пространственных данных, что позволяет использовать данную многомерную информационную модель для совместного описания структур баз данных информационных систем экстренных служб и базы данных «Системы-112», а также алгоритмов обработки этих данных при разработке соответствующего программного обеспечения и баз данных.

**Анализ способов интеграции информационных систем экстренных служб города.** Существуют несколько способов интеграции информационных систем [11, 12] экстренных служб города и «Системы-112»:

1. На уровне системы. Информационная система использует отдельные функции и модули существующих приложений, либо приложения в целом (рис. 6).

2. На уровне приложения. Информационная система использует данные непосредственно из уже существующих источников, как правило, из СУБД. Для доступа к таким данным используются отдельные интерфейсы, например, ODBC соединения.

3. На уровне базы данных. База данных ИС включает ссылки на существующие источники данных, либо копию данных из локальных источников. С точки зрения ИС такие данные рассматриваются как часть базы данных информационной системы.

**Пример интеграции информационных систем экстренных служб города Уфы.** Исходя из анализа архитектуры существующих информационных систем экстренных

служб города, для объединения их баз данных предлагается использовать интеграцию на уровне системы. Это позволит использовать веб-интерфейсы существующих информационных систем и работать с данными через XML-запросы высокого уровня без прямого обращения к базам данных. Подключение систем, не имеющих внешних интерфейсов, будет производиться через специально разработанные программные адаптеры. При этом полностью сохранится функциональность собственных рабочих мест ведомственных информационных систем и их служебных механизмов. Операторы «Системы-112» будут работать с системой посредством использования тонкого клиента, что исключает необходимость в установке специальных приложений на их рабочих местах. Вся бизнес-логика системы будет реализована в серверном приложении, что облег-

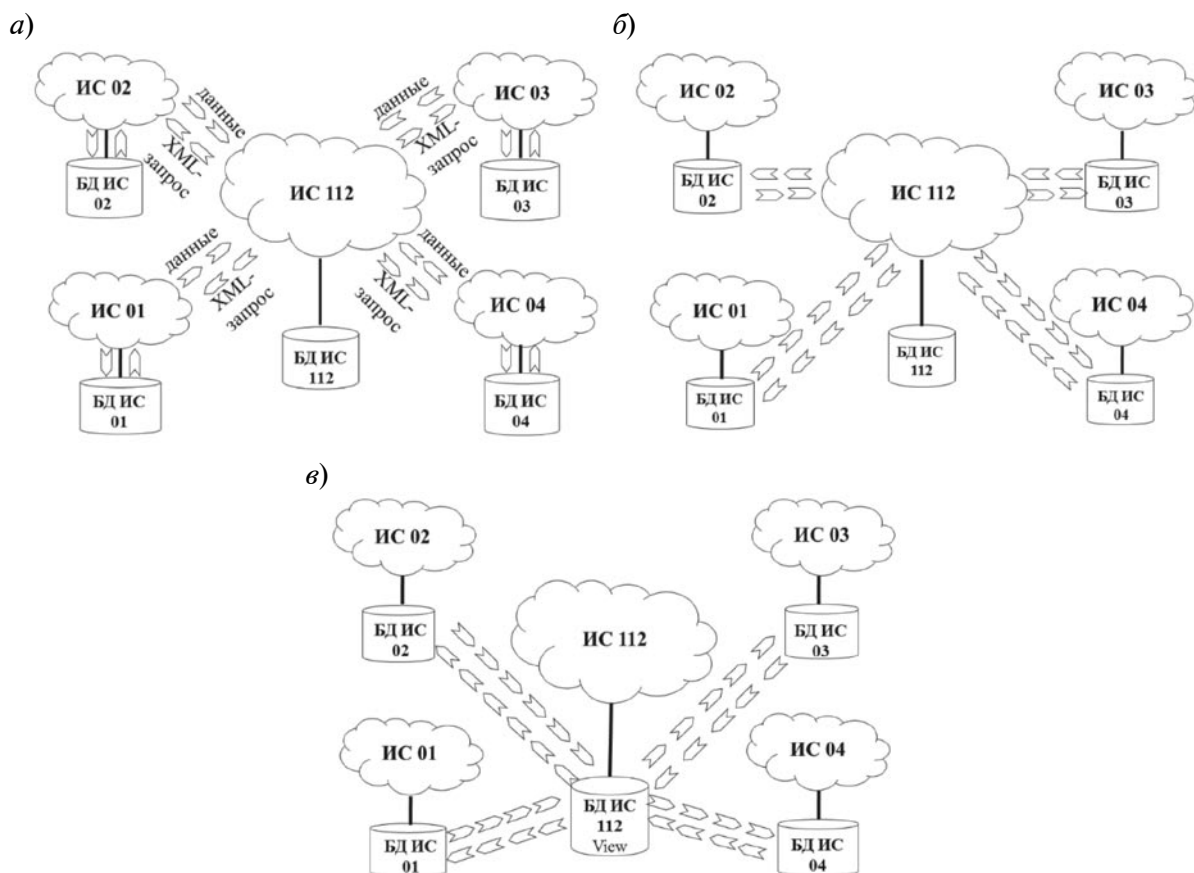


Рис. 6. Схема интеграции ИС экстренной службы города и «Системы-112»: а – на уровне системы; б – на уровне приложения; в – на уровне БД



чит администрирование и сопровождение системы.

Обобщенный алгоритм обработки заявок в системе имеет следующий вид. Сообщения о происшествиях, поступающие от граждан операторам системы, вводятся через веб-интерфейс и обрабатываются центральным сервером системы. Центральный сервер производит декомпозицию поступающих данных на основе информационной модели системы и формирует на их основе вторичные запросы к серверам и адаптерам ведомственных информационных систем. Каждый такой запрос содержит подмножество поступивших данных, относящихся к соответствующей ведомственной системе. Серверы ведомственных систем обрабатывают поступившие вторичные запросы в соответствии с их алгоритмом работы и формируют наряды для бригад экстренных служб с занесением данных в ведомственную базу данных. При этом поступившие из «Системы-112» заявки становятся доступными и для операторов ведомственных систем через стандартный интерфейс

их автоматизированных рабочих мест, что позволяет исключить дублирование заявок при повторном поступлении сообщений на номер ведомственного оператора.

Таким образом, интегрирование «Системы-112» и информационных систем экстренных служб улучшает взаимодействие различных служб и налаживает конструктивный обмен информацией с целью организации максимально эффективного реагирования на происшествие.

В статье рассмотрена проблема интеграции экстренных служб города для поддержки принятия решений по организации экстренной помощи населению. Предложено применение многомерных и расширенных многомерных информационных объектов для совместного описания баз данных разной структуры, позволяющее моделировать структуру распределенной базы данных разрабатываемой системы. На основе полученных результатов разработан алгоритм взаимодействия экстренных служб города и «Системы-112».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефремова О.А., Исхаков А.Х., Плеханов С.В.** Применение ГИС-технологий в сфере обеспечения общественной безопасности на примере системы обработки информации о происшествиях на территории г. Уфы // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем: межвуз. науч. сб. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2011. С. 59–65.

2. **Валеев Р.А., Ефремова О.А., Крымский В.Г., Павлов С.В., Педь О.В.** Геоинформационные технологии и информационная поддержка деятельности городских органов внутренних дел: опыт Республики Башкортостан // Уфа: Изд-во УГАТУ, 2013. 295 с.

3. **Христовуло О.И.** Интеграция ГИС в корпоративные системы обработки информации на основе многомерных информационных объектов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. № 3(126). С. 37–43.

4. **Павлов С.В., Ефремова О.А., Павлов А.С.** Информационная вычислительная система для обеспечения органов исполнительной власти региона пространственными данными // Электротехнические и информационные комплексы

и системы. Уфа, 2013. № 2. Т. 9. С. 98–108.

5. **Ефремова О.А.** Система обработки информации для предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций территориального уровня на основе ГИС-технологий: Дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: УГАТУ, 2002.

6. **Павлов С.В., Ефремова О.А., Ямалов И.У.** Интеграция пространственной информации в геоинформационной системе органов исполнительной власти на основе сервис-ориентированной архитектуры // Вестник УГАТУ. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2013. № 5. Т. 17. С. 129–139.

7. **Плеханов С.В.** Интеграция разнородных баз данных на основе многомерных моделей данных (на примере интеграции геоинформационной системы с информационными системами предприятия): Дисс. ... канд. техн. наук. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2006.

8. **Христовуло О.И.** Интегрированная обработка пространственной информации на основе многомерных моделей данных: Дисс. ... д-ра техн. наук. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2012.

9. **Mescheryakov S.A.** Successful Implementation of a Data Structure for Storing Multilevel Objects with Varying Attributes // IBM, Informix

Developer Zone, 2002.

10. **Иванов В.М., Мещеряков С.В.** Построение объектно-реляционных моделей баз данных с произвольным набором атрибутов // Системы управления и информационные технологии. 2005. Т. 21. № 4. С. 82–86.

11. **Павлов С.В., Бахтизин Р.Н., Плеханов С.В.** Интеграция геоинформационных систем

с информационными системами трубопроводного предприятия на основе многомерных моделей данных // Вестник УГАТУ, 2006. Т. 8, № 1(17). С. 39–42

12. **Мещеряков С.В., Иванов В.М.** Эффективные технологии создания информационных систем. СПб: Изд-во «Политехника», 2005. 309 с.

## REFERENCES

1. **Yefremova O.A., Iskhakov A.Kh., Plekhanov S.V.** *Primeneniye GIS-tekhnologiy v sfere obespecheniya obshchestvennoy bezopasnosti na primere sistemy obrabotki informatsii o proisshesstviyakh na territorii g. Ufy [Application of GIS technology in the field of public security on the example of an information processing system incidents in the territory of Ufa]. Geoinformatsionnyye tekhnologii v proyektirovani i sozdanii korporativnykh informatsionnykh sistem [Geoinformation technologies in the design and creation of corporate information systems].* Ufa: UGATU Publ., 2011, Pp. 59–65. (rus)

2. **Valeyev R.A., Yefremova O.A., Krymskiy V.G., Pavlov S.V., Ped O.V.** *Geoinformatsionnyye tekhnologii i informatsionnaya podderzhka deyatel'nosti gorodskikh organov vnutrennikh del: opyt Respubliki Bashkortostan [Geographic information technologies and information support for the activities of municipal law-enforcement bodies: the experience of the Republic of Bashkortostan].* Ufa: UGATU Publ., 2013, 295 p. (rus)

3. **Khristodulo O.I.** *Integratsiya GIS v korporativnyye sistemy obrabotki informatsii na osnove mnogomernykh informatsionnykh obyektov [Integration of GIS in corporate information processing system based on multidimensional information objects]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control].* St. Petersburg, 2011, No. 3(126). Pp. 37–43. (rus)

4. **Pavlov S.V., Yefremova O.A., Pavlov A.S.** *Informatsionnaya vychislitel'naya sistema dlya obespecheniya organov ispolnitel'noy vlasti regiona prostranstvennymi dannymi [Information computer system to ensure the enforcement authorities in the region of spatial data]. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy [Electrical and data processing facilities and systems].* Ufa, 2013, No. 2, Vol. 9. Pp. 98–108. (rus)

5. **Yefremova O.A.** *Sistema obrabotki informatsii dlya preduprezhdeniya i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy territorial'nogo urovnya na osnove GIS-tekhnologiy [The information*

*processing system for the prevention and elimination of consequences of emergency situations territorial level based on GIS technology].* Diss. ... kand. tekhn. nauk. Ufa: UGATU Publ., 2002. (rus)

6. **Pavlov S.V., Yefremova O.A., Yamalov I.U.** *Integratsiya prostranstvennoy informatsii v geoinformatsionnoy sisteme organov ispolnitel'noy vlasti na osnove servis-oriyentirovannoy arkhitektury [The integration of spatial information into geographic information system of executive bodies on the basis of service-oriented architecture]. Vestnik UGATU.* Ufa: UGATU Publ., 2013, No. 5, Vol. 17. Pp. 129–139. (rus)

7. **Plekhanov S.V.** *Integratsiya raznorodnykh baz dannykh na osnove mnogomernykh modeley dannykh (na primere integratsii geoinformatsionnoy sistemy s informatsionnymi sistemami predpriyatiya) [Integration of heterogeneous databases based on multidimensional data models (for example, the integration of geographic information system with enterprise information systems)].* Diss. ... kand. tekhn. nauk. Ufa: UGATU Publ., 2006. (rus)

8. **Khristodulo O.I.** *Integriruvannaya obrabotka prostranstvennoy informatsii na osnove mnogomernykh modeley dannykh [Integrated spatial information processing based on multi-dimensional data models].* Diss. ... d-ra tekhn. nauk. Ufa: UGATU Publ., 2012. (rus)

9. **Mescheryakov S.A.** *Successful Implementation of a Data Structure for Storing Multilevel Objects with Varying Attributes. IBM, Informix Developer Zone, 2002.*

10. **Ivanov V.M., Meshcheryakov S.V.** *Postroyeniye obyektno-relyatsionnykh modeley baz dannykh s proizvol'nym naborom atributov [Construction of object-relational database models with an arbitrary set of attributes]. Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii [Management systems and information technology],* 2005, Vol. 21, No. 4, Pp. 82–86. (rus)

11. **Pavlov S.V., Bakhtizin R.N., Plekhanov S.V.** *Integratsiya geoinformatsionnykh sistem s informatsionnymi sistemami truboprovodnogo predpriyatiya na osnove mnogomernykh modeley dannykh [The integration of geographic information*





systems with information systems of pipeline companies on the basis of multidimensional data models]. *Vestnik UGATU*, 2006, Vol. 8, No. 1(17), Pp. 39–42. (rus)

12. **Meshcheryakov S.V., Ivanov V.M.** *Effektivnyye tekhnologii sozdaniya informatsionnykh system* [Effective technologies of information systems]. St. Petersburg: Politekhnik Publ., 2005, 309 p. (rus)

---

**ЕФРЕМОВА Оксана Александровна** – докторант кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук.  
450000, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.  
E-mail: efremova-oa@yandex.ru

**EFREMOVA Oksana A.** *Ufa State Aviation Technical University.*  
450000, Karl Marx Str. 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.  
E-mail: efremova-oa@yandex.ru

**ПЛЕХАНОВ Сергей Вадимович** – доцент кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук.  
450000, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.  
E-mail: ra9wtl@mail.ru

**PLEKHANOV Sergey V.** *Ufa State Aviation Technical University.*  
450000, Karl Marx Str. 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.  
E-mail: ra9wtl@mail.ru

**САУБАНОВ Олег Сафуанович** – старший преподаватель кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета.  
450000, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.  
E-mail: oleggis@mail.ru

**SAUBANOV Oleg S.** *Ufa State Aviation Technical University.*  
450000, Karl Marx Str. 12, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.  
E-mail: oleggis@mail.ru

11 - 14 ноября 2015 года Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого



# ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОГРАММ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 12-14 НОЯБРЯ, 2015

[tmpaconf.org](http://tmpaconf.org)

Приглашаем студентов старших курсов и преподавателей принять участие в Международной научно-практической конференции «Tools & Methods of Program Analysis» («Инструменты и методы анализа программ, TMPA-2015»), посвящённой одному из наиболее актуальных и важных направлений программной инженерии - анализу качества программного обеспечения.

Конференция пройдёт 12 - 14 ноября 2015 года в Санкт - Петербургском политехническом университете Петра Великого и соберёт студентов, аспирантов и молодых учёных, специализирующихся в области разработки программного обеспечения и заинтересованных в независимой экспертизе своих исследований, а также признанных учёных, готовых поделиться своими инновационными разработками.

Конференция нацелена на развитие индустрии разработки программного обеспечения и внедрение новейших разработок в области тестирования, анализа и верификации.

Организаторы ожидают интересных практических докладов и от ведущих фирм - разработчиков программного обеспечения.

К участию в программе конференции приняты заявки в форме конкурсных докладов для отбора на рецензирование независимыми экспертами конференции «TMPA-2015», в качестве которых выступают российские и зарубежные учёные в области разработки и анализа ПО.

**Регистрация на конференцию еще открыта! Количество мест ограничено.**

**По вопросам участия обращаться по электронной почте: [program@tmpaconf.org](mailto:program@tmpaconf.org)**

Подробности на официальном сайте конференции [tmpaconf.org](http://tmpaconf.org) и в социальных сетях:

LSEG



EXACTPRO



TMPA



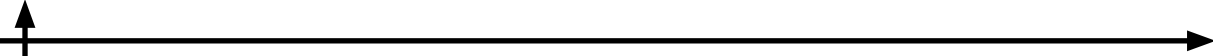
LSEG: [www.lseg.com/markets-products-and-services/technology/quality-assurance-testing-solutions/exactpro/tmpa-2015](http://www.lseg.com/markets-products-and-services/technology/quality-assurance-testing-solutions/exactpro/tmpa-2015)

EXACTPRO: [www.exactprosystems.com/conferences/tmpaconference/tmpanovember2015](http://www.exactprosystems.com/conferences/tmpaconference/tmpanovember2015)

TMPA: [tmpaconf.org](http://tmpaconf.org)

## Партнеры:





# Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.2

УДК 621.396

*И.М. Пятак, Е.В. Леонтьев*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В СРЕДЕ LABVIEW**

*I.M. Piatak, E.V. Leontiev*

### **DESIGN OF ELECTRONIC DEVICES WITH ADJUSTABLE PARAMETERS IN LABVIEW**

Изложены общие принципы формирования модели РТУ с учетом цепи управления. Методика проиллюстрирована и практически реализована на примере создания модели конвейерного АЦП разрядностью 12 бит с системой цифровой калибровки и коррекции ошибки усиления стадии. Согласно результатам моделирования, при применении калибровки возможно использование операционных усилителей с коэффициентом усиления 48 дБ вместо 68 дБ, что позволит уменьшить потребляемую мощность АЦП в два раза.

**СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ LABVIEW; КОНВЕЙЕРНЫЙ АЦП; ЦИФРОВАЯ КАЛИБРОВКА И КОРРЕКЦИЯ.**

This paper shows the advantages of using graphical programming in LabVIEW to design a model of an electronic device with adjustable parameters. The model of the digital gain error calibration and correction system for a 12-bit 200-Ms/s pipelined ADC has been constructed. The results of computer simulation in LabVIEW are presented. As shown, digital error correction can reduce op-amp requirements while maintaining the same SNDR and SFDR ratios. For example, the simulation has shown that operational amplifiers with a DC gain of 48 dB instead of 68 dB can be used in a pipelined ADC with digital correction. This approach can reduce ADC power twofold.

**LABVIEW; PIPELINED ADC; DIGITAL GAIN ERROR CALIBRATION AND CORRECTION.**

Радиотехнические устройства (РТУ) с регулируемыми параметрами широко используются для создания многофункциональных радиоприемных устройств. При этом необходимо выполнение различных требований, например, по разрядности (динамическому диапазону), тактовой частоте, коэффициенту усиления. Так, полоса частот может варьироваться от 0,2 МГц в системах GSM до 5 МГц в системе WCDMA при требуемой разрядности от 6 до 12 бит для систем WCDMA и GSM соответственно. Коэффициент усиления входного малошумящего усилителя изменяется для стан-

дартов WCDMA и GSM в пределах от 18 дБ до 23 дБ [1]. Данные требования возможно обеспечить применением усилителей с регулируемым коэффициентом усиления, фильтрами с переменной частотой среза, генераторами, управляемыми напряжением, цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей (ЦАП, АЦП) с регулируемой разрядностью, тактовой частотой и потребляемой мощностью.

Для моделирования РТУ с регулируемыми параметрами необходимо создать модель, позволяющую разработчику управлять требуемыми параметрами и характери-

ками устройства. Распространенными средствами для моделирования систем являются MATLAB/Simulink и LabVIEW, поддерживающие основные математические вычислительные методы и снабженные готовыми программными модулями. Программный пакет MATLAB/Simulink создан для решения задач, связанных с моделированием систем управления, цифровой обработки сигналов, коммуникационных систем. Программная среда LabVIEW нацелена на решение более широкого круга задач, связанных как с моделированием систем, так и с обеспечением взаимодействия программы с управляющей аппаратурой сбора, обработки и отображения информации. Таким образом, среда LabVIEW не уступает по функциональным возможностям пакету MATLAB/Simulink, а поддержка управления аппаратным комплексом сбора и обработки данных и возможность перехода к этапу прототипирования РТУ с применением программируемых логических схем (ПЛИС) делает перспективным использование LabVIEW.

Наша цель заключается в разработке методики моделирования блока управления параметрами РТУ в среде LabVIEW. В статье сформулированы общие принципы формирования математической модели РТУ с учетом цепи управления. Методика проиллюстрирована и практически реализована на примере создания модели конвейерного АЦП разрядностью 12 бит.

**Принципы формирования модели цепи управления.** Основными составляющими модели цепи управления являются:

1. Устройство формирования сигнала управления, которое включает:

- блок формирования сигнала ошибки.

В общем случае сигнал ошибки определяется разностью между откликом управляемого РТУ и эталонным сигналом. В случае конвейерного АЦП источниками ошибок являются технологический разброс параметров элементов при изготовлении, рассогласование плеч дифференциальных каскадов, что приводит к изменению требуемых характеристик устройства по сравнению с номинальными значениями;

- блок формирования эталонного воз-

действия. Данный блок требуется для определения сигнала ошибки и калибровочных коэффициентов для управления параметрами РТУ;

- блок формирования сигнала управления РТУ.

2. Устройство управления параметрами РТУ, которое включает:

- блок формирования алгоритма управления (коррекции);
- блок сопряжения с управляемым РТУ (при необходимости).

В соответствии с изложенными принципами формирования системы управления рассмотрим построение модели конвейерного АЦП с системой цифровой калибровки и коррекции. Управляемым параметром модели является ошибка усиления стадии АЦП. Сигналами управления являются как непосредственно коэффициент усиления по постоянному току операционного усилителя (ОУ) в стадиях конвейера, так и алгоритмы цифровой калибровки и коррекции ошибки усиления стадии.

**Построение модели конвейерного АЦП.** Создание конвейерных АЦП на основе ОУ с низкой потребляемой мощностью является на данный момент актуальной задачей. В конвейерном АЦП 80 % мощности потребляют операционные усилители [2]. Операционный усилитель с низкой потребляемой мощностью имеет упрощенную структуру и низкий коэффициент усиления по постоянному току. Как следствие, коэффициент усиления стадии конвейера будет отличаться от требуемого значения, что приведет к формированию ошибки усиления. Цифровая калибровка и коррекция ошибки усиления стадии конвейерного АЦП позволит использовать в конвейерном аналого-цифровом преобразователе ОУ с низким коэффициентом усиления [3].

Среда LabVIEW позволяет разработчику использовать как алгоритмы, так и математические уравнения для создания модели РТУ. Например, для управления коэффициентом усиления по постоянному току (DC gain) операционного усилителя на каждой стадии конвейерного АЦП возможно использование выражения в аналитической форме (рис. 1).



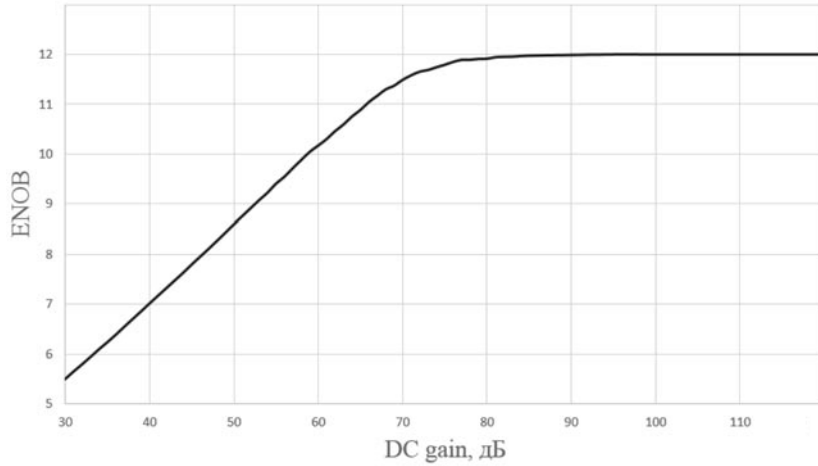


Рис. 3. График зависимости ENOB от DC gain

$j$ -го каскада к более старшему ( $j - 1$ ). На рис. 4 представлен алгоритм калибровки  $j$ -го каскада конвейерного АЦП.

Калибровка  $j$ -го каскада заключается в подаче на вход калибруемой стадии АЦП опорного напряжения ( $U_{REF}$ ), деленного на целое число  $\left(\frac{U_{REF}}{2}, \frac{U_{REF}}{4}\right)$ , цифровое представление ( $d_{TEST}$ ) данной аналоговой величины заранее известно и записано в память АЦП. Выходное напряжение  $j$ -го каскада передается на последующие от него стадии преобразования (АЦП $_{j+1}$ ), цифровой код которых умножается на калибровочный коэффициент ( $\beta_j$ ). Далее формируется выходной код ( $d_{OUT}$ ) от  $j$ -го и от откорректированного кода последующих от него

каскадов преобразования. Ошибка между кодами  $d_{TEST}$  и  $d_{OUT}$  служит сигналом для нахождения методом наименьших квадратов (МНК) калибровочного коэффициента  $\beta_j$ .

**Результаты моделирования.** На основе разработанной модели конвейерного АЦП проведено компьютерное моделирование в среде LabVIEW. На рис. 5 представлена зависимость ENOB от DC gain ОУ для конвейерного АЦП с цифровой калибровкой и коррекцией и без нее. Неравномерность представленной зависимости связана с неточностями определения калибровочного коэффициента младшими стадиями конвейерного АЦП.

На рис. 6 изображены спектры выходных сигналов АЦП с калибровкой и без нее. На вход АЦП был подан сигнал с частотой

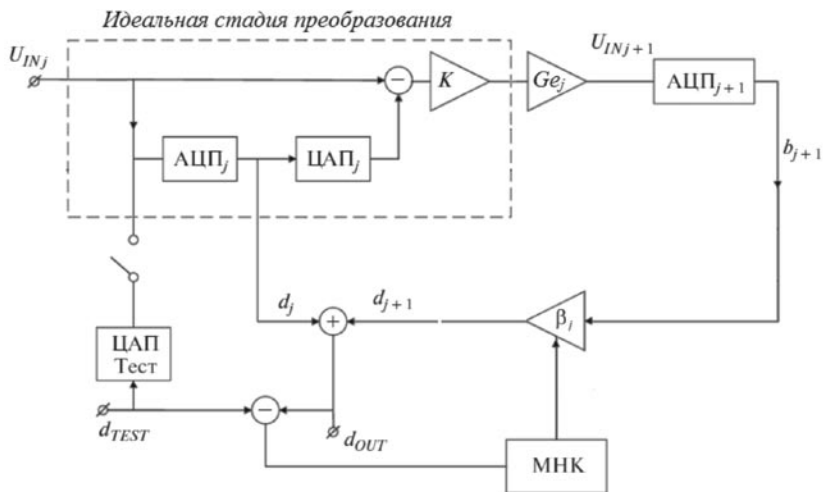


Рис. 4. Алгоритм калибровки  $j$ -го каскада конвейерного АЦП

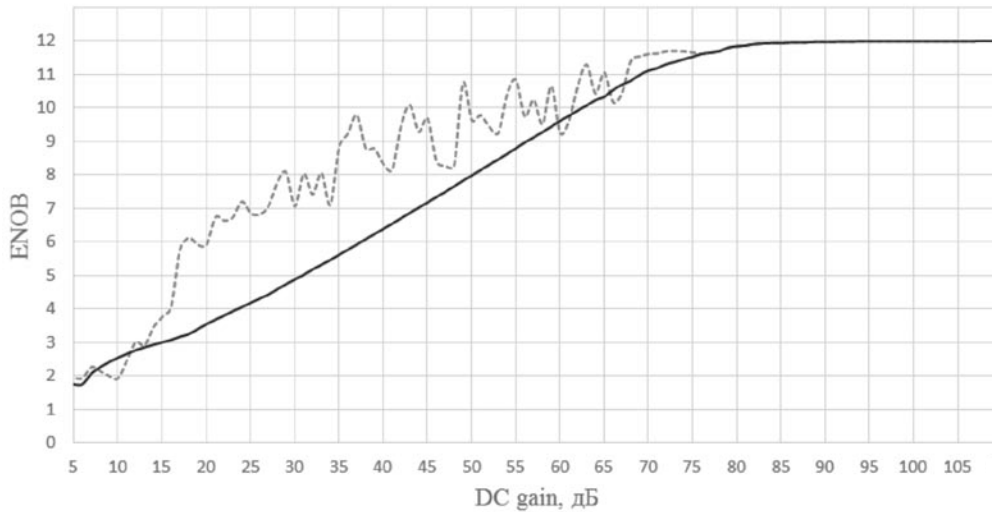


Рис. 5. Зависимость ENOB от DC gain ОУ  
 (- - -) ENOB (АЦП с калибровкой); (—) ENOB (АЦП без калибровки)

5 МГц, тактовая частота равна 200 МГц.

На рис. 6 видно, что калибровка АЦП снижает нелинейность преобразователя и уменьшает амплитуды паразитных гармоник в спектре. При использовании алгоритма цифровой калибровки ошибки усиления динамический диапазон, свободный от гармоник (SFDR), увеличивается с 36 дБ до 64 дБ, при этом коэффициент усиления ОУ по постоянному току составил 37 дБ.

Согласно результатам компьютерного моделирования в среде LabVIEW, эффективнее всего калибровка ведет себя при значениях DC gain порядка 37 и 48 дБ. При DC gain = 37 дБ калибровка позволяет увеличить ENOB до 9,8 бит, что эквивалентно использованию в конвейере без цифровой калибровки ОУ с DC gain  $\geq 62$  дБ. При зна-

чении DC gain = 48 дБ ENOB = 10,75 бит, такое значение показателя ENOB в АЦП без калибровки может дать ОУ с DC gain  $\geq 68$  дБ. Выигрыш в уменьшении DC gain в первом случае составит 25 дБ, во втором – 20 дБ. При этом потребляемая мощность ОУ в конвейерном АЦП уменьшится в два раза при использовании ОУ с DC gain = 48 дБ вместо ОУ с DC gain = 68 дБ [6].

В статье описана методика формирования модели РТУ с учетом цепи управления. Практическая реализация методики показана на примере модели конвейерного АЦП разрядностью 12 бит с системой цифровой калибровки и коррекции ошибки усиления стадии. С помощью компьютер-

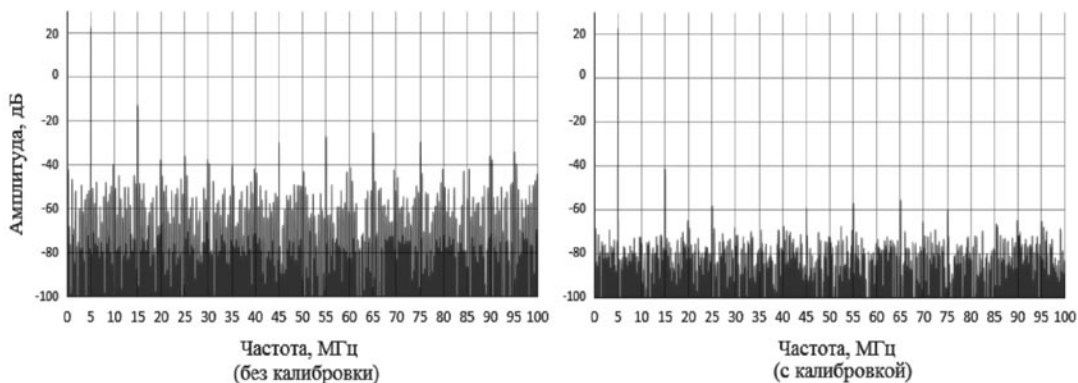


Рис. 6. Спектры выходных сигналов АЦП при DC gain = 37 дБ

ного моделирования в среде LabVIEW дана оценка возможности уменьшения ошибки усиления стадии и повышения соотношения сигнал/шум благодаря использованию цифровой калибровки и коррекции. Показано, что предложенная методика коррек-

ции позволяет использовать в конвейерном АЦП ОУ с пониженным коэффициентом усиления 48 дБ (вместо стандартно требуемых 68 дБ), что позволит снизить потребляемую мощность преобразователя в два раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коротков А.С.** Многофункциональные микроэлектронные радиоприемные устройства систем связи // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2007. № 6. С. 15–30.
2. **Коротков А.С.** Методы калибровки и коррекции аналого-цифровых преобразователей (обзор) // Микроэлектроника. 2014. № 3. Т. 43. С. 228–240.
3. **Murmann B.** Digitally assisted analog circuits // IEEE Micro. 2006. Vol. 26. No. 2. Pp. 38–47.
4. High Speed Data Converters, FE8113 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.iet.ntnu.no/>

courses/fe8113/Slides/Lecture2.ppt (дата обращения: 11.09.2015)

5. **Ракитин В.В.** Конвейерные аналого-цифровые преобразователи с цифровой калибровкой // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. Сб. трудов. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 493–496.
6. **Nieminen T., Halonen K.** Single and Two-stage OTAs for High-Speed CMOS Pipelined ADCs // 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). 2011. Pp. 877–880.

#### REFERENCES

1. **Korotkov A.S.** Mnogofunktsionalnyye mikroelektronnyye radiopriyemnyye ustroystva sistem svyazi [Multifunction microelectronic communications radio receivers]. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika [Proceedings of the universities. Electronics]*, 2007, No. 6, Pp. 15–30. (rus)
2. **Korotkov A.S.** Metody kalibrovki i korrektsii analogo-tsifrovyykh preobrazovateley (obzor) [Methods for the calibration and correction of the analog-to-digital converters (review)]. *Mikroelektronika [Microelectronics]*, 2014, No. 3, Vol. 43, Pp. 228–240. (rus)
3. **Murmann B.** Digitally assisted analog circuits, *IEEE Micro*, 2006, Vol. 26, No. 2, Pp. 38–47.

4. High Speed Data Converters, FE8113. Available: <http://www.iet.ntnu.no/courses/fe8113/Slides/Lecture2.ppt> (Accessed 11.09.2015).

5. **Rakitin V.V.** Konveyernyye analogovo-tsifrovyye preobrazovately s tsifrovoy kalibrovkoy [Conveyor ADCs with digital calibration]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem [Problems of development of advanced micro- and nanoelectronic systems]*. Moscow: IPPM RAN Publ., 2010, Pp. 493–496. (rus)
6. **Nieminen T., Halonen K.** Single and Two-stage OTAs for High-Speed CMOS Pipelined ADCs. *20th European Conference on Circuit Theory and Design*, 2011, Pp. 877–880.

---

**ПЯТАК Иван Михайлович** – инженер кафедры интегральной электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.  
E-mail: [i.m.piatak@gmail.com](mailto:i.m.piatak@gmail.com)

**PIATAK Ivan M.** Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: [i.m.piatak@gmail.com](mailto:i.m.piatak@gmail.com)

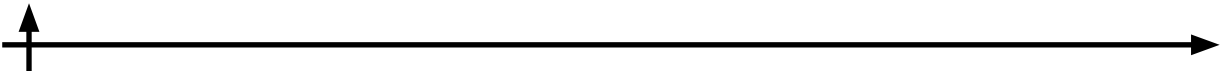
**ЛЕОНТЬЕВ Евгений Владимирович** – аспирант кафедры интегральной электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.  
E-mail: [johnleon010@gmail.com](mailto:johnleon010@gmail.com)

**LEONTIEV Evgeniy V.** Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: [johnleon010@gmail.com](mailto:johnleon010@gmail.com)





# Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.3

УДК 519.6

*С.М. Устинов*

## О РЕШЕНИИ ЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ С ЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ-НЕРАВЕНСТВАМИ

*S.M. Ustinov*

### ON THE SOLUTION OF A LINEAR LEAST SQUARES PROBLEM WITH LINEAR INEQUALITY CONSTRAINTS

Ключевой момент при решении линейной задачи наименьших квадратов с линейными ограничениями-неравенствами — это число параметров, принадлежащих границе области, которым разрешено изменение на следующем шаге метода. Показано, что выведение из активного множества двух и более параметров не гарантирует успешную работу алгоритма. Теоретические результаты проиллюстрированы вычислительным экспериментом. Двухэтапная процедура последовательного квадратичного программирования была включена в качестве подсистемы в вычислительный комплекс ПОИСК, решающий широкий круг задач статической устойчивости больших энергообъединений. Это обеспечивает сокращение объема вычислений на несколько порядков.

ЛИНЕЙНАЯ ЗАДАЧА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ С ЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ-НЕРАВЕНСТВАМИ; АКТИВНОЕ МНОЖЕСТВО; ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ КВАДРАТИЧНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ; СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ.

The key point in the solution of the linear least squares problem with linear inequality constraints is the number of parameters belonging to the border region that are allowed to change in the next step of the method. It has been shown that the removal of two or more parameters from the active set does not guarantee for the algorithm to work successfully. The theoretical results are illustrated by computational experiments. A two-stage procedure of sequential-quadratic programming was included as a subsystem in the advanced POISK software solving a wide range of problems of steady-state stability of large power pools. This ensures a reduction in the amount of computations by several orders.

LINEAR LEAST SQUARES PROBLEM WITH LINEAR INEQUALITY CONSTRAINTS; ACTIVE SET; SEQUENTIAL-QUADRATIC PROGRAMMING; STEADY-STATE STABILITY.

Решение задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами

$$\min_x f(\mathbf{x}), f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} - \mathbf{c}^T \mathbf{x},$$

если  $\mathbf{F} \mathbf{x} \geq \mathbf{b}$ ,

$$\mathbf{x} \in R^N, \mathbf{c} \in R^N, \mathbf{b} \in R^M, \quad (1)$$

где  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{F}$  — матрицы размерностью  $N \times N$  и  $M \times N$  соответственно, уже достаточно хорошо формализовано [1] и давно доведено до относительно успешно функционирующего программного обеспечения [1–4]. Однако актуальность повышения его эффективности не ослабевает по многим причинам. С одной стороны, растет размерность ре-

шаемых задач. С другой стороны, большую популярность получил подход последовательного квадратичного программирования (SQP), когда для исходной нелинейной минимизируемой функции на каждом шаге строится соответствующая аппроксимация и решается задача (1). Как итог, задача (1) решается многократно. Подробно механизм последовательного квадратичного программирования описан в работе [1].

В формуле (1) ограничения называются *активными* (или *сдерживающими*) и образуют *активное множество*, если в соответствующих строках условий  $\mathbf{F}\mathbf{x} \geq \mathbf{b}$  выполняется равенство, и *неактивными* с образованием *неактивного множества*, если в этих строках имеет место строгое неравенство.

Анализ различных многочисленных алгоритмов решения задачи (1), включая доведенных до использующегося программного обеспечения [2–4], показывает, что основным их отличием является механизм перевода элементов из активного множества в неактивное до тех пор, пока это является возможным, и точка минимума не достигнута. При этом в большинстве публикуемых работ нет строгих доказательств их сходимости и оценки эффективности. Чаще ограничиваются сравнением алгоритмов друг с другом на какой-то традиционной коллекции тестовых примеров. Поэтому большой интерес вызывает линейная задача наименьших квадратов с линейными ограничениями-неравенствами (NNLS), являющаяся частным случаем задачи (1), и для которой в [4] дан не только детальный алгоритм решения, но и строгое доказательство его сходимости.

Многочисленные приложения метода наименьших квадратов можно найти в теории управления, математическом программировании, математике, физике, статистике, экономике и пр.

Авторы метода, реализованного в алгоритме GPCG [2], в отличие от многих других предлагают эвристическую процедуру выведения из активного множества на каждом шаге одновременно многих параметров. Если бы это оказалось обоснованным, хотя бы для задачи (2), эффективность процедуры поиска минимума была бы заметно повышена.

*Одной из целей настоящей работы является уточнение того количества элементов, которое на одном шаге алгоритма может быть обоснованно переведено из активного множества в неактивное.*

### Линейная задача наименьших квадратов с линейными ограничениями-неравенствами

Здесь минимизация среднеквадратичного критерия дополняется условием неотрицательности параметров минимизируемой функции

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{E}\mathbf{x} - \mathbf{f}\|, \quad \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \quad (2)$$

$$\mathbf{x} \in R^N, \quad \mathbf{f} \in R^M,$$

где матрица  $\mathbf{E}$  имеет размерность  $M \times N$ , а квадрат нормы вектора — его скалярное произведение. Предполагается, что  $M > N$ . Введем индексные множества  $\mathcal{P}$  и  $\mathcal{L}$  с элементами целого типа, принимающими значения от 1 до  $N$ . Компоненты вектора  $\mathbf{x}$ , индексированные множеством  $\mathcal{L}$ , имеют значение нуль и принадлежат активному множеству, а переменные, индексированные множеством  $\mathcal{P}$ , могут принимать ненулевые значения и принадлежат неактивному множеству.

В работе [4] алгоритм решения задачи (2) детализируется следующим образом.

Шаг 1. Положить  $\mathcal{P} := \emptyset$ ,  $\mathcal{L} := \{1, 2, \dots, N\}$ ,  $\mathbf{x} := \mathbf{0}$ .

Шаг 2. Вычислить вектор  $\mathbf{w} := \mathbf{E}^T(\mathbf{f} - \mathbf{E}\mathbf{x})$ .

Шаг 3. Если множество  $\mathcal{L}$  пусто или  $w_j \leq 0$  для всех  $j \in \mathcal{L}$ , перейти к шагу 12.

Шаг 4. Найти такой индекс  $t$  из множества  $\mathcal{L}$ , что  $w_t = \max\{w_j : j \in \mathcal{L}\}$ .

Шаг 5. Переместить индекс  $t$  из множества  $\mathcal{L}$  во множество  $\mathcal{P}$ .

Шаг 6. Пусть  $j$ -й столбец матрицы  $\mathbf{E}_p$  равен  $j$ -му столбцу матрицы  $\mathbf{E}$ , если  $j \in \mathcal{P}$ , и нулевому столбцу, если  $j \in \mathcal{L}$ . Вычислить вектор  $\mathbf{z}$  как решение задачи наименьших квадратов  $\mathbf{E}_p \cdot \mathbf{z} \cong \mathbf{f}$ . Эта задача определяет только компоненты  $\mathbf{z}$  для  $j \in \mathcal{P}$ . Остальные компоненты полагаются нулевыми.

Шаг 7. Если все ненулевые компоненты  $\mathbf{z}$  положительны, то задать  $\mathbf{x} := \mathbf{z}$  и перейти к шагу 2.

Шаг 8. Среди всех  $j \in \mathcal{P}$ , для которых

компоненты вектора  $\mathbf{z}$  не положительны, найти индекс  $q \in \mathcal{P}$ , такой что

$$\frac{x_q}{x_q - z_q} = \min \left\{ \frac{x_j}{x_j - z_j} \right\}.$$

Шаг 9. Положить  $\alpha = \frac{x_q}{x_q - z_q}$ .

Шаг 10. Положить  $\mathbf{x} := \mathbf{x} + \alpha(\mathbf{z} - \mathbf{x})$ .

Шаг 11. Переместить из множества  $\mathcal{P}$  в множество  $\mathcal{L}$  все индексы  $j \in \mathcal{P}$ , для которых  $x_j = 0$ . Перейти к шагу 6.

Шаг 12. Конец работы алгоритма.

Полученный таким образом вектор  $\mathbf{x}$  и двойственный вектор  $\mathbf{w}$  удовлетворяют условиям известной теоремы Куна–Таккера, гарантирующим тот факт, что полученный вектор  $\mathbf{x}$  является решением задачи (2).

Для доказательства сходимости алгоритма ключевыми являются шаги 4–6, на которых индекс  $t$  определяет номер компоненты, еще не представленной во множестве  $\mathcal{P}$ , которая обязательно будет *положительной*, если ввести ее в решение. Существенный момент – это одновременный ввод только *одной* компоненты. На то, что именно для одной вводимой в  $\mathcal{P}$  компоненты можно обеспечить сходимость алгоритма, указывает следующая доказанная в [4] теорема.

**Теорема 1.** Пусть матрица  $\mathbf{A}$  ранга  $N$  имеет размерность  $M \times N$ ,  $\omega$  – скалярная величина,  $\mathbf{b}$  – вектор размерности  $M$ , для которого выполняется условие

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \omega \end{pmatrix}, \quad \omega > 0, \quad (3)$$

то есть  $N-1$  компонента вектора в правой части (3) равна нулю.

Пусть также  $\mathbf{x}$  – решение задачи наименьших квадратов

$$(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}, \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) \rightarrow \min.$$

Тогда последняя компонента вектора  $\tilde{\mathbf{x}}$  положительная ( $\tilde{x}_N > 0$ ).

*Доказательство.* Пусть  $\mathbf{Q}$  – ортогональная матрица размерности  $M \times M$ , аннулирующая поддиагональные элементы в первых  $N-1$  столбцах  $\mathbf{A}$ , то есть

$$\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{t} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{s} \in R^{N-1}, \quad \mathbf{t} \in R^{M-N+1}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{s}$  и  $\mathbf{t}$  – векторы соответствующей размерности, а  $\mathbf{R}$  – верхняя треугольная матрица размерности  $(N-1) \times (N-1)$ . Она не вырождена, так как  $\mathbf{A}$  имеет полный столбцовый ранг, равный  $N$ . Матрица  $\mathbf{Q}$  вычисляется аналогично тому, как это делается при построении QR-разложения, например, используя преобразования Хаусхолдера или Гивенса [5, 6].

Введем также векторы  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{v}$ :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{b}, \quad \mathbf{u} \in R^{N-1}, \quad \mathbf{v} \in R^{M-N+1}. \quad (5)$$

Учитывая (4), получаем

$$(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A})^T = \mathbf{A}^T \mathbf{Q}^T = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{s}^T & \mathbf{t}^T \end{pmatrix},$$

и с учетом (5) формула (3) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{b} &= (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{Q}^T)(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{b}) = \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{s}^T & \mathbf{t}^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{u} + \mathbf{t}^T \cdot \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \omega \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из этой формулы непосредственно следует, что  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ , а  $\mathbf{t}^T \cdot \mathbf{v} = \omega > 0$ .

Теперь обратимся к задаче наименьших квадратов. Разделим вектор  $\mathbf{x}$  на подвекторы

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^* \\ x_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}^* \in R^{N-1}$$

и будем минимизировать квадрат длины вектора невязки с учетом  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}, \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) &= (\mathbf{Q}(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}), \mathbf{Q}(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b})) = \\ &= \left( \begin{pmatrix} \mathbf{R}\mathbf{x}^* + \mathbf{s}x_N \\ \mathbf{t}x_N - \mathbf{v} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mathbf{R}\mathbf{x}^* + \mathbf{s}x_N \\ \mathbf{t}x_N - \mathbf{v} \end{pmatrix} \right) \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Условие  $(\mathbf{R}\mathbf{x}^* + \mathbf{s}x_N, \mathbf{R}\mathbf{x}^* + \mathbf{s}x_N) \rightarrow \min$  определяет вектор  $\mathbf{x}^* = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}x_N$ , а условие  $(\mathbf{t}x_N - \mathbf{v}, \mathbf{t}x_N - \mathbf{v}) \rightarrow \min$  гарантирует положительность  $x_N$

$$x_N = \frac{\mathbf{t}^T \mathbf{v}}{\mathbf{t}^T \mathbf{t}} = \frac{\omega}{\mathbf{t}^T \mathbf{t}} > 0,$$

что и доказывает теорему.

Сходимость алгоритма в таком случае очевидна, т. к. каждый шаг алгоритма со-

кращает число индексов во множестве  $\mathcal{P}$ , и число шагов является конечным.

Как уже отмечалось, при решении общей задачи квадратичного программирования с линейными ограничениями-неравенствами (1) практическая успешность многих программных продуктов не сопровождается строгими доказательствами сходимости алгоритмов и оценкой эффективности. При этом, если алгоритмы BVLS [4], QPROG [3] и включенный в состав MatLab алгоритм QR [1], аналогично изложенному методу решения задачи (2), на каждом шаге выводят из активного множества только одну переменную, то в алгоритме GPCG [2] реализована эвристическая процедура выведения одновременно многих параметров. Если бы это оказалось обоснованным, хотя бы для задачи (2), эффективность процедуры поиска минимума была бы заметно повышена. К сожалению, в общем случае это не так [7]. Уже для двух параметров положительный эффект не гарантирован. Это непосредственно следует из предлагаемой теоремы 2.

**Теорема 2.** Пусть матрица  $A$  ранга  $N$  имеет размерность  $M \times N$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – скалярные величины,  $\mathbf{b}$  – вектор размерности  $M$ , для которого выполняется условие

$$A^T \cdot \mathbf{b} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \dots \\ \mathbf{0} \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix}, \quad \omega_1, \omega_2 > 0, \quad (7)$$

то есть  $N-2$  компонента вектора в правой части (7) равна нулю.

Пусть также  $\mathbf{x}$  – решение задачи наименьших квадратов

$$(A\mathbf{x} - \mathbf{b}, A\mathbf{x} - \mathbf{b}) \rightarrow \min.$$

Тогда последние две компоненты вектора  $\tilde{\mathbf{x}}$  ( $\tilde{x}_{N-1}$  и  $\tilde{x}_N$ ) не обязаны быть одновременно положительными.

*Доказательство.* Следуя схеме доказательства теоремы 1, пусть  $Q$  – ортогональная матрица размерности  $M \times M$ , аннулирующая поддиагональные элементы в первых  $N-2$  столбцах  $A$ , то есть

$$Q \cdot A = \begin{pmatrix} R & \mathbf{s} \\ \mathbf{0} & \mathbf{t} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{s}$  и  $\mathbf{t}$  – на этот раз матрицы размерности  $(N-2) \times 2$  и  $(M-N+2) \times 2$  соответственно, а  $R$  – верхняя треугольная матрица размерности  $(N-2) \times (N-2)$ . Она не вырождена, т. к.  $A$  имеет полный столбцовый ранг, равный  $N$ .

Введем также векторы  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{v}$ :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = Q \cdot \mathbf{b}, \quad \mathbf{u} \in R^{N-2}, \quad \mathbf{v} \in R^{M-N+2}. \quad (9)$$

Учитывая (8), получаем:

$$(Q \cdot A)^T = A^T Q^T = \begin{pmatrix} R^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{s}^T & \mathbf{t}^T \end{pmatrix}$$

и с учетом (9) формула (7) преобразуется к виду:

$$A^T \mathbf{b} = (A^T Q^T)(Q\mathbf{b}) = \begin{pmatrix} R^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{s}^T & \mathbf{t}^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R^T \mathbf{u} \\ \mathbf{s}^T \mathbf{u} + \mathbf{t}^T \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Из этой формулы непосредственно следует, что  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ , а  $\mathbf{t}^T \cdot \mathbf{v} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix}$ . При этом

$$\omega_1, \omega_2 > 0.$$

Теперь обратимся к задаче наименьших квадратов. Разделим вектор  $\mathbf{x}$  на подвекторы

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}^* \\ x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x}^* \in R^{N-2}$$

и будем минимизировать квадрат длины вектора невязки с учетом  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$

$$(A\mathbf{x} - \mathbf{b}, A\mathbf{x} - \mathbf{b}) = (Q(A\mathbf{x} - \mathbf{b}), Q(A\mathbf{x} - \mathbf{b})) = \left( \begin{pmatrix} R\mathbf{x}^* + \mathbf{s} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} \\ \mathbf{t} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} - \mathbf{v} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} R\mathbf{x}^* + \mathbf{s} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} \\ \mathbf{t} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} - \mathbf{v} \end{pmatrix} \right) \rightarrow \min.$$

Требование

$$\left( R\mathbf{x}^* + \mathbf{s} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix}, R\mathbf{x}^* + \mathbf{s} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} \right) \rightarrow \min$$

определяет вектор  $\mathbf{x}^* = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{s} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix}$ , а из условия

$$\left( \mathbf{t} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} - \mathbf{v}, \mathbf{t} \begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} - \mathbf{v} \right) \rightarrow \min$$

следует выражение для оптимального значения вектора  $\begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix}$

$$\begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix} = (\mathbf{t}^T \mathbf{t})^{-1} \mathbf{t}^T \cdot \mathbf{v} = (\mathbf{t}^T \mathbf{t})^{-1} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Элементы симметрической матрицы  $(\mathbf{t}^T \mathbf{t})^{-1}$  размерностью  $2 \times 2$

$$(\mathbf{t}^T \mathbf{t})^{-1} = \begin{pmatrix} a & c \\ c & b \end{pmatrix}$$

могут принимать относительно произвольные значения, и, например, при отрицательных значениях элемента  $c$ , даже условие  $\omega_1, \omega_2 > 0$  не гарантирует одновременной положительности компонент вектора  $\begin{pmatrix} x_{N-1} \\ x_N \end{pmatrix}$ , что и доказывает теорему.

Таким образом, процедура вывода из активного множества более одной переменной на шаге (в частности в алгоритме GPCG [2]) сохраняет эвристический характер и не гарантирует выигрыша по сравнению с алгоритмом, изложенным в [4]. Это показывают и вычислительные эксперименты следующего параграфа при решении реальных прикладных задач.

#### Процедура последовательного квадратичного программирования в задаче обеспечения устойчивости режимов больших энергообъединений

Иллюстрация сделанных выводов была выполнена при решении важной прикладной задачи численного поиска значений параметров систем регулирования, обеспечивающих требуемые демпферные свойства больших энергообъединений для заданной совокупности ее режимов. Для решения широкого круга задач в области статической устойчивости в СПбПУ был разработан вычислительный комплекс ПОИСК, получивший широкое признание у нас в стране и за рубежом и нашедший свое применение

во многих научно-исследовательских и проектных организациях России, Австралии, Китая. Первые алгоритмы, положенные в его основу, были предложены около тридцати лет назад [8–11] и получили свое развитие в более поздних работах [12–15]. Одна из подсистем комплекса реализовала формализованный численный поиск единой настройки регуляторов для совокупности режимов ЭЭС. С этой целью в линеаризованной модели

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{k})\mathbf{x}, \quad (12)$$

где  $\mathbf{k}$  – вектор параметров системы управления и  $\mathbf{A}$  – матрица состояния системы, необходимо было обеспечить смещение влево на комплексной плоскости группы собственных значений  $\lambda_i$  матрицы  $\mathbf{A}$ . Уже в первых версиях ПОИСКА описанная процедура имела формализованный характер и позволяла полностью автоматизировать процесс выбора параметров управления. Однако каждое вычисление специальной минимизируемой функции качества было связано с решением полной проблемы собственных значений для матрицы состояния системы (12) на основе QR-алгоритма. Учитывая рост трудоемкости последнего в кубической зависимости от размерности матрицы [5, 16], для моделей больших энергосистем объем вычислений непреодолимо возрастает. Устранить эти недостатки и значительно сократить объем вычислений позволяет следующий подход, базирующийся на двухэтапном методе последовательного квадратичного программирования.

Введем следующие обозначения. Пусть  $\mathbf{k}_0$  – начальное значение вектора варьируемых параметров,  $\Delta \mathbf{k}$  – вектор их приращений,  $\alpha_i$  – вещественные части собственных значений, взятые с обратным знаком ( $\lambda_i = -\alpha_i + j\omega_i$ ),  $\mathbf{a}$  – вектор, содержащий  $\alpha_i$  интересующей группы собственных значений, смещение которых в комплексной плоскости будет контролироваться,  $\Delta \mathbf{a}$  – вектор желаемых их приращений.

Введем также матрицу чувствительности  $\mathbf{H}$  с элементами  $h_{ij} = \frac{\partial \alpha_i}{\partial k_j}$ , получающимися по хорошо известным формулам:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial k_j} = \mathbf{v}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial k_j} \mathbf{u}_i / (\mathbf{v}_i^T \mathbf{u}_i),$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial k_j} = -\operatorname{Re} \left( \frac{\partial \lambda_i}{\partial k_j} \right).$$
(13)

Здесь  $\mathbf{A}$  — матрица системы,  $\lambda_i = -\alpha_i + j\omega_i$  — ее собственные значения,  $\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i$  — собственные векторы матриц  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{A}^T$  соответственно.

Первый этап алгоритма требует решать на каждом шаге следующую задачу квадратичного программирования:

$$\|\mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{k} - \mathbf{p} - \Delta \alpha\| \rightarrow \min$$

$$\mathbf{p} \geq \mathbf{0}, \Delta \mathbf{k}_{\min} \leq \Delta \mathbf{k} \leq \Delta \mathbf{k}_{\max}.$$
(14)

Ограничения на  $\Delta \mathbf{k}$  диктуются, в первую очередь, областью корректности квадратичной модели. Кроме того, имеются и естественные технологические ограничения на диапазон изменения параметров. Введение вспомогательного вектора  $\mathbf{p}$  разрешает неограниченное изменение влево контролируемой группы собственных значений, входящих в вектор  $\alpha$ .

В ряде случаев задача (14) может иметь не одно решение. При этом максимальный интерес вызывает то, которое имеет наименьшую длину  $\|\Delta \mathbf{k}\|$ , что повышает точность используемой аппроксимации. Поэтому после получения решения (14), обозначаемого как  $\Delta \mathbf{k}^*$ , предлагается обратиться к еще одной задаче квадратичного программирования

$$\|\Delta \mathbf{k}\| \rightarrow \min, \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{k} \geq \Delta \alpha^*,$$

$$\Delta \mathbf{k}_{\min} \leq \Delta \mathbf{k} \leq \Delta \mathbf{k}_{\max},$$
(15)

и процедура выполнения одного шага алгоритма становится двухэтапной. На втором этапе минимизируется величина  $\|\Delta \mathbf{k}\|$  при условии, что  $\mathbf{H} \Delta \mathbf{k}$  принимает значения не меньше  $\Delta \alpha^* = \mathbf{H} \Delta \mathbf{k}^*$ , где  $\Delta \alpha^*$  — смещение доминирующей совокупности собственных значений, достигнутое на первом этапе при решении (14). Эта двухэтапная процедура легко распространяется и на случай выбора единой настройки регуляторов для совокупности режимов работы энергосистемы.

Следует отметить, что размерность вектора  $\Delta \alpha^*$  невелика. Она заметно меньше раз-

мерности вектора переменных состояния  $\mathbf{x}$  системы (12). Решение задач (14) и (15) составляет один шаг метода последовательного квадратичного программирования. Начальные значения  $\mathbf{k}_{\min}$  и  $\mathbf{k}_{\max}$  могут оказаться относительно малыми или слишком большими. В первом случае на следующем шаге эти величины могут быть увеличены, а во втором — уменьшены. Итоговая трудоемкость всей процедуры определяется общим числом шагов, необходимых для выполнения заданных требований по демпфированию.

Предложенный алгоритм был включен в вычислительный комплекс ПОИСК. Целью исследований в настоящем разделе являлась сравнительная оценка эффективности методов решения задачи квадратичного программирования (14). Вычислительные эксперименты [7] проводились для четырех уже упомянутых широко известных алгоритмов: BVLS [4], QPROG [3], включенный в состав MatLab алгоритм QP [1] и GPCG [2]. Первые три из них реализуют «осторожную стратегию» и на каждом шаге выводят из активного множества только одну переменную. Доводами в их пользу является гарантированная теоремой 1 сходимостью линейной задачи наименьших квадратов с линейными ограничениями-неравенствами. В последнем же алгоритме GPCG реализована эвристическая процедура выведения одновременно многих параметров. На то, что она может оказаться неэффективной в ряде случаев, указывают результаты теоремы 2.

Исследования проводились на двух модельных примерах. В первом случае это была тестовая схема, предложенная институтом Энергосетьпроект [17], включающая линию напряжения 1150 кВ протяженностью 2400 км. Она содержит 12 эквивалентных генераторов, 8 из которых оснащены автоматическими регуляторами возбуждения сильного действия. Число узлов схемы — 63, число нагрузок — 35. Количество дифференциальных уравнений модели варьируется от 46 до 150 в зависимости от подробности моделирования. Анализировались пять режимов работы схемы. Количество параметров (вектор  $\Delta \mathbf{k}$  в задаче (14)) достигало 32, а размерность вектора  $\mathbf{p}$ , отражаю-

щего контролируемую группу собственных значений, варьировалась в диапазоне от 18 до 49. Соответствующую размерность имела и матрица  $\mathbf{H}$  (от  $18 \times 32$  до  $49 \times 32$ ).

Во втором случае это была стандартная тестовая схема New England [18] общества IEEE, широко используемая при решении системных задач в области устойчивости и управления. Число генераторов – 10, из которых 9 моделируются подробно с учетом демпферных контуров. Число узлов – 39, число нагрузок – 18. Дифференциальный порядок в зависимости от подробности моделирования составляет от 87 до 160. Помимо «базового» режима работы здесь рассматривались еще три дополнительных режима, очень тяжелые по устойчивости и неустойчивые при отсутствии системных стабилизаторов. Здесь число компонент вектора  $\Delta \mathbf{k}$  в задаче (14) достигало 32, а размерность вектора  $\mathbf{p}$  варьировалась в диапазоне от 18 до 36. Размерность матрицы  $\mathbf{H}$  изменялась в пределах от  $18 \times 32$  до  $36 \times 32$ .

Все режимы обеих схем уже многократно исследовались и оптимальные настройки для различных вариантов ранее уже были найдены. Предлагаемая процедура для всех четырех различных алгоритмов (GPCG, BVLS, QPROG, QP) решения задачи (14) позволила достичь необходимой точности и получить оптимальные значения параметров АРВ. Временные характеристики также показали их *соизмеримую эффективность* и невозможность однозначно предпочесть какой-либо из них. Таким образом, никакой выгоды от выведения одновременно многих параметров из активного множества в алгоритме GPCG не наблюдалось.

В дополнение следует отметить, что трудоемкость двухэтапной процедуры (14), (15) для любого из рассмотренных четырех алгоритмов оказалась меньше в несколько сотен раз в зависимости от варианта решения задачи по сравнению с методом предыдущей версии ПОИСКА, требующим на каждом шаге вычисления всех собственных значений QR-алгоритмом. Такой большой выигрыш продиктован следующими факторами. Трудоемкость одного шага процедуры последовательного квадратичного про-

граммирования в основном определяется объемом вычислений для построения матрицы  $\mathbf{H}$ , что требует однократного решения полной проблемы собственных значений QR-алгоритмом для матрицы порядка  $160 \times 160$ . Число таких шагов невелико и в рассматриваемых тестах не превышало 10. В то же время предыдущий алгоритм требовал многие сотни, а иногда и тысячи шагов, каждый из которых требовал пересчета всех собственных значений.

Следует отметить, что порядок дифференциальных уравнений в тестовых схемах не является пределом для предложенного метода. Для моделей энергосистем с несколькими тысячами дифференциальных уравнений его эффективность по сравнению с ранее использовавшимися алгоритмами ожидается еще выше. Это позволит значительно расширить возможности вычислительного комплекса ПОИСК, увеличить размеры исследуемых энергообъединений и не только решать задачи эффективного выбора настроек регуляторов, но и на новом уровне обращаться к таким разнообразным проблемам, как

- анализ свойств протяженных энергообъединений [19–25] (возникновение в них низкочастотных колебаний, оценка роли управляемых шунтирующих реакторов и др.);
- ранжирование нагрузок по их влиянию на статическую устойчивость [26, 27];
- обоснованное упрощение моделей [28, 29] и синтез новых законов управления [30, 31];
- учет неопределенности параметров энергосистемы, оценка чувствительности запасов по устойчивости к вариации режимов работы, решение ряда проблем адаптации при управлении статической устойчивостью больших энергообъединений [32, 33] и пр.

Для линейной задачи наименьших квадратов с линейными ограничениями-неравенствами доказана теорема о том, что выведение из активного множества двух и более параметров не гарантирует успешную работу алгоритма. Разработанная двухэтапная процедура последовательного квадратичного программирования включена в качестве подси-

стемы в вычислительный комплекс ПОИСК, решающий широкий круг задач статической устойчивости больших энергообъединений. Это позволило обеспечить автоматический

и диалоговый режим оптимизации значений параметров управления и сократить объем вычислений в сотни раз по сравнению с предыдущей версией комплекса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.
2. More J.J., Toraldo G. Algorithm for bound constrained quadratic programming problems // Numer. Math. 1989. Vol. 43. No. 3. Pp. 377–400.
3. Goldfarb D., Idnani A. A numerically stable dual method for solving strictly convex quadratic programs // Math. Programming. 1983. Vol. 27. Pp. 1–33.
4. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. Пер. с англ. М.: Наука, 1986. 232 с.
5. Устинов С.М., Зимницкий В.А. Вычислительная математика. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 336 с.
6. Зимницкий В.А., Устинов С.М. Методы анализа математических моделей динамических систем. Л.: ЛГТУ, 1991. 81 с.
7. Лившиц Д.Е., Устинов С.М. Методика выбора оптимальных значений параметров систем управления устойчивостью режимов больших энергообъединений // Труды СПбГТУ Вычислительные, измерительные и управляющие системы. СПб., 2001. № 482. С. 17–21.
8. Груздев И.А., Труспекова Г.Х., Устинов С.М. Численный поиск настроек регуляторов возбуждения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1984. № 4. С. 18–24.
9. Груздев И.А., Труспекова Г.Х., Устинов С.М. Одновременная координация настроек регуляторов возбуждения генераторов на базе численного поиска // Электричество. 1984. № 3. С. 51–53.
10. Груздев И.А., Торопцев Е.Л., Устинов С.М. Определение настроек АРВ для совокупности режимов энергосистем // Электричество. 1986. № 4. С. 11–15.
11. Груздев И.А., Устинов С.М., Шевяков В.В. Анализ и управление собственными динамическими свойствами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1988. № 6. С. 28–36.
12. Масленников В.А., Устинов С.М., Шелухин Н.Н. Метод параметрической оптимизации для обеспечения колебательной статической устойчивости сложных энергосистем // Изв. РАН. Энергетика. 1994. № 1. С. 38–46.
13. Maslennikov V.A., Ustinov S.M. The Optimization Method for Coordinated Tuning of Power System Regulators // Proc. 12th Power System Computation Conf. Dresden. 1996. Vol. 1. Pp. 70–75.
14. Maslennikov V.A., Ustinov S.M. Software «POISK» – Advanced Information Technology for Power Systems Stability Control // Proceedings of Internat. Conf. on Informatics and Control. St. Petersburg, 1997. Vol. 2. Pp. 696–703.
15. Maslennikov V.A., Ustinov S.M. Method and Software for Coordinated Tuning of Power System Regulators // IEEE Transactions on Power Systems. 1997. Vol. 12. No. 4. Pp. 1419–1424.
16. Груздев И.А., Торопцев Е.Л., Устинов С.М. Исследование эффективности расчета корней характеристических уравнений высоких порядков при решении задач устойчивости // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1986. № 4. С. 7–10.
17. Азарьева Е.Д., Хвошинская З.Г., Груздев И.А., Масленников В.А., Устинов С.М. Тестовая схема для расчетов статической устойчивости энергосистем // Методы и программное обеспечение для расчетов колебательной устойчивости энергосистем (ФЭО). Л.: 1991. С. 88–105.
18. Byerly R.T., Sherman D.E., Vennon R.J. Frequency Domain Analysis of Low-Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems // EPRI EL-726, RP744-1 Interim Report, Palo Alto, California, 1978.
19. Груздев И.А., Стародубцев А.А., Устинов С.М., Шевяков В.В. Анализ статической устойчивости и демпфирования низкочастотных колебаний в объединенных энергосистемах // Электричество. 1991. № 3. С. 1–5.
20. Груздев И.А., Масленников В.А., Устинов С.М. Исследование собственных динамических свойств протяженных электроэнергетических объединений // Изв. РАН. Энергетика. 1993. № 1. С. 102–114.
21. Устинов С.М., Масленников В.А. Анализ общесистемных низкочастотных колебаний в больших энергообъединениях // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 2. С. 91–107.
22. Масленников В.А., Устинов С.М. Низкочастотные системные колебания и устойчивость объединенных энергосистем // Изв. РАН. Энергетика. 2001. № 4. С. 69–81.
23. Ustinov S.M., Milanović J.V., Maslennikov V.A. Inherent dynamic properties of interconnected power systems // Int. J. Elect. Power & Energy Syst.



2002. Vol. 22. Pp. 371–378.

24. **Масленников В.А., Устинов С.М.** Статическая устойчивость протяженных электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами // Изв. РАН. Энергетика. 1995. № 1. С. 58–65.

25. **Масленников В.А., Устинов С.М.** Динамические свойства и статическая устойчивость дальних электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами // Изв. РАН. Энергетика. 1999. №3. С. 68–78.

26. **Масленников В.А., Устинов С.М.** Методика ранжирования нагрузок по их влиянию на статическую устойчивость энергосистем // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 6. С. 63–73.

27. **Maslennikov V.A., Milanović J.V., Ustinov S.M.** Robust Ranking of Loads by Using Sensitivity Factors and Limited Number of Points From a Hyperspace of Uncertain Parameters // IEEE Trans. on Power Systems. 2002. Vol. 17. No. 3. Pp. 565–570.

28. **Груздев И.А., Устинов С.М.** Методика эквивалентирования при поиске оптимальных настроек регуляторов возбуждения // Изв. АН СССР. Энер-

гетика и транспорт. 1987. № 1. С. 38–43.

29. **Устинов С.М.** Метод упрощения математических моделей для управления демпферными свойствами электроэнергетических систем // Изв. РАН. Энергетика. 1992. № 2. С. 44–54.

30. **Устинов С.М., Масленников В.А.** Метод аппроксимации модального управления демпферными свойствами энергосистем // Изв. РАН. Энергетика. 1999. № 1. С. 121–132.

31. **Устинов С.М., Масленников В.А.** Аппроксимация модального управления в задачах статической устойчивости энергосистем // Изв. РАН. Энергетика. 2006. № 5. С. 91–97.

32. **Устинов С.М., Масленников В.А.** Проблемы адаптации при управлении статической устойчивостью больших энергообъединений // Изв. РАН. Энергетика. 1998. № 5. С. 7–16.

33. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M., Milanović J.V.** Method for considering uncertainties for robust tuning of PSS and evaluation of stability limits // IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. 2002. Vol. 149. No. 3. Pp. 295–299.

#### REFERENCES

1. **Gill F., Myurey U., Rayt M.** *Prakticheskaya optimizatsiya [Practical optimization]*. Moscow: Mir Publ., 1985, 509 p. (rus)

2. **More J.J., Toraldo G.** Algorithm for bound constrained quadratic programming problems. *Numer.Math*, 1989, Vol. 43, No. 3, Pp. 377–400.

3. **Goldfarb D., Idnani A.** A numerically stable dual method for solving strictly convex quadratic programs. *Math. Programming*, 1983, Vol. 27, Pp. 1–33.

4. **Louson Ch., Khenson R.** *Chislennoye resheniye zadach metodom naimenshikh kvadratov [Solving Least Squares Problems]*. Moscow: Nauka Publ., 1986, 232 p. (rus)

5. **Ustinov S.M., Zimnitskiy V.A.** *Vychislitel'naya matematika [Computational Mathematics]*. St. Petersburg: BKhV-Petersburg Publ., 2008, 336 p. (rus)

6. **Zimnitskiy V.A., Ustinov S.M.** *Metody analiza matematicheskikh modeley dinamicheskikh system [Methods for the analysis of mathematical models of dynamic systems]*. Leningrad: LGTU Publ., 1991, 81 p. (rus)

7. **Livshits D.Ye., Ustinov S.M.** Методика выбора оптимальных значений параметров систем управления устойчивостью режимов больших энергообъединений [Method of selection of optimal parameters of control systems of large power systems stability modes]. *Trudy SPbGTU. Vychislitel'nyye, izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy [Computers,*

*measuring and control systems]*. St. Petersburg, 2001, No. 482, Pp. 17–21. (rus)

8. **Gruzdev I.A., Truspekova G.Kh., Ustinov S.M.** Chislennyy poisk nastroyek regulyatorov возбуждения [Numerical search settings excitation controllers]. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport [Energetics and transport]*, 1984, No. 4, Pp. 18–24. (rus)

9. **Gruzdev I.A., Truspekova G.Kh., Ustinov S.M.** Odnovremennaya koordinatsiya nastroyek regulyatorov возбуждения generatorov na baze chislennogo poiska [Simultaneous coordination controller settings generator excitation based on the numerical search]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1984, No. 3, Pp. 51–53. (rus)

10. **Gruzdev I.A., Toroptsev Ye.L., Ustinov S.M.** Opredeleniye nastroyek ARV dlya sovokupnosti rezhimov energosistem [Defining settings for aggregate ARV regimes of power systems]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1986, No. 4, Pp. 11–15. (rus)

11. **Gruzdev I.A., Ustinov S.M., Shevyakov V.V.** Analiz i upravleniye sobstvennymi dinamicheskimi svoystvami elektroenergeticheskikh system [Analysis and management of own dynamic properties of electric power systems]. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport [Energetics and transport]*, 1988, No. 6, Pp. 28–36. (rus)

12. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M., Shelukhin N.N.** Metod parametricheskoy optimizatsii

dlya obespecheniya kolebatelnoy staticheskoy ustoychivosti slozhnykh energosistem [A method of parametric optimization for vibrational static stability of complex power systems]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1994, No. 1, Pp. 38–46. (rus)

13. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** The Optimization Method for Coordinated Tuning of Power System Regulators. *Proc. 12th Power System Computation Conference*. Dresden, 1996, Vol. 1, Pp. 70–75.

14. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Software “POISK” – Advanced Information Technology for Power Systems Stability Control. *Proceedings of International Conference on Informatics and Control*. St. Petersburg, 1997, Vol. 2, Pp. 696–703.

15. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Method and Software for Coordinated Tuning of Power System Regulators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, Vol. 12, No. 4, Pp. 1419–1424.

16. **Gruzdev I.A., Toroptsev Ye.L., Ustinov S.M.** Issledovaniye effektivnosti rascheta korney kharakteristicheskikh uravneniy vysokikh poryadkov pri reshenii zadach ustoychivosti [Research of efficiency calculation of the roots of the characteristic equation of high order to solve problems of stability]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energetika [Proceedings of the higher educational institutions. Energetics]*, 1986, No. 4, Pp. 7–10. (rus)

17. **Azaryeva Ye.D., Khvoshchinskaya Z.G., Gruzdev I.A., Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Testovaya skhema dlya raschetov staticheskoy ustoychivosti energosistem [The test circuit for the calculation of static stability of power systems]. *Metody i programmnoye obespecheniye dlya raschetov kolebatelnoy ustoychivosti energosistem (FEO) [Methods and software for calculations of vibrational stability of power systems (FEO)]*. Leningrad, 1991, Pp. 88–105. (rus)

18. **Byerly R.T., Sherman D.E., Bennon R.J.** Frequency Domain Analysis of Low-Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems. *EPRI EL-726, RP744-1 Interim Report*, Palo Alto, California, 1978.

19. **Gruzdev I.A., Starodubtsev A.A., Ustinov S.M., Shevyakov V.V.** Analiz staticheskoy ustoychivosti i dempfirovaniya nizkochastotnykh kolebaniy v obyedinennykh energosistemakh [Analysis of static stability and damping of low-frequency oscillations in the interconnections]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1991, No. 3, Pp. 1–5. (rus)

20. **Gruzdev I.A., Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Issledovaniye sobstvennykh dinamicheskikh svoystv protyazhennykh elektroenergeticheskikh

obyedineniy [A study of the dynamic properties of their own extensive electric power associations]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1993, No. 1, Pp. 102–114. (rus)

21. **Ustinov S.M., Maslennikov V.A.** Analiz obshchesistemnykh nizkochastotnykh kolebaniy v bolshikh energoobyedineniyakh [Analysis of system-wide low-frequency oscillations in large power systems]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1998, No. 2, Pp. 91–107. (rus)

22. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Nizkochastotnyye sistemnyye kolebaniya i ustoychivost obyedinennykh energosistem [Low-frequency vibrations of the system and the stability of the interconnected systems]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 2001, No. 4, Pp. 69–81. (rus)

23. **Ustinov S.M., Milanović J.V., Maslennikov V.A.** Inherent dynamic properties of interconnected power systems. *Int. J. Elect. Power & Energy Syst.* 2002, Vol. 22, Pp. 371–378.

24. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Staticheskaya ustoychivost protyazhennykh elektroperedach s upravlyayemyimi shuntiruyushchimi reaktorami [Static stability of extended power with controlled shunt reactor]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1995, No. 1, Pp. 58–65. (rus)

25. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Dinamicheskiye svoystva i staticheskaya ustoychivost dalnikh elektroperedach s upravlyayemyimi shuntiruyushchimi reaktorami [The dynamic properties and static stability of long-distance power with controlled shunt reactor]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1999, No. 3, Pp. 68–78. (rus)

26. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M.** Metodika ranzhirovaniya nagruzok po ikh vliyaniyu na staticheskuyu ustoychivost energosistem [Methods ranging loads on their influence on static stability of power systems]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1998, No. 6, Pp. 63–73. (rus)

27. **Maslennikov V.A., Milanović J.V., Ustinov S.M.** Robust Ranking of Loads by Using Sensitivity Factors and Limited Number of Points From a Hyperspace of Uncertain Parameters. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2002, Vol. 17, No. 3, Pp. 565–570.

28. **Gruzdev I.A., Ustinov S.M.** Metodika ekvivalentirovaniya pri poiske optimalnykh nastroyek regulyatorov vozbuzhdeniya [Methods equivalent finding optimal excitation controller settings]. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport [Energetics and transport]*, 1987, No. 1, Pp. 38–43. (rus)

29. **Ustinov S.M.** Metod uproshcheniya matematicheskikh modeley dlya upravleniya dempferymi svoystvami elektroenergeticheskikh

system [The method of simplifying the mathematical models for the management of electric power systems damper properties]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1992, No. 2, Pp. 44–54. (rus)

30. **Ustinov S.M., Maslennikov V.A.** Metod approksimatsii modalnogo upravleniya dempfernymi svoystvami energosistem [The method of approximation of the modal properties of power systems control damper]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1999, No. 1, Pp. 121–132. (rus)

31. **Ustinov S.M., Maslennikov V.A.** Approksimatsiya modalnogo upravleniya v zadachakh staticheskoy ustoychivosti energosistem [Approximation of modal control in the problem

of static stability of power systems]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 2006, No. 5, Pp. 91–97. (rus)

32. **Ustinov S.M., Maslennikov V.A.** Problemy adaptatsii pri upravlenii staticheskoy ustoychivostyu bolshikh energoobyedineniy [Problems of adaptation in managing large static stability of power systems]. *Izv. RAN. Energetika [Energetics]*, 1998, No. 5, Pp. 7–16. (rus)

33. **Maslennikov V.A., Ustinov S.M., Milanović J.V.** Method for considering uncertainties for robust tuning of PSS and evaluation of stability limits. *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, 2002, Vol. 149, No. 3, Pp. 295–299.

---

**УСТИНОВ Сергей Михайлович** — профессор кафедры информационных и управляющих систем Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.  
E-mail: usm50@yandex.ru

**USTINOV Sergey M.** Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: usm50@yandex.ru



**London**  
Stock Exchange Group

**exactpro**   
EXITUS ACTA PROBAT



Пятая международная технологическая конференция

# EXTENT Conference

## Trading Technology Trends & Quality Assurance

[extentconf.com](http://extentconf.com)

Конференция пройдет 11 ноября 2015 года и соберет специалистов в области разработки технологических решений для электронной торговли финансовыми инструментами.

Конференция будет посвящена тенденциям развития программных и аппаратных платформ, используемых биржами, брокерами, инвестиционными банками и другими участниками торгов и обеспечению качества и эффективности функционирования таких платформ.

Программа конференции будет включать в себя доклады и круглые столы, в которых примут участие представители ведущих организаций отрасли.  
Язык конференции - английский.

### Тематика конференции:

- Promoting Stability in Financial Markets
- Quality Assurance for Advanced Execution Platform
- Operational Acceptance for Complex Systems
- Latency Measurement and Monitoring
- Cognitive Technologies
- Hardware Acceleration
- Trading Technology Trends and Innovation
- Blockchain and Cryptocurrencies
- Risk Management Systems

### Организаторы конференции:

- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, кафедра компьютерных систем и программных технологий Института компьютерных наук и технологий (ИКНТ) ([kspt.icc.spbstu.ru](http://kspt.icc.spbstu.ru))
- Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук ([ipiran.ru](http://ipiran.ru))
- Компания Exactpro Systems, входящая в группу Лондонская фондовая биржа ([exactpro.com](http://exactpro.com))

По вопросам участия обращаться по электронной почте: [extent@exactprosystems.com](mailto:extent@exactprosystems.com)

Подробности на официальном сайте конференции: [www.extentconf.com](http://www.extentconf.com)



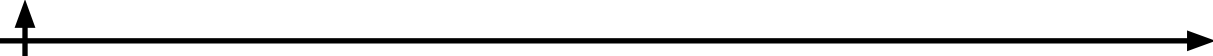
LSEG: [www.lseg.com/markets-products-and-services/technology/quality-assurance-testing-solutions/exactpro/extent-v](http://www.lseg.com/markets-products-and-services/technology/quality-assurance-testing-solutions/exactpro/extent-v)

EXACTPRO: [www.exactprosystems.com/conferences/extentconference/extentconfnov2015](http://www.exactprosystems.com/conferences/extentconference/extentconfnov2015)

EXTENT: [www.extentconf.com](http://www.extentconf.com)

### Партнеры:





# Программное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.4

УДК 004.4'232

*А.В. Подкопаев, А.Ю. Коровянский, И.С. Озерных*

## **ЯЗЫКОНЕЗАВИСИМОЕ ФОРМАТИРОВАНИЕ ТЕКСТОВ ПРОГРАММ НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ С ОБРАЗЦОМ И СИНТАКСИЧЕСКИХ ШАБЛОНОВ**

*A.V. Podkopaev, A.Yu. Korovianskii, I.S. Ozernykh*

### **A LANGUAGE-INDEPENDENT CODE FORMATTING BY SYNTACTIC MATCHING AND TEMPLATES**

Рассмотрена проблема форматирования программных текстов. Предложен новый подход, позволяющий форматировать целевой код по образцу. Разработанное решение вычисляет оптимальное представление текста за полиномиальное время. В рамках апробации разработаны форматары для языков Java и Haskell.

**ФОРМАТИРОВАНИЕ; ШАБЛОН; КОМБИНАТОРЫ.**

In paper we consider a code-formatting problem. A novel concept of declarative printers is introduced. These devices can perform formatting in accordance with the style of the rest of the source code. For this purpose, declarative formatters extract syntactic templates from the sample code and use them to construct a new representation of the input program. A proposed solution produces optimal program presentation in polynomial time. It is achieved by using polynomial-time pretty-printer combinators and introducing a partial order on text representations. We also present the results of evaluating the approach in the Java and Haskell languages. The development of a declarative printer for simple imperative language While is described. A comparison with modern IDEs code formatters is also presented.

**FORMATTING; TEMPLATE; COMBINATORS.**

Широко известным фактом является то, что программный код больших информационных систем должен быть легко читаем. Для этого код подвергается *форматированию*, т. е. в него добавляются символы, которые не несут семантического значения с точки зрения языка программирования, однако, позволяют выделить структурные элементы программы. Какие структурные элементы требуют выделения и способ их выделения определяется *стандартом кодирования* (СК, coding convention), который выбирается ко-

мандой разработчиков для проекта.

Стоит отметить, что не существует универсального СК, т. к. каждый конкретный стандарт сильно зависит от языка программирования, к проектам, на котором стандарт применяется. Так, абсолютно бесполезно форматировать программный код, написанный на C++, по правилам форматирования S-выражений языка Lisp. Однако и для одного и того же языка программирования может существовать множество стандартов. Например, для C++ существует

как минимум три широко распространенных стандарта: BSD<sup>1</sup>, GNU<sup>2</sup>, Google<sup>3</sup>.

Современные среды интегрированной разработки (IDE), такие как IntelliJ IDEA, Eclipse и Visual Studio, как и средства реинжиниринга [2], помогают придерживаться выбранного СК. Они обладают встроенными *форматерами*, которые производят форматирование выбранной части кода или целого файла. Какого именно СК должен придерживаться форматер, задается множеством настроек. Например, для языка C++ есть подобные: помещать фигурную скобку начала тела функции на той же строчке, что и имя функции, или на следующей, использовать отступ равный двум или четырем пробелам для операторов внутри фигурных скобок и т. д.

У данного подхода есть несколько недостатков. Во-первых, настройки форматеров приведенных IDE не позволяют выразить СК, сильно отличающийся от общепринятых. Например, в них невыразим стиль, подразумевающий помещение закрывающей скобки на той же строчке, что и последний оператор блока (см. листинг 1). Во-вторых, часто возникает необходимость следовать СК некоторого существующего кода. Для этого в рамках приведенного подхода нужно изучить кодовую базу и вручную задать настройки форматирования в соответствии с ней, что является трудной задачей из-за количества различных настроек.

В этой работе представлен метод, позволяющий создавать форматеры для различных языков программирования, которые настраиваются на требуемый СК по образцу кода. Подобные форматеры мы будем называть *декларативными*. Декларативность достигается путем вычленения из образца *синтаксических шаблонов* для конструкций целевого языка и построения с их помощью представлений для переданных на форматирование программ. Важной особенностью декларативных форматеров яв-

ляется то, что они вычисляют *оптимальное*, в терминах статьи [1], представление для обрабатываемой программы за линейное время относительно размера ее абстрактного синтаксического дерева. Линейная сложность получена за счет использования модернизированной библиотеки принтеркомбинаторов из [7]. В рамках апробации метода была разработана инфраструктура для создания форматер-плагинов для среды интегрированной разработки IntelliJ IDEA, и с ее помощью были разработаны декларативные форматеры для языков Java, Haskell и учебного языка While. Разработка форматер-плагина для последнего детально описана далее в статье.

#### Оптимальное представление программы.

Одной из важных характеристик программного текста, с точки зрения его оформления, является ширина текста, т. е. максимум количества символов в его строчках. Стоит отметить, что слишком широкие тексты не будут рассматриваться нами как хорошие. Так, восприятие текста, который не помещается по ширине на экран, серьезно затруднено. Однако допустимая ширина текста может варьироваться в зависимости от задач, поэтому библиотеки принтеркомбинаторов [1, 5, 7, 8] и форматеры IDE позволяют явным образом задавать верхнюю границу для ширины продуцируемого текста. Это верно и для предложенных декларативных форматеров.

```
void sort(int* arr, int length)
{ for (int i = 0; i < length-1; i++)
  { for (int j = i+1; j < length; j++)
    { if (arr[i] > arr[j])
      { swap(arr, i, j); } } } }
```

Листинг 1. Программный код с нестандартным форматированием

Под *оптимальным* представлением программы, вслед за [1], понимается то, что имеет минимально возможное количество строк при соблюдении СК и ограничения на ширину. Интуиция за этим определением следующая: полученное представление должно быть максимально обозримым.

**Библиотека принтер-комбинаторов.** На нижнем уровне декларативные форматеры

<sup>1</sup> <https://www.freebsd.org/cgi/man.cgi?query=style&sektion=9>

<sup>2</sup> <http://www.gnu.org/prep/standards/standards.html>

<sup>3</sup> <https://google-styleguide.googlecode.com/svn/trunk/cppguide.html>

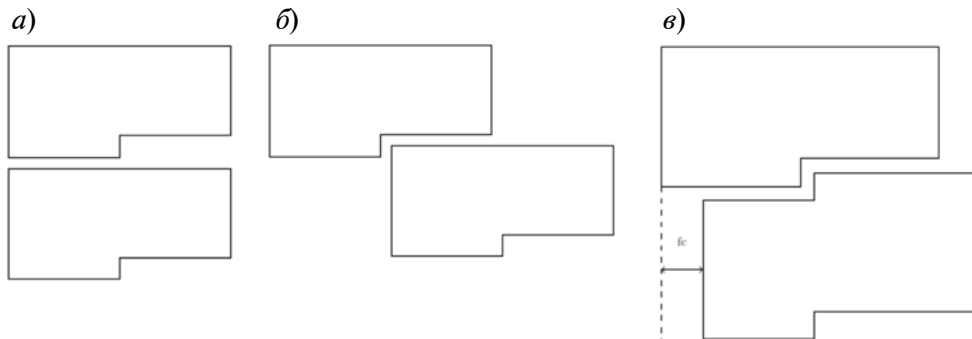


Рис. 1. Блоки и виды их склеек:  
а – вертикальная; б – горизонтальная; в – горизонтальная со сдвигом

используют модернизированную библиотеку принтер-комбинаторов [7]. Центральным понятием оригинальной библиотеки является *блок* (рис. 1) – модель части текста с указанными геометрическими характеристиками: высота (количество строк), максимальная ширина до последней строчки и ширина последней строчки. Блок может быть получен из текста или путем соединения двух других с помощью *вертикальной* или *горизонтальной склеек* (см. рис. 1 а и б). Стоит заметить, что характеристики результата склейки зависят исключительно от характеристик соединяемых блоков кода. Для целей декларативных форматов в интерфейс библиотеки пришлось добавить дополнительный вид склейки – *горизонтальную склейку со сдвигом* (см. рис. 1 в). Из-за нововведения для блоков дополнительно нужно хранить ширину первой строчки. Приведенные операции обобщаются на множества блоков естественным образом – склейка двух множеств есть множество парных склеек. Дополнительно вводится операция *выбора* (choice), объединяющая два множества в одно.

Склейки и операции выбора позволяют композиционно задавать простые форматы для различных типов данных, в том числе и синтаксических деревьев. Результатом работы таких форматов становится множество блоков, из которых далее по характеристикам выбирается оптимальное представление. В [7] замечено, что в промежуточных множествах не все элементы нужны, поскольку нас интересует исключительно оптимальный результат. Для

фильтрации ненужных блоков используется специальное представление для множеств – таблица, индексами которой служат ширины блоков. Так, в ячейке таблицы (100, 50, 80) хранится блок кода с максимальной шириной, равной 100, шириной последней строчки – 50, а первой строчки – 80. При этом данный блок обладает минимальной высотой среди всех потенциальных элементов с теми же ширинами. Стоит отметить, что максимальные значения для индексов равны максимально допустимой ширине. Кроме того, очевидно, что не все ячейки таблиц обязаны быть заполнены. Верхняя оценка на число элементов в таком образом построенном множестве блоков –  $w^3$  (здесь и далее  $w$  – максимально допустимая ширина). Заметим, что алгоритмическая сложность склеек в этом случае равна  $O(w^6)$ , а операции выбора –  $O(w^3)$ .

На самом деле множество может быть организовано еще эффективнее. Для этого над блоками нужно ввести отношение частичного порядка, такое что для любых блоков А и В верно, что А меньше или равно В тогда и только тогда, когда все характеристики (ширины и высота) А меньше или равны соответствующим характеристикам В. Тогда во множестве достаточно хранить минимумы изначального множества по этому отношению. Наивная реализация поиска минимумов [4] в данном случае имеет сложностную оценку  $O(w^6)$ , как квадрат от размера множества, а значит, если ее выполнять после операций склейки, то асимптотика не ухудшается. С другой стороны, данная оптимизация и не улучшает оценку

```
for (@1; @2; @3) // Поддеревья 1, 2, 3 должны иметь
{ @4 } // однострочные представления.
// Поддереве 4 может иметь
// многострочное представление.
```

Листинг 2. Пример синтаксического шаблона конструкции **for**

на число блоков во множествах, а следовательно, и сложностную оценку решения, однако, на практике дает существенный прирост производительности.

Таким образом, модифицированная библиотека позволяет находить оптимальное представление за  $O(n \times w^6)$ , где  $n$  – число склеек. В контексте декларативных форматов библиотека используется для организации вставки представлений поддеревьев в шаблон. Реализация библиотеки находится по адресу <https://github.com/anlun/format>

Один из недостатков описанной библиотеки и, как это будет видно далее, декларативных форматов заключается в том, что для некоторых входов может не быть результата, как следствие требований критерия оптимальности. Так происходит, если максимальная ширина вывода слишком мала, чтобы вместить какое-нибудь представление, удовлетворяющее СК. Однако этот недостаток может быть легко решен, если дополнительно хранить во множестве блоков один или несколько, выходящих за границы ширины элементов.

**Декларативные форматы.** Глобально

работа декларативных форматов разбивается на два этапа: получение из образца информации об СК, которого необходимо придерживаться, и непосредственно форматирование целевого кода. На первом этапе по образцу кода, который представляет собой один или несколько файлов на целевом языке, строится множество синтаксических шаблонов. Синтаксические шаблоны являются данными, сопоставляя которые с переданным на печать синтаксическим деревом, мы будем получать текстовое представление для этого дерева. Более точно, каждый конкретный шаблон позволяет построить текстовые представления для подходящего по типу узла синтаксического дерева, используя уже полученные представления дочерних поддеревьев. На практике шаблон является размеченным деревом разбора некоторой синтаксической конструкции, в котором по каждой метке можно выяснить ограничения на представление соответствующих поддеревьев и описание, каким образом нужная раскладка поддерева должна быть вставлена в шаблон. Пример синтаксиче-

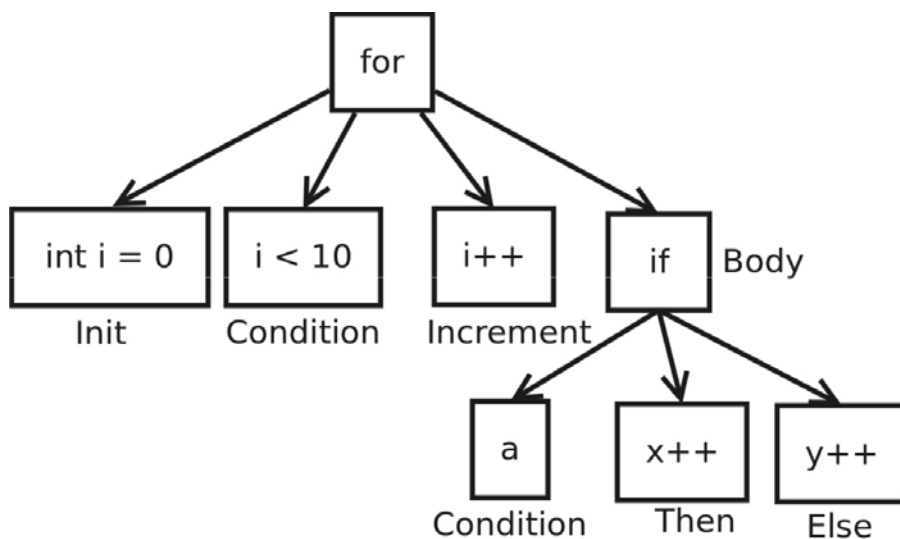


Рис. 2. Пример синтаксического дерева конструкции **for**



ского шаблона конструкции **for**, полученного из кода на листинге 1, представлен в листинге 2. Важно заметить, что для одного типа конструкции может быть извлечено несколько синтаксических шаблонов. В таком случае все извлеченные шаблоны будут использоваться на втором этапе работы декларативных форматов.

На втором этапе происходит форматирование переданного на обработку текста. Для текста строится его синтаксическое дерево, по которому восходящий алгоритм конструирует новые текстовые представления для каждого значимого узла, используя полученные из образца синтаксические шаблоны. Так, для узла дерева в подходящие ему по типу синтаксические шаблоны вставляются представления непосредственных поддеревьев узла. Рассмотрим дерево на рис. 2. Если для него использовать шаблон из листинга 2, то по представлениям его поддеревьев получаем результат, представленный в листинге 3. В итоге из полученного множества представлений нужно выбрать одно окончательное. Выбор происходит согласно критерию оптимальности.

```
Init: {"int i = 0"}
Condition: {"i < 10"}
Increment: {"i++"}
Body: {"if (a) x++ else y++";
      "if (a) x++
      else y++"}
}

For: {
  "for (int i = 0; i < 10; i++)
  { if (a) x++ else y++ }";
  "for (int i = 0; i < 10; i++)
  { if (a) x++
    else y++ }"}
}
```

*Листинг 3. Пример получаемых представлений для конструкции **for***

Вычислительная сложность выполнения первого подготовительного этапа линейно зависит от размеров переданного образца. Поскольку первый этап выполняется один раз для настройки форматера, после чего тот готов обрабатывать произвольное число

программ, то производительность первого этапа не имеет серьезного значения. Так, переданный для анализа образец может быть очень большим. Сложность второго этапа равна  $O(T \times n \times w^6)$ , где  $T$  — максимальное количество шаблонов одного типа,  $n$  — размер синтаксического дерева формируемой программы. Такая оценка имеет место, поскольку каждый узел синтаксического дерева обрабатывается не более одного раза. При этом представления для узла строятся с применением шаблонов подходящего типа, а вставка в шаблон занимает  $O(w^6)$ , как будет показано далее.

Стоит отметить, что все представления целевой программы, построенные с помощью извлеченных из образца синтаксических шаблонов, мы считаем соответствующими требуемому СК. При этом без дополнительной доработки декларативные форматы игнорируют контекстно-зависимые характеристики форматирования узлов. Это ограничение связано с тем, что на данный момент неизвестен общий подход для извлечения контекстно-зависимой информации из образца. Кроме того, при контекстно-зависимом форматировании сложность второго этапа (этапа форматирования) перестает быть линейной, т. к. при обработке узла может потребоваться пересмотр результатов форматирования его дочерних узлов, для которых он является контекстом. В худшем случае это приводит к экспоненциальной сложности обработки синтаксического дерева.

**Извлечение синтаксического шаблона.** В начале обработки образца кода происходит его синтаксический анализ. Для каждого узла полученного синтаксического дерева, соответствующего интересной с точки зрения форматера конструкции, происходит извлечение шаблона. В первую очередь из образца нужно вырезать текст обрабатываемого узла. Стоит отметить, что в вырезанном тексте должен отсутствовать сдвиг относительно объемлющих конструкций, поскольку он контекстно-зависим и в дальнейшем будет мешать при операциях склейки. Далее для конструкций с переменным числом непосредственных поддеревьев в шаблоне

появляется запись о том, какие подузлы в нем присутствуют. Например, конструкция **if** может иметь или не иметь ветку **else**. Для каждого присутствующего подузла устанавливается, является ли текущее представление однострочным или многострочным, а также каков сдвиг относительно конструкции, по которой строится шаблон, в многострочном случае.

Важно заметить, что извлечение шаблона при условии, что вырезанный текст содержит комментарии, в общем случае невозможно по двум причинам. Во-первых, оставить комментарии нельзя, т. к. они несут некоторую контекстно-зависимую семантику. Во-вторых, вырезать комментарии простым способом тоже нельзя, т. к. это может привести к шаблону, не соответствующему СК. Поэтому в нашей реализации для извлечения шаблонов используются только части кода, не содержащие комментарии в значимых местах, т. е. вне позиций подузлов.

Согласно оценке алгоритмической сложности из предыдущего раздела, форматирование программ линейно зависит от числа полученных шаблонов. Как следствие, при увеличении размера образца в  $k$  раз, во столько же раз увеличивается время на форматирование целевой программы. Очевидно, что такое поведение крайне нежелательно. Чтобы обойти это ограничение, мы используем *факторизацию* множества шаблонов. Так, шаблоны, имеющие одинаковые ограничения на поддеревья и неотличимые при вставке, мы отнесем к одному классу эквивалентности и будем хранить по одному представителю каждого класса. Данный метод существенным образом уменьшает количество шаблонов для образцов кода, которые действительно следуют некоторому СК, т. к. конструкции в них представлены единообразно.

**Вставка в синтаксический шаблон.** Из примера вставки в синтаксический шаблон для конструкции **for**, приведенный ранее, должна быть понятна общая идея данного процесса. Вставка в шаблон происходит с помощью горизонтальных склеек. Для этого текст шаблона разделяется на отрезки,

соответствующие участкам поддеревьев и тексту самого шаблона. Пример разделения шаблона конструкции **for** представлен в листинге 4. Далее на каждом шаге происходит склейка текущего результата и множества представлений, соответствующего обрабатываемому отрезку. Для отрезков поддеревьев используются предподсчитанные множества представлений, а для текстовых отрезков — множества из единственного блока, построенного по тексту. Вид склейки (со сдвигом или без) для конкретного подузла записан в шаблоне.

Сложность вставки в шаблон равна  $O(K \times w^6)$ , где  $K$  — максимальное количество поддеревьев конструкции. Заметим, что  $K$  является константой для целевого языка, которая для всех известных нам языков не превосходит 20, поэтому далее мы будем опускать ее из оценок.

- 1) “for (“
- 2) @1
- 3) “; “
- 4) @2
- 5) “; “
- 6) @3
- 7) “)\n { ”
- 8) @4
- 9) ” }”

Листинг 4. Разделения шаблона **for** на отрезки для последующей склейки

```
printf(“%d %d %d, %d”
    , a
    , b
    , c
    , d)
```

Листинг 5. Нестандартное форматирование для списка аргументов функции

**Обработка списочных структур.** Определенную проблему представляют конструкции, потенциально обладающие неограниченным числом поддеревьев. К таким конструкциям относятся списки. Списки выходят за границы общего подхода, поскольку мы не можем завести по шаблону для каждой возможной длины списка, т. к. это было бы слишком обременительно. Кроме того, всегда может появиться спи-

сок, для которого у нас не будет шаблона. Имеются два возможных варианта для решения данной проблемы. Первый, классический, используется в существующих IDE, а второй подразумевает наличие так называемых *переходных* шаблонов.

Классический способ заключается в том, что списки печатаются заполняющим методом, т. е. переход на новую строку происходит в тот момент, когда достигнуто ограничение по ширине текста, или каждый элемент списка печатается на новой строчке. При этом вид и представление разделителя элементов (“, ”, “; ”, “| ” и т. д.) постоянно для каждого конкретного типа списков. Такой способ решения проблемы выходит за пределы декларативного подхода, однако, может быть достаточно просто и эффективно реализован.

Альтернативный способ подразумевает получение и использование *переходных* шаблонов, т. е. конструкции, позволяющей соединить представление головы списка и очередного элемента. Они позволяют конструировать нестандартные представления для списков. Примером может послужить помещение запятой на новой строчке перед элементом списка (см. листинг 5). Дополнительным требованием для практического

использования способа становится необходимость иметь несколько переходных шаблонов, позволяющих получать представление для списка, которое подпадает под ограничение ширины. Например, наравне с «горизонтальным» шаблоном @1, @2 нужно иметь «вертикальный» шаблон @1, @2.

При этом шаблоны должны быть согласованными с точки зрения СК. Препятствием для использования данного способа является сложное вычленение шаблонов из образца и экспоненциальная сложность получения представления по списку.

В нашей инфраструктуре реализованы оба способа, но в большинстве случаев применяется классический.

**Обработка комментариев.** Сложность создают и некоторые комментарии. Комментарии бывают двух видов: структурированные (JavaDoc, DoxyGen) и неструктурированные (обычные комментарии). Структурированные комментарии не выносятся из общего подхода, т. к. для них точно также могут быть извлечены и применены шаблоны. Неструктурированные комментарии не могут быть подвержены изменению, поскольку взаимоположение слов и строк в них может быть семантиче-

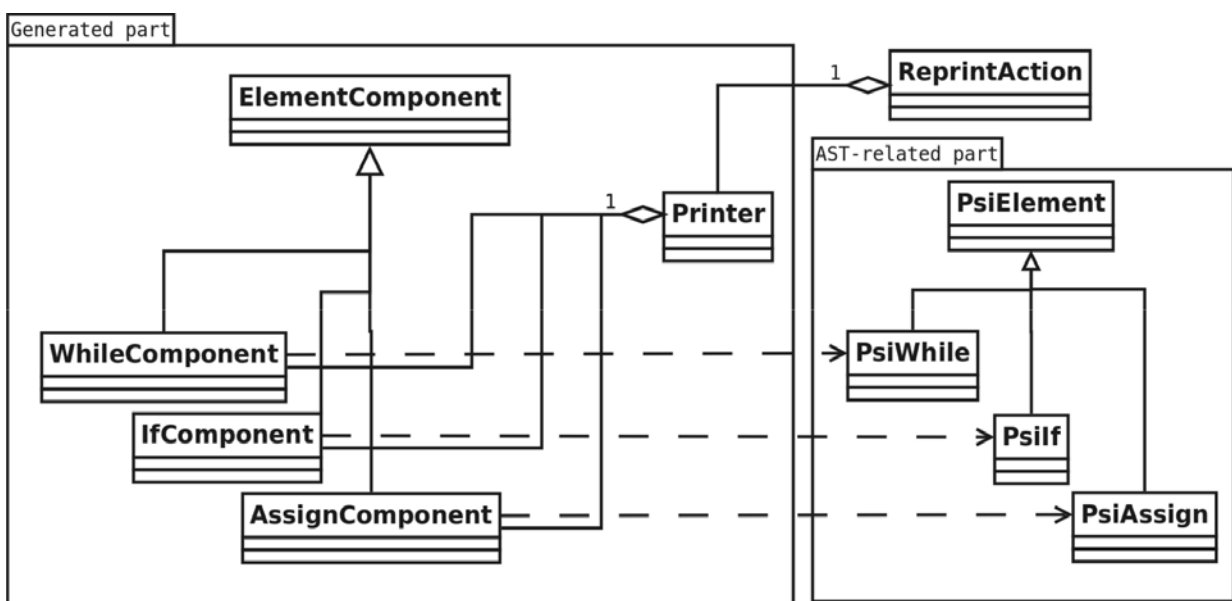


Рис. 3. Архитектура декларативного форматора языка While

ски важно. Так, если комментарий содержит ASCII-диаграмму, то даже незначительное изменение может испортить изображение. Поскольку у нас нет механизмов для изменения комментариев, то слишком длинные комментарии усложняют выполнение ограничения ширины. Одним из вариантов решения может быть игнорирование комментариев при подсчете ширин представлений. Кроме того, неструктурированные комментарии не имеют фиксированного места в синтаксическом дереве (а в соответствии с некоторыми определениями, комментарий в нем вообще не должно быть), что не позволяет обрабатывать их так же, как и остальные конструкции.

В нашей реализации использован следующий подход. Каждый комментарий связывается с самым близким ему узлом синтаксического дерева, чей непосредственный родитель полностью содержит комментарий внутри себя. После вычисления представлений для связанного узла к ним сверху или снизу, в зависимости от начального расположения, присоединяется текст комментария. Получившееся считается итоговым множеством представлений для связанного узла.

**Модельный язык While.** Язык While [6] является простым императивным языком программирования. Он обладает небольшим набором конструкций: оператор ветвления **if**, оператор цикла **while**, присваивание переменной значения, чтение переменной из потока **read** и вывод значения выражения в поток **write**. Пример программы на этом языке приведен в листинге 6. В листинге 7 представлена грамматика языка While в форме Бэкуса–Наура.

Несмотря на небольшое число конструкций, язык представляет интерес с точки зрения декларативных форматов. Так, для данного языка можно варьировать множество стилистических характеристик: ставить ли пробел до/после скобок в конструкциях **write** и **read**, помещать ключевое слово **do** в конструкции **while** на той же строчке, что и условие цикла, или нет и т. д. На примере учебного языка While мы рассмотрим архитектуру и разработку форматер-плагина для IntelliJ IDEA.

```
read(x);
read(n);
res := 1;
while (n > 0) do
  if (n % 2 = 0)
    then n := n / 2;
       x := x * x;
    else n := n - 1;
       res := x * res;
  fi
od
write(res);
```

Листинг 6. Быстрое возведение в степень на языке While

```
prog ::= stmtList
stmtList ::= stmt *
stmt ::= skip | write | read | while | if | assign
skip ::= "skip" ";"
write ::= "write" "(" exp ")" ";"
read ::= "read" "(" id ")" ";"
while ::= "while" "(" bexp ")" "do"
stmtList "od"
if ::= "if" "(" bexp ")" "then" stmtList
      ["else" stmtList] "fi"
assign ::= id "!=" exp ";"

exp ::= literal | id | exp op exp
op ::= "+" | "-" | "*" | "/" | "%"
bexp ::= "true" | "false" | bexp bop bexp |
        exp rel exp | "not" bexp
bop ::= "or" | "and"
rel ::= "<=" | "<" | "=" | ">" | ">="
```

Листинг 7. Грамматика языка While в форме Бэкуса–Наура

**Декларативный форматер для языка While.** Частичная архитектура декларативного форматера для языка While приведена на рис. 3. Ключевым классом форматера является Printer. Он извлекает шаблоны из образца кода, а потом применяет их для целевой программы. Printer содержит в себе ссылки на экземпляры классов-наследников ElementComponent, определяющие специфичные для конструкций языка вспомогательные методы для извлечения и вставки в шаблон. Так, на диаграмме изо-

```

<component name="Assign" psiComponentClass="PsiAssign">
  <subtree name="variable" psiGetMethod="Id" isRequired="true" />
  <subtree name="expression" psiGetMethod="Expr" isRequired="true" />
</component>

<component name="If" psiComponentClass="PsiIf">
  <subtree name="thenBranch" psiGetMethod="ThenBranch" isRequired="true" />
  <subtree name="elseBranch" psiGetMethod="ElseBranch" isRequired="false" />
  <subtree name="condition" psiGetMethod="Bexpr" isRequired="true" />
</component>

<component name="StmtList" psiComponentClass="PsiStmtList">
  <subtree name="list" psiGetMethod="StmtList" isRequired="true"
    hasSeveralElements="true" composition="vertical">
  </subtree>
</component>

```

Листинг 8. XML-описания конструкций **assign**, **if** и списка конструкций языка *While*

бражены `WhileComponent`, `IfComponent`, `AssignComponent`, соответствующие конструкциям `while`, `if` и присваивания языка *While* соответственно. Также на диаграмме представлен класс `ReprintAction`, являющийся посредником между плагином и средой разработки IntelliJ IDEA и, в зависимости от действий пользователя, отдающий команды `Printer` извлечь шаблоны из переданного образца или форматировать целевой текст. Правая компонента диаграммы иллюстрирует классы синтаксического дерева языка *While* (“Psi” – стандартный префикс классов синтаксических узлов в платформе IntelliJ IDEA).

Классы компоненты, изображенной на рис. 3 справа, являются естественной частью синтаксического анализатора целевого языка. При разработке декларативного формatera языка, который уже поддерживается платформой IntelliJ IDEA, данную компоненту не нужно реализовывать – она есть и может быть снова использована. Иначе, как и в случае с языком *While*, классы компоненты, вместе с синтаксическим анализатором, могут быть получены путем генерации из описания грамматики в форме Бэкуса–Наура с помощью `GrammarKit`<sup>4</sup>.

Реальная грамматика языка *While*, использованная для генерации синтаксического анализатора, сложнее той, что представлена в листинге 7, поскольку в ней исключена левая рекурсия в продукциях.

Компонента, изображенная на рис. 3 слева, может быть получена по XML-описанию конструкций целевого языка с помощью разработанного нами генератора. XML-описание состоит из указания имени конструкции, связанного с ней класса синтаксического дерева и описаний подконструкций. Для подконструкции указывается: ее имя, название метода связанного класса синтаксического дерева, вызов которого возвращает соответствующее поддерево, флаг обязательности подконструкции. Кроме того, если подконструкция является списком, то указывается и способ соединения ее подэлементов. Примеры XML-описаний для конструкций **assign**, **if** и списка конструкций приведены в листинге 8.

Таким образом, для создания декларативного формatera языка с использованием нашей инфраструктуры достаточно иметь синтаксический анализатор и разработать XML-описания для его конструкций. Форматер-плагин для языка *While* находится по адресу <https://github.com/anlun/>

<sup>4</sup> <https://github.com/JetBrains/Grammar-Kit>

a)	б)
<pre>read(n); if(n&gt;=0)then   a:=0;   b:=1;   res:=1;   while(n&gt;0)do     res:=a+b;     a:=b;     b:=res;     n:=n-1;   od   write(res); else   res:=0-1;   write(res); fi</pre>	<pre>read ( n ); if ( n &gt;= 0 ) then a := 0;   b := 1;   res := 1;   while ( n &gt; 0 ) do res := a+b;   a := b;   b := res;   n := n-1; od   write ( res ); else res := 0 - 1;   write ( res ); fi</pre>

Листинг 9. Образцы форматирования

a)	б)
<pre>read(x); read(n); res:=1; while(n&gt;0)do   if(n%2=0)then     n:=n/2;     x:=x*x;   else     n:=n-1;     res:=x*res;   fi od write(res);</pre>	<pre>read ( x ); read ( n ); res := 1; while ( n &gt; 0 ) do if ( n % 2 = 0 )   then n := n / 2;     x := x * x;   else n := n - 1;     res := x * res; fi od write ( res );</pre>

Листинг 10. Результат форматирования программы из листинга б по образцам из листингов 9 а и б

whileLang-idea-plugin

**Пример работы декларативного формatera для языка While.** В листингах 9 а и б приведены программы на языке While, использованные в качестве образцов для форматирования одного и того же кода (см. листинг б). Результаты форматирования представлены в листингах 10 а и б.

**Апробация подхода для языков Java и Haskell.** Для более серьезной апробации

метода были выбраны языки Java и Haskell. Язык Java интересен для апробации, поскольку он входит в семейство С-подобных языков, а значит, получив формater для него, достаточно просто прийти к языкам С, С++ и С#. Кроме того, язык Java имеет серьезную поддержку со стороны IntelliJ IDEA, в частности, для него реализованы синтаксический анализатор и стандартный формater.

Таблица 1

Результаты тестирования декларативного формatera для языка Java

Имя файла	Количество строк	Время при ширине 200, с	Время при ширине 250, с
SearchRequestCollector.java	169	0,04	0,05
XDebugProcess.java	236	0,02	0,02
QuickEditHandler.java	504	0,21	0,21
PsiDirectoryImpl.java	618	0,11	0,12
Messages.java	2007	0,73	0,74
AbstractTreeUi.java	5112	1,62	2,01
EditorImpl.java	6789	2,07	2,09
ConcurrentHashMap.java	7191	1,38	1,39

Таблица 2

Результаты тестирования декларативного формatera для языка Haskell

Имя файла	Количество строк	Время при ширине 200, с	Время при ширине 250, с
JSON.hs	95	0,08	0,07
MangoPay.hs	186	0,09	0,09
Compositions.hs	247	0,23	0,23
Darcs.hs	307	0,19	0,19
HsPretty.hs	403	0,37	0,36
HughesPJ.hs	996	0,41	0,41
TraceTrans.hs	2723	0,73	0,72
Lojban.hs	11732	1,67	1,62

При разработке декларативного формatera языка Java выяснилось, что не только списки являются особым случаем для описанного подхода, но также и конструкция **try-catch-finally**, поскольку она может иметь произвольное число секций **catch**. Сложность данной конструкции была преодолена с помощью подхода, аналогичного альтернативному способу обработки списков.

Так, необходимо завести шаблоны перехода от конструкции **try** к первой секции **catch**, от **catch** к следующему **catch**, и от последнего **catch** к **finally**. К сожалению, для этой конструкции пришлось отказаться от сгенерированной по XML-описанию реализации класса-компоненты и написать ее вручную.

Язык Haskell был выбран по другим со-

ображениям. Во-первых, он обладает множеством отличных от языка Java структур, что позволяет проверить выразительность нашей системы. Во-вторых, двумерный синтаксис языка является дополнительным испытанием для работы форматера. Однако никаких проблем, кроме упомянутых в описании общего подхода, при реализации форматера не встретилось.

В табл. 1 и 2 представлены результаты форматирования программных текстов разных размеров на языках Java и Haskell соответственно.

Тестирование производительности проводилось при ограничениях на ширину вывода, равных 200 и 250 символов. Такие ограничения являются серьезным испытанием для нашего подхода, т. к. асимптотика времени работы алгоритма форматирования зависит кубически от максимальной ширины вывода. При этом большие ширины не рассматривались осмысленно, т. к. они на практике не используются.

Файлы для тестирования в случае языка Java выбирались из проекта IntelliJ IDEA Community Edition<sup>5</sup>, а в случае Haskell – из различных репозиторий на GitHub<sup>6</sup>. При всех тестах отклонение не превышало 10 %.

Данные приведенных экспериментов показывают, что декларативные форматы могут использоваться для обработки малых и средних файлов, но на больших файлах время работы слишком велико для практического применения. Проблему производительности можно будет считать решенной, если время работы снизится до 0,5 с.

Декларативные форматы для языков Java и Haskell доступны в репозитории проекта (<https://bitbucket.org/alexeykor/printerplugin>).

Декларативные форматы имеют ряд достоинств и недостатков по сравнению с форматерами современных IDE.

Так, представленные в данной статье форматы имеют возможность настраиваться на нужный СК по примеру кода. Стоит заметить, что если нужный набор настроек для классических форматеров может быть восстановлен по образцу, то этот их недостаток может быть легко устранен. Однако на данный момент не представлено систем, способных на это. Похожее решение предложено в [3], но оно позволяет получить по образцу исключительно значение базового сдвига для подконструкций. Кроме того, вариативность получаемых СК будет все также ограничена множеством и разнообразием настроек форматеров.

Декларативные форматы вычисляют результат, удовлетворяющий критерию оптимальности. Однако поиск оптимального представления существенно повышает время форматирования текста. В то же время классические форматы принимают решения о раскладке поддеревьев локально, с ограниченным предпросмотром, что дает им существенное преимущество в производительности.

Ограничением предложенного подхода является то, что он требует наличия синтаксического анализатора целевого языка, поскольку иначе невозможно получение шаблонов. Однако при реализации декларативного форматера для среды разработки это несущественно, т. к. анализатор уже имеется или нужен еще и для других задач.

Исследование выполнено при поддержке компании JetBrains (<http://jetbrains.com>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Azero P., Swierstra S.D.** Optimal Pretty-Printing Combinators. 1998 [электронный ресурс]

<sup>5</sup> <https://github.com/JetBrains/intellij-community>

<sup>6</sup> <http://github.com>

URL: <http://www.cs.ruu.nl/groups/ST/Software/PP>

2. **Boulychev D., Koznov D., Terekhov A.A.** On Project-Specific Languages and Their Application in Reengineering // Proc. of the 6th European Conf. on Software Maintenance and Reengineering, IEEE Computer Society. Budapest, 2002.



Pp. 177–185.

3. **Corbo F., Del Grosso C., Di Penta M.** Smart Formatter: Learning Coding Style from Existing Source Code // *Software Maintenance. IEEE International Conf.* 2007. Pp. 525–526.

4. **Daskalakis C., Karp R.M., Mossel E., Riesenfeld S., Verbin E.** Sorting and Selection in Posets // *Proc. of the 2th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms.* Society for Industrial and Applied.

5. **Hughes J.** The Design of a Pretty-printing

Library // *Advanced Functional Programming.* 1995.

6. **Nielson F., Nielson H.R., Hankin C.** Principles of Program Analysis. Springer-Verlag New York Inc., 1999.

7. **Podkopaev A., Boulytchev D.** Polynomial-Time Optimal Pretty-Printing Combinators with Choice. In *Perspectives of System Informatics // Lecture Notes in Computer Science.* Berlin. 2015. No. 8974. Pp 257–265.

8. **Wadler P.** A Prettier Printer // *The Fun of Programming.* Palgrave MacMillan, 2003.

## REFERENCES

1. **Azero P., Swierstra S.D.** *Optimal Pretty-Printing Combinators.* 1998. Available: <http://www.cs.ruu.nl/groups/ST/Software/PP>

2. **Boulytchev D., Koznov D., Terekhov A.A.** On Project-Specific Languages and Their Application in Reengineering. *Proceedings of the 6th European Conference on Software Maintenance and Reengineering, IEEE Computer Society.* Budapest, 2002, Pp. 177–185.

3. **Corbo F., Del Grosso C., Di Penta M.** Smart Formatter: Learning Coding Style from Existing Source Code, *Software Maintenance. IEEE International Conference,* 2007, Pp. 525–526.

4. **Daskalakis C., Karp R.M., Mossel E., Riesenfeld S., Verbin E.** Sorting and Selection in

Posets. *Proceedings of the 2th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. Society for Industrial and Applied,* 2009.

5. **Hughes J.** The Design of a Pretty-printing Library. *Advanced Functional Programming,* 1995.

6. **Nielson F., Nielson H.R., Hankin C.** *Principles of Program Analysis.* Springer-Verlag New York Inc., 1999.

7. **Podkopaev A., Boulytchev D.** Polynomial-Time Optimal Pretty-Printing Combinators with Choice. In *Perspectives of System Informatics. Lecture Notes in Computer Science,* Berlin, 2015, No. 8974, Pp 257–265.

8. **Wadler P.** A Prettier Printer. *The Fun of Programming.* Palgrave MacMillan, 2003.

---

**ПОДКОПАЕВ Антон Викторович** — аспирант кафедры системного программирования Санкт-Петербургского государственного университета.

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

E-mail: a.podkopaev@2009.spbu.ru

**ПОДКОПАЕВ Anton V.** *St. Petersburg State University.*

199034, Universitetskaya emb. 7-9, St. Petersburg, Russia.

E-mail: a.podkopaev@2009.spbu.ru

**КОРОВЯНСКИЙ Алексей Юрьевич** — студент кафедры системного программирования Санкт-Петербургского государственного университета.

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

E-mail: aleksei.korovianskii@student.spbu.ru

**KOROVIANSKII Aleksei Yu.** *St. Petersburg State University.*

199034, Universitetskaya emb. 7-9, St. Petersburg, Russia.

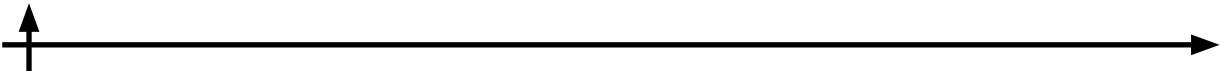
E-mail: aleksei.korovianskii@student.spbu.ru

**ОЗЕРНЫХ Игорь Станиславович** — студент кафедры системного программирования Санкт-Петербургского государственного университета.

199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

E-mail: st011628@student.spbu.ru

**OZERNYKH Igor S.** *St. Petersburg State University.*  
199034, Universitetskaya emb. 7-9, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: st011628@student.spbu.ru



# Аппаратное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.5

УДК 621.382.323

*А.Ю. Алябьев*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ОКСИДА ГАФНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ**

*A.Yu. Aliabev*

### **ATOMIC LAYER DEPOSITION TECHNOLOGY FOR ELECTRONIC COMPONENTS PRODUCTION**

Рассмотрены технологические преимущества процесса атомно-слоевого осаждения, возможное применение при решении проблем дальнейшей миниатюризации и повышения быстродействия полупроводниковых устройств. Описаны результаты проведенного осаждения перспективного материала нанoeлектроники – диоксида гафния различной толщины на кремниевые подложки диаметром 200 и 300 мм. Приведены результаты по формированию многослойных структур с оптимизированными диэлектрическими свойствами – так называемый high-k диэлектрик для создания полупроводниковых интегральных схем. Для созданных образцов представлены результаты измерений диэлектрических характеристик и микроструктурного анализа.

**АТОМНО-СЛОЕВОЕ ОСАЖДЕНИЕ; ТОНКИЕ ПЛЕНКИ; ПОДЗАТВОРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК; ОКСИД ГАФНИЯ.**

An atomic layer deposition technique provides key advantages for developing more efficient materials with optimized dielectric properties (high-k dielectrics) for various semiconductor device applications (for example, transistors and memory cells). Highly conformal atomic layer deposition of dielectric layers on 200 and 300 mm silicon wafers, especially  $\text{HfO}_2$ , has no alternative in sight for the next generations of microelectronics. Thus, we have examined the growth behavior of Hafnium-based materials and focused on the impact of precursor chemistry and process conditions on the bulk growth behavior and the ALD growth characteristics of ternary oxides. Two different ALD reactor design types and two wafer diameters results were compared. The results of measuring the dielectric properties and a microstructure analysis have been shown and discussed.

**ATOMIC LAYER DEPOSITION; HIGH-K DIELECTRICS; MOSFET; HAFNIUM OXIDE.**

Дальнейшее эволюционное развитие микроэлектроники – это, в первую очередь, разработка технических приемов, позволяющих продолжить миниатюризацию электронных элементов: создание новых видов фотолитографии, переход от планарной технологии изготовления микросхем к объемной, применение новых компонентов. Важнейшим направлением развития

технологии КМОП, например, является создание и внедрение новых, более эффективных диэлектрических материалов для подзатворного диэлектрика полевого транзистора.

В результате масштабирования в сторону уменьшения, с момента создания первых полевых транзисторов на основе кремния, отдельные параметры, в част-

ности толщины диэлектрических слоев, вплотную приблизились к своему физическому пределу. Диоксид кремния безусловно обладает рядом достоинств: выращивается на поверхности кристалла путем высокотемпературного окисления, что позволяет точно контролировать его толщину и однородность; имеет хорошую адгезию с кремниевой подложкой; имеет низкую концентрацию дефектов; обладает высокой химической и термической стабильностью.

Однако при его использовании уменьшение размеров транзисторов сталкивается с принципиальными трудностями. При достижении величиной технологически требуемой толщины диэлектрического слоя значения порядка 3 нм [1], оксид кремния перестает удовлетворять требованиям подзатворного диэлектрика, т. к. ограничения по физической толщине приводят к значительному возрастанию затворных токов утечки. Это приводит к ухудшению стабильности характеристик устройства в целом и снижает его долговечность.

Поэтому традиционный оксид кремния в современных интегральных схемах все чаще заменяют новые материалы с высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости high-k. Эти материалы могут наноситься на поверхности сложной геометрии в виде очень тонких пленок. Пленки оксида гафния, например, полученные методом атомно-слоевого осаждения, уже при толщине 5 Å [2] показывают значения коэффициента диэлектрической проницаемости от 16 до 30 в зависимости от кристаллической формы [3], что превышает аналогичный показатель для оксида кремния (3,9).

В связи с постоянным уменьшением размеров при одновременном повышении уровня интеграции схем большинство традиционных способов осаждения не могут надежно обеспечить получение диэлектрических пленок с соблюдением требований по равномерности, плотности, отсутствию отверстий, трещин и иных дефектов. Как следствие, атомно-слоевое осаждение — ключевой метод благодаря возможности управления структурой пленки при нано-

метровых и субнанометровых толщинах.

В статье представлены многослойные структуры с оптимизированными диэлектрическими свойствами — слоями так называемого high-k диэлектрика для создания полупроводниковых интегральных схем. Основная практическая задача, рассмотренная в статье, — нанесение методом атомно-слоевого осаждения диэлектрических слоев оксида гафния различной толщины на кремниевые подложки диаметром 200 и 300 мм. Оксид гафния является безальтернативным материалом уже при использовании технологий с разрешением менее 45 нм. Поэтому исследования свойств получаемых пленок, оптимизация процесса осаждения и поиск новых исходных материалов принципиальны для дальнейшего повышения характеристик интегральных схем и устройств.

#### **Особенности процесса атомно-слоевого осаждения**

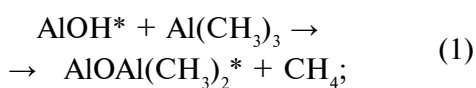
Атомно-слоевое осаждение (АСО) считается методом осаждения, имеющим наибольший потенциал для получения сверхтонких равномерных пленок с возможностью управления их толщиной и составом на атомарном уровне.

В методе АСО используются последовательные, самоограниченные и поверхностно-контролируемые газофазные химические реакции, что дает полный контроль над ростом пленок в нанометровом/субнанометровом масштабе. Вследствие самого физического механизма образования пленок, газы не реагируют до тех пор, пока они не соприкасаются с поверхностью. Это означает, что рост пленки происходит «вверх» от поверхности за счет формирования последовательности атомных слоев. АСО пленки получаются плотными, с отсутствием разрывов, дефектов и микроотверстий. Кроме того, их толщина, структурное и химическое качество могут с высокой точностью контролироваться на уровне слоя [4].

Саморегуляция процесса АСО позволяет достигать практически идеального покрытия рельефа подложки даже при осаждении на наночастицы и на поверхности с нанометровыми неровностями [5]. Получаемая

равномерность толщины пленки и отсутствие дефектов роста — ключевое качество при нанесении диэлектрических покрытий. Принципиальным моментом является и то, что равномерность нанесения покрытия сохраняется при существенном увеличении геометрических размеров подложки, что позволяет обрабатывать несколько подложек одновременно. Так как участвующие в реакциях вещества находятся в газовой фазе, молекулы распределяются по объему равномерно, и соответственно площадь подложки ограничена лишь размерами реактора. Кроме этого, временное разделение двух реакций не позволяет молекулам компонентов прореагировать между собой с образованием гранулированных пленок на поверхности подложки.

В качестве типового примера процесса атомно-слоевого осаждения рассмотрим процесс осаждения пленки  $Al_2O_3$ . Осаждение пленки  $Al_2O_3$  обычно проводится с использованием триметилалюминия (ТМА) и воды. Поверхностные реакции могут быть описаны следующей парой выражений:



где \* обозначены осажденные на поверхности молекулы.

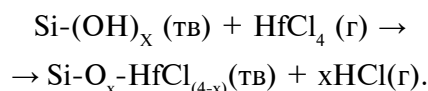
Многokrатно повторяя поверхностные реакции можно получить практически линейную зависимость толщины пленки от количества циклов. Основные производители оборудования для атомно-слоевого осаждения (Picosun, Veeco, Oxford Instruments) гарантируют разброс толщин в пределах  $< \pm 1\%$  при осаждении, например, оксида алюминия на подложке диаметром 200 мм.

Отсутствие дефектов и равномерность покрытия пленок также может быть подтверждена их электрическими свойствами. Пленки оксида алюминия толщиной порядка 5 нм, полученные в результате приведенной выше реакции осаждения, например, показывают значение коэффициента диэлектрической проницаемости на уровне 7,5–8. На вольт-амперных характеристиках

таких диэлектрических слоев отмечается низкий уровень утечки —  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>. Нарастание тока с увеличением приложенного напряжения, обусловленное туннелированием, также показывает отсутствие дефектов структуры пленки [6].

### Технология осаждения оксида гафния и экспериментальные методы

Работа проводилась в два этапа: изготовление образцов методом АСО и затем измерение их характеристик. Рассмотрим технологическую карту атомно-слоевого осаждения диоксида гафния. Кремниевые подложки диаметром 200 и 300 мм предварительно очищались в растворе соляной кислоты и помещались в раствор плавиковой кислоты для создания на поверхности кремния гидроксильных групп. Далее осуществлялось тепловое атомно-слоевое осаждение оксида гафния при температуре 300 и 450 °С с использованием тетрахлорида гафния и воды в качестве прекурсоров:



Тетрахлорид гафния — наиболее распространенный металлоорганический прекурсор для осаждения оксида гафния на поверхности кремния. В качестве окислителя помимо воды может использоваться озон или перекись водорода.

Для определения характеристик пленок применялось несколько экспериментальных методик. Толщина пленок контролировалась с помощью спектрального эллипсометра. Использовался эллиптически поляризованный свет ксеноновой лампы в диапазоне 250–800 нм. Измерялись величины коэффициента преломления, волновое число и фазовый сдвиг. Рентгеновская электронная микроскопия использовалась в качестве количественного метода исследования, позволяющего определять элементный состав, эмпирическую формулу, химические и электронные состояния компонентов внутри образца. Дифракция рентгеновских лучей применялась для определения параметров кристаллической структуры. Вторичная ион-массовая спек-

троскопия применялась как метод разрушающей диагностики локального атомарного, изотопного и молекулярного состава образца. Измерения электрических свойств и прочностных показателей осуществлялись путем снятия вольт-амперных характеристик при различных значениях напряжения смещения и плотности тока.

### Результаты и обсуждение

Для осаждения на подложки диаметром 200 мм использовался комплекс PICOSUN™ R-200 с реакционной камерой типа shower head. Данный реактор оптимизирован для исследований, разработки технологии и пилотного производства. Конструкция камеры позволяет осаждать пленки на подложки, трехмерные объекты и пористые материалы.

Подложки диаметром 300 мм помещались в машину ASM™ Polygon 8300 с реактором ASM Pulsar 3000 типа cross-flow. Реакционная камера с горячими стенами, ламинарность потока и быстрое переключение источников газа позволили добиться равномерности толщины на уровне 1 А.

Различные толщины пленок были получены последовательным применением алгоритма осаждения, состоящего из 24, 44 и 69 циклов повторения импульсов прекурсоров. Осаждение осуществлялось при температуре подложки 300 °С. Контроль толщины получаемой пленки осуществлялся прямо в ходе осаждения методом спектральной эллипсометрии в 49 точках (рис. 1 и 2).

После осаждения образцы помещались в печь и отжигались при температуре 800 °С для достижения высокой степени кристалличности пленки оксида гафния.

Исследование методом рентгеновской фотоэлектронной микроскопии проводилось на установке ThermoFisher Theta 300i. Результаты приведены на рис. 3. Образцы показали почти линейную зависимость толщины пленки от количества циклов осаждения. Остаточные следы радикалов хлора были обнаружены только на чистой подложке, взятой для сравнения. Они обусловлены применением соляной кислоты для предварительной очистки поверхности. Сигналы, соответствующие азоту, получены, вероятно, в связи с наличием остатков

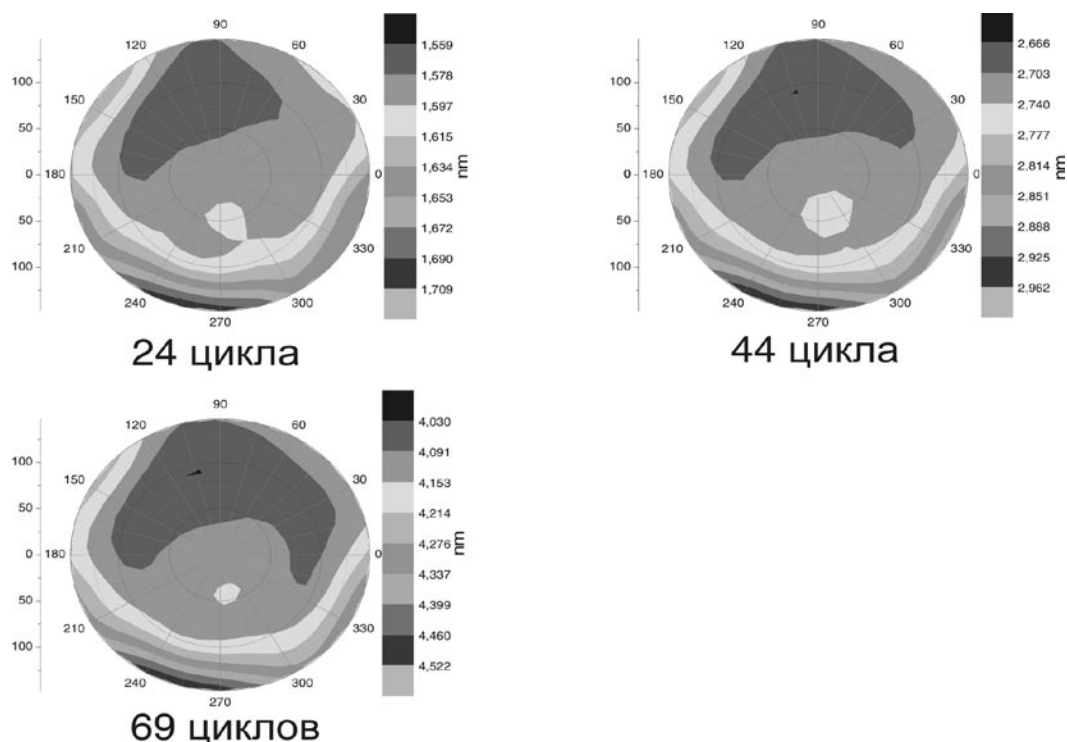


Рис. 1. Распределение толщины пленки оксида гафния (подложка 300 мм)

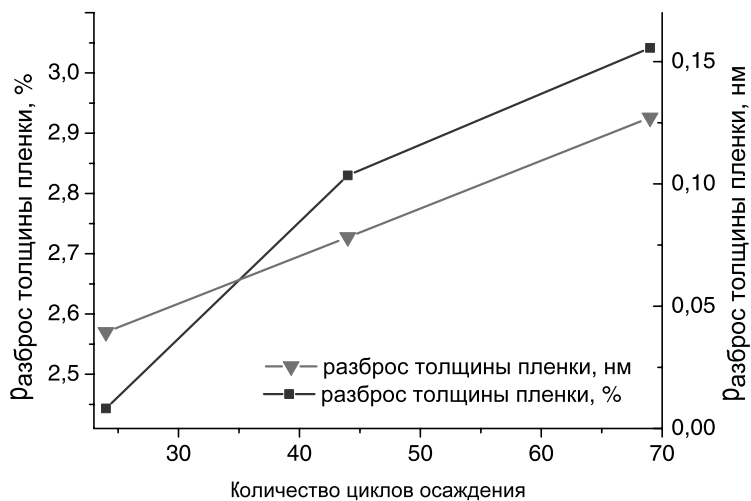


Рис. 2. Отклонение толщины пленки оксида гафния от средней величины (подложка 300 мм)

органических загрязнений на поверхности подложки даже после очистки. Наилучшая стехиометрия оксида гафния наблюдалась для образца, соответствующего алгоритму осаждения из 69 повторений.

Дифракция и преломление рентгеновских лучей наблюдались в приборе Bruker D8 Discover с медным анодом и системой параллельных коллиматоров. Измерения показали высокую степень кристаллизации пленки оксида гафния. В основном присутствует моноклинная фаза, однако даже после отжига в пленке присутствуют области кубической фазы. Экспериментальная кривая для плоскости (100) хорошо корре-

лирует с вычисленной по формуле Дебая расчетной кривой для трехслойной пленки: 32 нм  $\text{HfO}_2$  / 1 нм  $\text{SiO}_2$  / Si (см. рис. 4).

Подложки диаметром 200 мм исследовались во времяпролетном масс-спектрометре ION-TOF ToF-SIMS 300R. Пластина разрезалась на несколько небольших частей, половина помещалась в печь и отжигалась, вторая – нет. Затем образцы подвергались бомбардировке первичными ионами в условиях сверхглубокого вакуума. Первичные ионы выбивали из образца нейтральные и заряженные частицы, которые затем анализировались масс-спектрометром. В зависимости от энергии облучающих ионов были

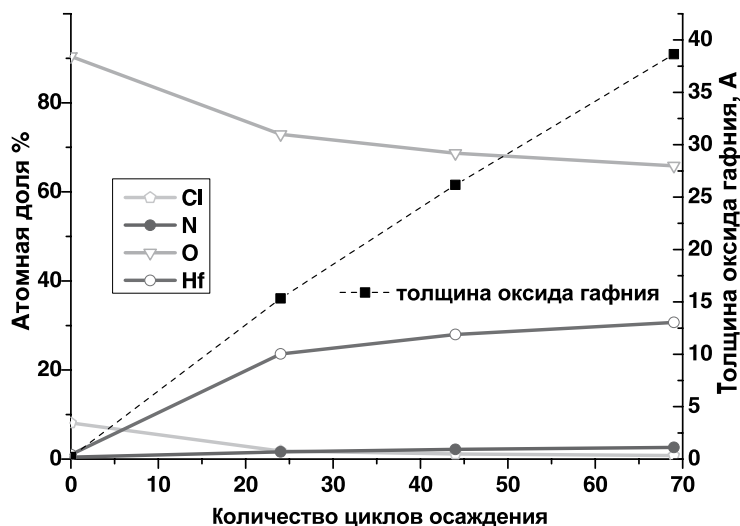


Рис. 3. Спектры рентгеновских фотоэлектронов (образцы 300 мм)

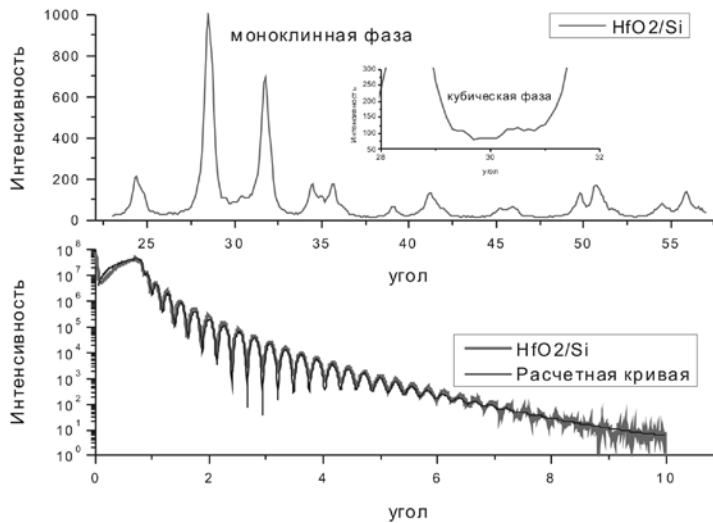


Рис. 4. Дифракция рентгеновских лучей (образцы 300 мм)

получены спектры поверхностных слоев и структура образца вплоть до глубины 20 нм. Ожидаемые атомные доли компонентов получены экспериментально, соотношение элементов соответствовало стехиометрическим коэффициентам оксида гафния (рис. 5). Наблюдался профиль пленки оксида  $\text{HfO}_2$  без островков и центров нуклеации, отмечалась шероховатость исходной подложки. Отличия между образцами, подвергавшимися отжигу и не подвергавшимися, оказались незначительными. Это связано с изначально высокой степенью кристалличности образцов, полученных в реакторе Picosun при более высокой температуре (осаждение при  $450^\circ\text{C}$ ).

Для оценки электрических свойств образцов на них методом газовой фазной эпитаксии наносился слой  $\text{TiN}$ , а затем методом молекулярно-пучковой эпитаксии – электроды из  $\text{Ni}$ . Полуавтоматическое снятие вольт-амперных характеристик проводилось в диапазоне температур от минус  $10^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ . Получен ток утечки менее  $1,6 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> для образца подложки с осажденными 69 монослоями. Результаты измерения диэлектрических свойств пленок приведены на рис. 6.

Пленки оксида гафния были нанесены методом термического атомно-слоевого осаждения с использованием в качестве

прекурсоров тетрахлорида гафния  $\text{HfCl}_4$  и воды при температуре 300 и  $450^\circ\text{C}$  (подложки диаметром 300 и 200 мм соответственно). Получены сравнимые результаты для обоих типов реакторов осаждения. Проанализирован режим нанесения пленок для стабилизации моноклинной кристаллической фазы с более высоким показателем коэффициента диэлектрической проницаемости. Описано влияние отжига на кристаллическую структуру пленки, 93 % пленки имеет моноклинную кристаллическую решетку после быстрого отжига при  $800^\circ\text{C}$ . Измерения электрических характеристик показали очень низкие токи утечки и хорошую прочность пленки. Отмечены незначительные отклонения в толщине пленки на краях подложек – в пределах 5 % от толщины слоя (см. рис. 1).

Полученные результаты подтверждают перспективность метода атомно-слоевого осаждения для производства элементов электронной компонентной базы по технологии КМОП при осаждении диэлектрических слоев для устранения туннельного эффекта при уменьшении размеров подзатворного диэлектрика до 1 нм и меньше.

Кроме этого, рассмотренные нами материалы могут найти применение при создании конденсаторов для ячеек памяти с характерным размером менее 100 нм. Оксид гафния с улучшенными диэлектрическими



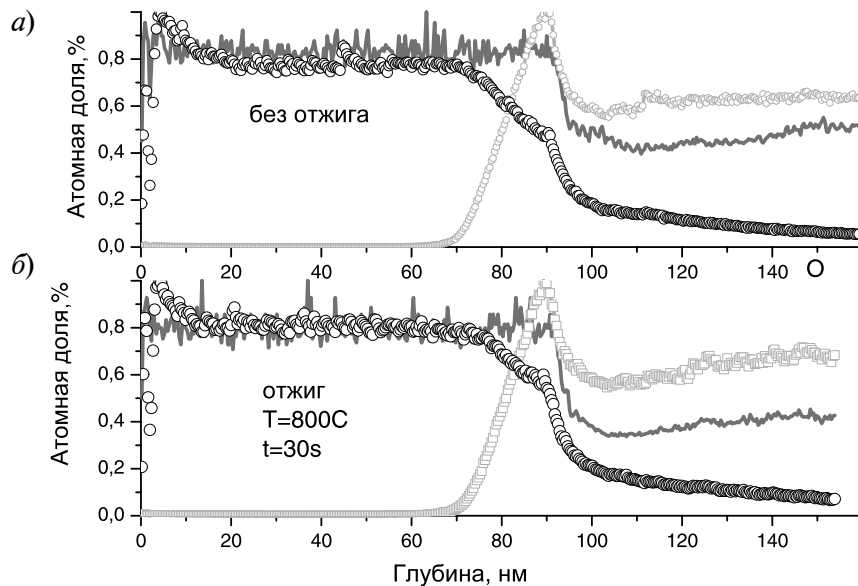


Рис. 5. Масс-спектр вторичных ионов (разрез подложки 200 мм):  
 а – без отжига; б – с отжигом  
 (—) O; (—○) Si; (○) HfO<sub>2</sub>

свойствами может применяться для производства ячеек памяти на пьезо- и ферроэлектрическом эффекте.

Процесс атомно-слоевого осаждения дает возможность получить высококачественные затворные стеки на Ge, совместимые с геометрией транзисторов с трехмерной структурой затвора, что позволит уменьшать размеры элементов для создания логических интегральных схем с низким энергопотреблением. Использование плазмостимули-

рованного АСО обеспечивает гибкость в создании требуемых свойств границ слоев материалов в тонкопленочных структурах на атомном уровне, необходимую для следующего поколения высококачественных германиевых FinFET-транзисторов.

Если говорить о перспективах применения технологии атомно-слоевого осаждения в целом, то они практически безграничны для создания современной электронной компонентной базы: микро- и нанозлектро-

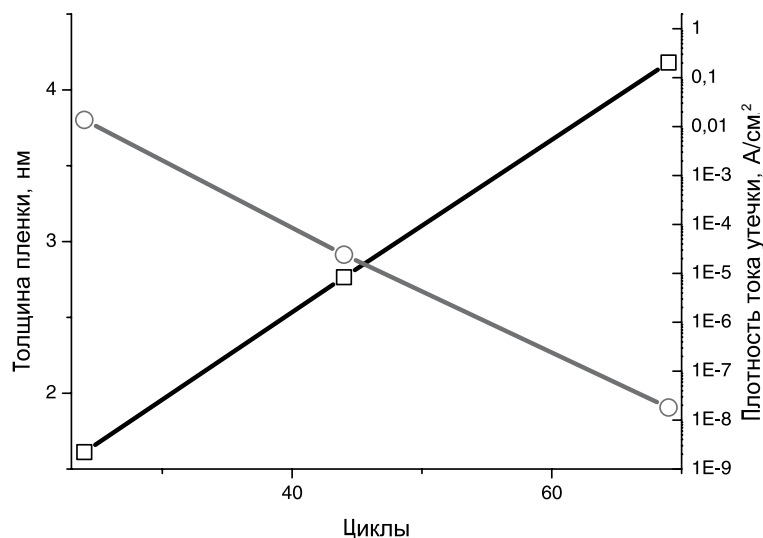


Рис. 6. Зависимость тока утечки от толщины пленки (подложка 300 мм)  
 (—□) толщина пленки; (—○) плотность тока утечки

механические системы (МЭМС и НЭМС), СБИС, сенсоры, оптоэлектроника, солнечные элементы, головки чтения для жестких дисков, технология 3D (VIA, TSV). Стоит отметить и относительно новое направление развития светодиодов – органические светодиоды. В то время как в традиционных светодиодах излучение генерируется с помощью неорганических полупроводниковых материалов, в органических излучение возникает в слоях полимерных материалов при их подключении к источнику электричества. Важным фактором, влияющим на работу таких светодиодов, являются тонкие, прозрачные слои проводящих оксидов. При этом важно обеспечить высочайшее качество технологического процесса осаждения. И именно технология АСО позволяет наносить пленки и герметичные

покрытия на полимерные слои и металлические фольги. Кроме этого, технология атомно-слоевого осаждения позволяет получать многослойные структуры в одном технологическом цикле, где число слоев каждого из материалов может точно регулироваться. Это очень важно для создания наноламинатов и других искусственных материалов, которые используются для создания диэлектрических зеркал, для защитных слоев, предотвращающих протекание коррозионных процессов. Применение АСО для создания стабильных светоизлучающих органических полевых транзисторов с высоким квантовым выходом люминесценции и регулируемым спектром излучения в видимом диапазоне длин волн (400–650 нм), особенно важно для создания алфавитно-цифровых дисплеев нового поколения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Groner M.D., Elam J.W., Fabreguette F.H., George S.M. Electrical characterization of thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrates *Thin Solid Films*. 2002. 413. P. 186.
2. Robertson J. High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors // *Reports on Progress in Physics*. 2006. No. 69. Pp. 327–396.
3. Wilk G.D., Wallace R.M., Anthony J.M. High-κ gate dielectrics: Current status and materials

properties considerations // *J. of Applied Physics*. 2001. No. 89(10). Pp. 5243–5275.

4. George S.M. Atomic Layer Deposition: An Overview // *Chem. Rev.* 2010. No. 110. Pp. 111–131.

5. Sicard E. Introducing 65 nm technology in Microwind3. *Microwind application note*. 2006.

6. McCormick J.A., Cloutier B.L., Weimer A.W., George S.M. Rotary reactor for atomic layer deposition on large quantities of nanoparticles // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2007. No. 25. Vol. 67.

#### REFERENCES

1. Groner M.D., Elam J.W., Fabreguette F.H., George S.M. *Electrical characterization of thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrates Thin Solid Films*, 2002, 413, P. 186.
2. Robertson J. High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors. *Reports on Progress in Physics*, 2006, No. 69, Pp. 327–396.
3. Wilk G.D., Wallace R.M., Anthony J.M. High-κ gate dielectrics: Current status and materials

properties considerations, *Journal of Applied Physics*, 2001, No. 89(10), Pp. 5243–5275.

4. George S.M. Atomic Layer Deposition: An Overview, *Chem. Rev.*, 2010, No. 110, Pp. 111–131.

5. Sicard E. *Introducing 65 nm technology in Microwind3. Microwind application note*, 2006.

6. McCormick J.A., Cloutier B.L., Weimer A.W., George S.M. Rotary reactor for atomic layer deposition on large quantities of nanoparticles, *Journal Vac. Sci. Technol. A*, 2007, No. 25, Vol. 67.

---

АЛЯБЬЕВ Алексей Юрьевич – ассистент кафедры интегральной электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: alyabjev\_au@mail.ru

ALIABEV Aleksei Yu. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: alyabjev\_au@mail.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.6

УДК 681.51

*А.П. Козионов, А.Л. Пяйт, И.И. Мохов, Ю.П. Иванов*

**АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДАМБЫ  
НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ОДНОКЛАССОВОЙ  
КЛАССИФИКАЦИИ ОДНОМЕРНЫХ СИГНАЛОВ**

*A.P. Kozionov, A.L. Pyayt, I.I. Mokhov, Yu.P. Ivanov*

**AN ALGORITHM FOR DETECTING ABNORMAL DIKE STATE BASED  
ON WAVELET TRANSFORM AND ONE-CLASS CLASSIFICATION  
OF ONE-DIMENSIONAL SIGNALS**

---

Мониторинг состояния земляных дамб – важная и актуальная задача. Одним из ключевых составляющих системы мониторинга состояния дамб являются алгоритмы обнаружения аномального поведения дамб. Алгоритмы должны в режиме онлайн определять аномальное поведение дамбы по сигналам с аппаратуры контроля. Представлен алгоритм на основе метода машинного обучения обучающийся на исторических данных о нормальном состоянии дамбы, так как данные об аномальном состоянии дамбы недоступны, а моделирование высокочастотными. Обнаружение аномального поведения дамбы производится методом одноклассовой классификации «нейронные облака». «Нейронные облака» оценивают нелинейной, нечеткой функцию принадлежности результатов вейвлет-преобразования сигнала к области нормального поведения. Применение вейвлет-преобразования позволяет обнаружить аномальное поведение дамб, скрытое в частотно-временных свойствах сигнала. Апробация алгоритмов проведена на реальных данных дамбы, расположенной в городе Бостон, Великобритания.

**ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ; МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ДАМБ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ; ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ; НЕЙРОННЫЕ ОБЛАКА; ОДНОКЛАССОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ.**

Dike conditions monitoring is a challenging task. Algorithms for dike anomaly detection are one of the key components of a dike condition monitoring system. Algorithms for anomaly detection have to detect anomalies in dike behaviour (abnormal behaviour) in an on-line mode based on measurements collected from sensors installed in the dike. A machine-learning-based algorithm presented in this paper is trained on historical data on the normal dike state because data for abnormal dike behaviour is not available and simulation is time-consuming. Detection of abnormal dike behaviour is done by applying a 'neural clouds' one-class classification method. The 'neural clouds' one-class classifier is used for estimating the nonlinear fuzzy membership function of normal behavior for features from wavelet decomposition. The application of a wavelet transform can detect abnormal dike behaviour hidden in the time-frequency signal properties. Algorithms were tested on real data of a dike located in Boston, United Kingdom.

**ANOMALY DETECTION; DIKE CONDITIONS MONITORING; INTELLIGENT SIGNAL PROCESSING; WAVELETS; NEURAL CLOUDS; ONE-CLASS CLASSIFICATION.**

В настоящее время более чем две трети европейских городов постоянно находятся под риском затопления. Число зарегистрированных наводнений увеличилось в четыре раза по сравнению с восьмидесятыми годами XX века [1]. Изменение климата и быстрая урбанизация еще сильнее усугубляют проблему.

Большое количество наводнений вызвано прорывом систем защиты от наводнений: дамб и плотин [2]. Например, в Нидерландах с 1134 по 2006 гг. было зарегистрировано примерно 1735 случаев разрушения дамб [3]. В Европе существуют несколько проектов, направленных на исследование и разработку систем контроля защиты от наводнений: FLOODsite [4], FloodControl 2015 [5], UrbanFlood [6]. Одним из важнейших элементов подобных систем является система мониторинга состояния дамб.

Исторически мониторинг дамб осуществляется инспекторами, которые занимаются обходом тысяч километров дамб. Каждый участок дамбы проверяется один раз в несколько лет. Современные технологии позволяют осуществлять непрерывный мониторинг состояния дамбы с использованием технологий дистанционных измерений.

Проблема мониторинга состояния земляных дамб заключается в сложном поведении дамбы и, как следствие, измеряемых параметров системы, что требует детального исследования объекта мониторинга и моделирования большого числа возможных сценариев разрушения дамбы. Это дорого и не всегда возможно.

В данной статье мы представляем подход и алгоритм обнаружения аномального состояния земляных дамб. Предлагаемый подход основан на методах машинного обучения и обработки сигналов и не требует детального исследования объекта мониторинга. Обучение алгоритмов проходит на исторически измеренных данных нормального состояния дамбы. Настоящий подход и алгоритм разрабатывались для системы раннего предупреждения UrbanFlood [6]. Апробация алгоритма проводилась на данных с дамбы, расположенной в городе Бостон (Великобритания).

### Подход к обнаружению аномального поведения дамб

Мониторинг состояния дамбы осуществляется путем анализа измерений, собранных с сети различных датчиков, установленных в дамбу, таких как датчики порового давления (давление воды в порах почвы), инклинометров и температуры. Задача системы мониторинга – обнаружить аномальное состояние дамбы. Под аномальным состоянием (поведением) подразумевается отклонение от нормального состояния объекта, которое может привести к неисправности или разрушению дамбы [7]. Датчики устанавливаются в каждую кросс-секцию дамбы. Такое деление объекта мониторинга позволяет локализовать аномальное состояние и предоставляет избыточность измерений. Применение сетей датчиков как части системы раннего предупреждения в рамках проекта UrbanFlood описано в [8, 9].

Основная идея предлагаемого подхода заключается в применении методов обнаружения аномального поведения, обучающихся на «сырых» и/или предварительно обработанных данных [10, 11]. При этом данные системы контроля состояний дамб могут содержать пропуски, вызванные сбоями системы сбора данных и другими факторами. Такие пропуски могут иметь протяженность от нескольких минут до нескольких дней. Обнаружение аномального состояния состоит из трех этапов, представленных на рис. 1. Первый этап – сбор данных с датчиков. Второй этап – их предварительная обработка, в нашем случае восстановление пропусков в данных алгоритмом на основе метода авторгерессии [12]. На третьем этапе с помощью алгоритма обнаружения аномального состояния извлекается информация из сигналов методами частотно-временного анализа. Далее алгоритмы классификации, основанные на методах машинного обучения, определяют состояние дамбы.

Применение методов частотно-временного анализа обосновано тем, что сигналы с дамбы имеют ярко выраженные частотно-временные зависимости, вызван-

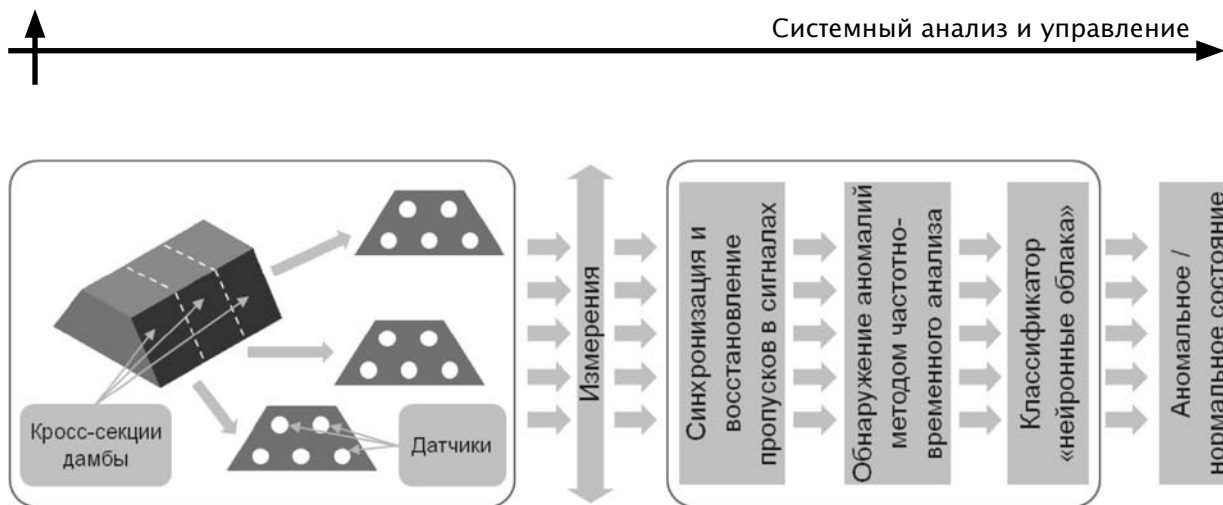


Рис. 1. Этапы обнаружения аномального состояния дамбы

ные влиянием внешних факторов (например, приливы и отливы и т. д.). В работе [13] оконное преобразование Фурье применялось для анализа горизонтального ускорения, полученного в процессе моделирования влияния землетрясения на земляную дамбу. В [14] вейвлеты применялись для анализа измерений температуры воды с Уивенхойской дамбы (Великобритания). Каждый сигнал был разложен с использованием вейвлет-преобразования на дневную, сезонную и годовую составляющие. Каждый уровень разложения использовался для дальнейшего анализа. Обзор возможных применений вейвлет-преобразования для задачи контроля целостности структур представлен в [15]. К примеру, вейвлеты применялись для обнаружения трещины в арке бетонной дамбы [16]. В [17] представлен анализ динамического поведения геотехнических структур для мониторинга землетрясения. Вейвлеты применялись для анализа поведения земляной дамбы. В [18] представлен анализ сейсмического поведения земляной дамбы. Один из результатов этой работы состоит в том, что устойчивость дамбы должна рассматриваться в анализе сейсмического отклика дамбы, т. к. это ведет к уменьшению амплитуд колебаний собственных частот плотины.

Поскольку для дамбы нередко доступны лишь данные о нормальном состоянии, классификацию состояния дамбы логично производить, оценивая степень принадлежности сигналов датчиков к некоей области нормального состояния. Для решения такой задачи применимы алгоритмы одно-

классовой классификации, основанные на оценке принадлежности сигнала к одному заданному классу. В нашем случае это область «исторических» измерений, соответствующих нормальному состоянию дамбы.

#### Дискретное вейвлет-преобразование

Вейвлет-преобразование (wavelet transform) — это метод частотно-временного (масштабно-временного, в терминологии теории вейвлетов) разложения сигнала. В отличие от преобразования Фурье вейвлет-преобразование позволяет анализировать только в частотной области [19]. Вейвлет-преобразование делят на два вида: непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) и дискретное вейвлет-преобразование (ДВП).

НВП задано непрерывными вейвлет-функциями. Масштабы и время, на которых происходит разложение, изменяются непрерывно. Данное преобразование получило широкое применение в научных исследованиях [19].

ДВП задано семейством дискретных вейвлет-функций и применяется к дискретным сигналам. В случае ДВП масштабы (уровни разложения в терминологии ДВП), для которых происходит разложение, увеличиваются пропорционально степени двойки, а дискретизация каждого уровня разложения уменьшается в два раза по сравнению с предыдущим более высокочастотным уровнем разложения. У дискретного вейвлет-преобразования много приложений в естественных науках, инженерном деле, математике (включая прикладную).

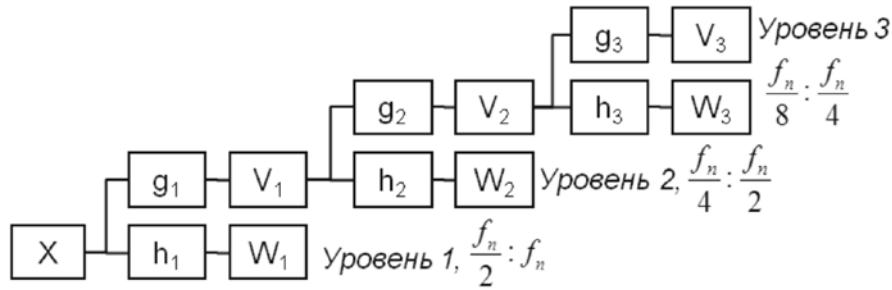


Рис. 2. Каскадный алгоритм дискретного вейвлет-преобразования

Дискретное вейвлет-преобразование получают применением набора фильтров. Сначала сигнал пропускается через низкочастотный фильтр (масштабирующий фильтр). В результате чего получаются коэффициенты аппроксимации  $V$ . Одновременно сигнал пропускается через высокочастотный фильтр, который называется *вейвлет-фильтром*, в результате получаются вейвлет-коэффициенты  $W$ . Эти два фильтра связаны между собой и называются *квадратурными зеркальными фильтрами*. Так как половина частотного диапазона отфильтрована, то, согласно теореме Котельникова, отсчеты полученных сигналов можно проредить в два раза. Это разложение можно повторить несколько раз для коэффициентов аппроксимации каждого последующего разложения. Данный каскадный алгоритм, предложенный Стефаном Малла [19], можно записать в следующем виде:

$$W_j = (h * V_{j-1}) \downarrow 2, \quad (1)$$

где  $W_j$  – вейвлет-коэффициенты ДВП, уровня разложения  $j$ ;  $V_{j-1}$  – коэффициенты аппроксимации уровня разложения  $j-1$ ;  $*$  – оператор полной свертки;  $\downarrow$  – оператор прореживания. Алгоритм проиллюстриро-

ван на рис. 2 ( $f_n$  – частота Найквиста).

Коэффициенты аппроксимации:

$$V_j = (h * V_{j-1}) \downarrow 2, \quad (2)$$

где  $V_j$  – коэффициенты аппроксимации ДВП, уровня разложения  $j$ ;  $V_{j-1}$  – коэффициенты аппроксимации уровня разложения  $j-1$ ;  $*$  – оператор полной свертки;  $\downarrow$  – оператор прореживания.

Поскольку квадратурные зеркальные фильтры ДВП на каждом уровне разложения разделяют сигнал на низкочастотную и высокочастотную часть, то полоса частот коэффициентов аппроксимации каждого уровня разложения (по отношению к исходному сигналу) будет находиться в области  $\left[0 : \frac{f_n}{2^j}\right]$ , а полоса частот вейвлет-коэффициентов  $\left[\frac{f_n}{2^j} : \frac{f_n}{2^{j-1}}\right]$ , где  $f_n$  – частота Найквиста (в два раза ниже частоты дискретизации сигнала),  $j$  – уровень разложения. На рис. 3 представлены уровни ДВП в частотной области.

В отличие от непрерывного вейвлет-преобразования, ДВП рассчитывается на масштабах  $2^j$ , где  $j$  называется уровнем разложения, что позволяет рассчитывать ко-

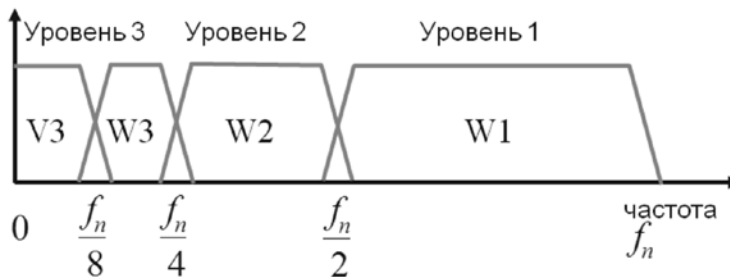


Рис. 3. Представление ДВП в частотной области

эффиценты ДВП быстрее, чем в случае НВП за  $n \log_2(n)$  операций, где  $n$  – длина временного ряда. В силу двукратного прореживания длина сигнала должна быть кратна  $2^{J_{\max}}$ , где  $J_{\max}$  – число уровней разложения.

Также стоит отметить ортогональность вейвлет и масштабирующих фильтров к полиномам заданной степени. Это означает, что если во временном ряде присутствует такой полином, то он будет оставаться в последнем уровне аппроксимации.

### Метод «нейронные облака»

К одним из наиболее быстроразвивающихся и перспективных методов классификации относятся методы на основе машинного обучения. Для обучения классификатора используются лишь данные о нормальном поведении сигнала, данные о видах аномального поведения недоступны. В качестве такого метода в статье рассматривается классификатор «нейронные облака» [20].

Наиболее часто для задач обнаружения аномалий используют различные метрики расстояний (Евклидова, Махаланобиса и др.) [21], методы на основе оценки плотности вероятности данных, например, гауссовские смеси (GMM – Gaussian Mixture Models) [21], которые оценивают плотность вероятности для данных, соответствующих нормальному состоянию. Общий недостаток этих методов состоит в том, что они сами по себе не являются классификаторами, и их выход все равно нужно каким-то образом классифицировать [22]. Также стоит отметить одноклассовый метод опорных векторов (one-class SVM – Support vector machines) [21], недостаток метода заключается в том, что он оценивает четкую границу класса, которую нельзя перенастроить (скорректировать) во время использования классификатора, а можно только при новом переобучении классификатора, что может быть высокочастотным по времени.

«Нейронные облака» оценивают нелинейную, нечеткую функцию принадлежности (инкапсулятор) данных к области нормального поведения, для исходного «нормального» множества признаков. Затем

функция принадлежности используется для оценки принадлежности новых экземпляров данных к области нормального поведения. Выход нейронных облаков – значение от нуля до единицы. Значения, близкие к единице, отражают нормальное поведение, а близкие к нулю – аномальное. Таким образом, «нейронные облака» позволяют давать оценку близости текущего состояния к аномальному, что может использоваться при принятии решения.

Оценка функции принадлежности состоит из двух шагов: кластеризации данных методом АКМ (advanced  $k$ -means, улучшенный  $k$ -средних) и аппроксимации кластеров радиальными базисными функциями (РБФ). Смесь РБФ можно представить в виде нечеткой нейронной сети.

АКМ – это модификации хорошо известного метода  $k$ -средних, с возможностью адаптивного расчета оптимального числа кластеров при заданном максимальном числе кластеров (центроидов).

АКМ состоит из следующих шагов:

1. Задается начальное максимальное и минимальное число центроидов.
2. Вызывается алгоритм  $k$ -средних.
3. Добавляется или убирается центроид, исходя из следующих условий:

если дистанция до данных выше заданной, то создается новый центроид;

если кластер состоит из числа точек, меньше заданного, то он убирается;

если расстояние между центроидами меньше заданного, то кластеры объединяются.

Выход алгоритма АКМ – это центроиды кластеров, представляющих собой нормальное поведение (обучающее множество). После того как все центроиды получены, данные инкапсулируются функцией принадлежности. Для данных задачи используются РБФ, формула (1):

$$R_i = e^{-\frac{|x-m_i|}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где  $m_i$  – среднее (центр) РБФ;  $\sigma$  – СКО (ширина) РБФ;  $x$  – входные данные.

Центроиды, полученные от АКМ, становятся центрами соответствующих РБФ. Сумма всех колоколов дает функцию при-

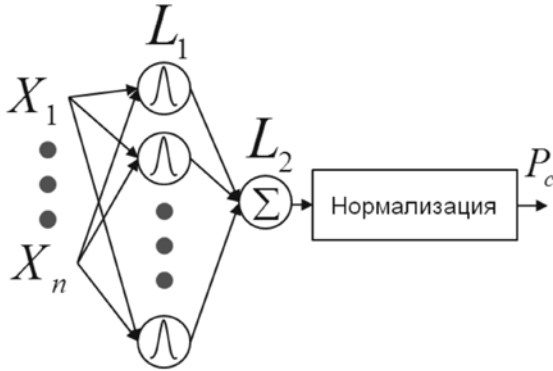


Рис. 4. «Нейронные облака»:  $L_1$  – РБФ;  $L_2$  – суперпозиции РБФ;  $P_c$  – значение функции принадлежности

надлежности (рис. 4). Нормализация применяется для того, чтобы получить выходное значение функции принадлежности в интервале от нуля до единицы.

**Алгоритм обнаружения аномального состояния дамбы на основе вейвлет-преобразования и одноклассовой классификации одномерных сигналов**

Предлагаемый алгоритм основан на одноклассовой классификации результатов частотно-временного преобразования одномерного сигнала. Для частотно-временного преобразования (разложения) сигналов было выбрано дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Для одноклассовой классификации использован метод «нейронные облака». Блок-схема алгоритма обнаружения аномального состояния приведена на рис. 5.

На первом этапе к сигналу с датчика применяется ДВП. Далее выполняет-

ся дополнительная обработка вейвлет-коэффициентов, направленная на расчет локальных СКО (среднеквадратическое отклонение) коэффициентов во времени для каждого уровня разложения, характеризующих мощность каждого уровня.

На втором этапе строится функция принадлежности рассчитанных локальных СКО уровней разложения к области нормального поведения для исходных «нормальных» исторических значений локальных СКО уровней разложения, с использованием метода «нейронные облака».

В итоге, на выходе алгоритма значение изменяется от нуля до единицы, где близость к нулю соответствует аномальному состоянию, а близость к единице соответствует нормальному состоянию.

**Анализ результатов моделирования алгоритма**

В настоящей статье мы будем рассматривать обнаружение реальной аномалии дамбы в городе Бостон (Великобритания). В дамбу была установлена сеть многопараметрических датчиков GeoBeads компании Alert Solutions [23]. Датчики, установленные в дамбу, измеряют поровое давление  $P_p$  (давление воды в порах почвы), температуру почвы и отклонение от вертикали. Расположение датчика показано на рис. 6. Дискретизация данных составляет 15 мин.

Локальное сползание внешнего откоса дамбы в результате эрозии почвы произошло 12 января 2012 г. Аномалия проявилась в поведении сигнала датчика порового давления (рис. 6). Этот датчик был установлен примерно на глубине 2,20 м от поверх-

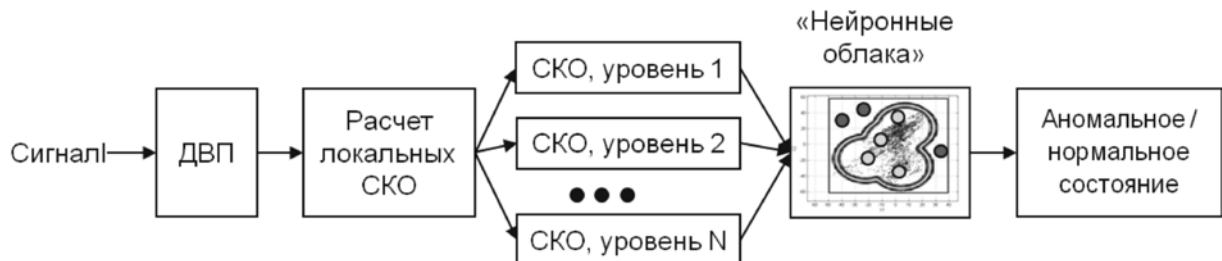


Рис. 5. Алгоритм обнаружения аномального состояния дамбы на основе вейвлет-преобразования и одноклассовой классификации одномерных сигналов





Рис. 6. Структура одной из кросс-секций дамбы

ности. Далее будет анализироваться сигнал с этого датчика.

Аномальное поведение проявилось как демпфирование дамбой колебаний порового давления, вызванных колебаниями воды (рис. 7 а). Наиболее мощные колебания порового давления вызваны приливами и отливами с периодичностью 12 ч (рис. 7 б). Также в измерениях присутствуют пропуски, вызванные сбоями системы сбора данных или другими факторами. В данных имеются пропуски длительностью от нескольких минут до нескольких дней (рис. 7 а, б). Для обучения и апробации алгоритма в местах пропусков сигналы были восстановлены методом авторегрессии (рис. 7 а, б, светло серый) [12].

Обучающее множество для алгоритма – первые 50 % отсчетов сигналов с 8 августа 2011 г. по 10 ноября 2011 г. Для дискретного вейвлет-преобразования был выбран вейв-

лет Добеши 4, т. к. в уровнях разложения ДВП, полученных с использованием такого вейвлета исключается тренд, описываемый полиномом порядка ниже четвертого [13]. Число уровней разложения – 5 выбрано, чтобы с запасом перекрыть диапазон наиболее мощных частот сигнала.

Для сигнала (рис. 8 а) видно демпфирование колебаний порового давления после 1 января и, как следствие, падение СКО уровней разложения ДВП после 1 января (рис. 8 б), вызванное изменением свойств дамбы, в результате эрозии почвы (рис. 8 а). Значение функции принадлежности на участке после 2 января падает к нулю, что соответствует выходу, что соответствует аномальному состоянию на ее границе функции принадлежности (рис. 8 в). Таким образом, эрозия почвы была обнаружена на 10 дней раньше сползания откоса дамбы. Также присутствует локальный участок 7 декабря (рис. 8 в), в котором значение функции принадлежности падает до 0,1. Данный участок соответствует ложному срабатыванию, вызванному отсутствием подобного поведения в обучающем множестве.

Предложенный подход к мониторингу состояния дамб основан на использовании методов машинного обучения и обработки сигналов. Суть алгоритма заключается в применении одноклассовой классификации алгоритмом «нейронные облака» результатов дискретного вейвлет-преобразования сигналов с датчиков си-

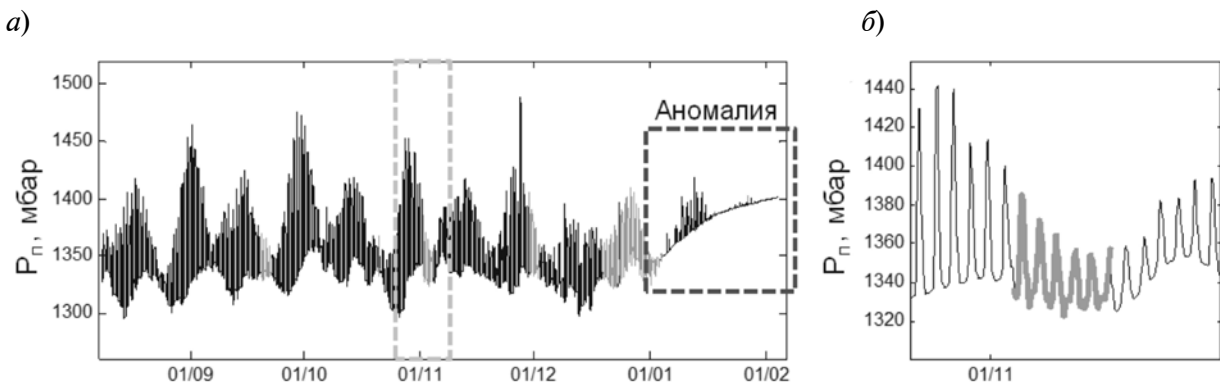


Рис. 7. Сигнал для моделирования:

а – сигнал; б – укрупненный участок сигнала

(—) участки с восстановленными данными; (---) участок с аномальным поведением сигнала

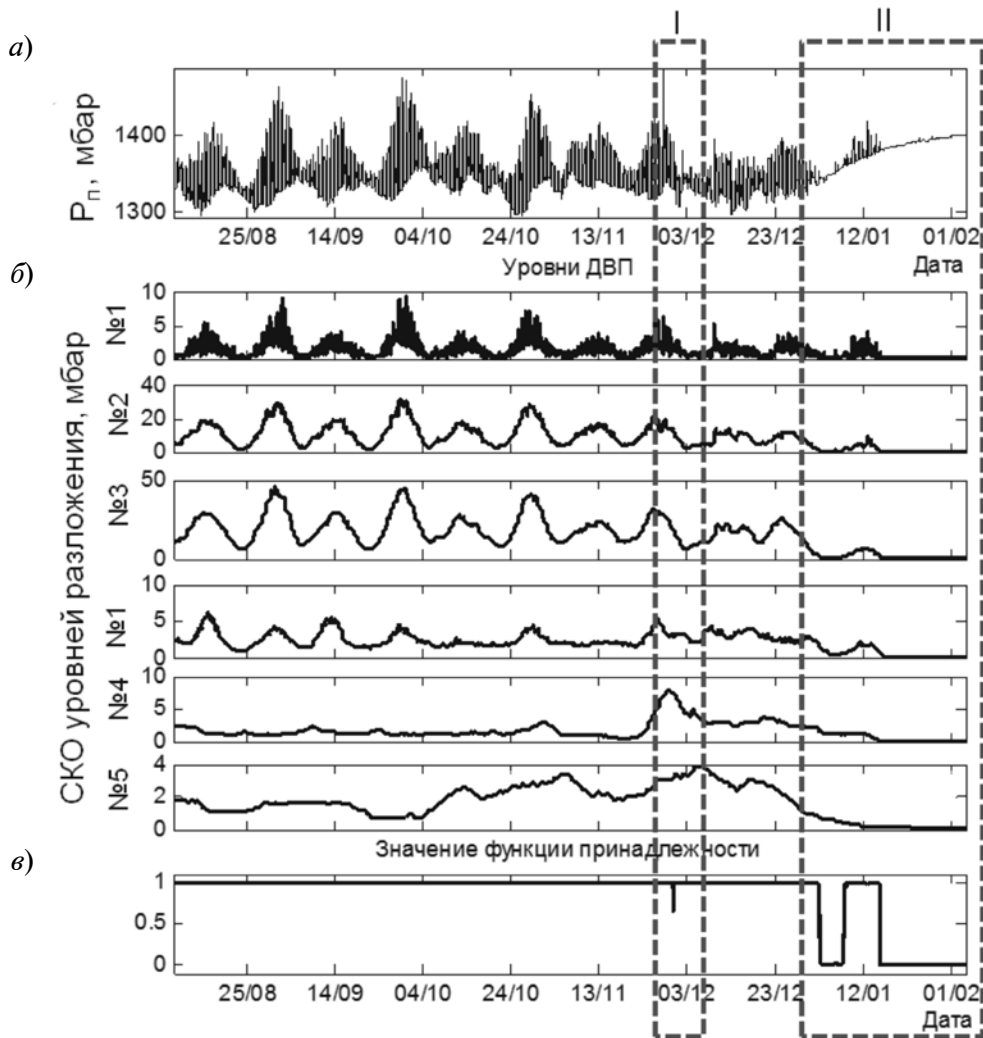


Рис. 8. Результат оценки состояния дамбы:  
*a* – сигнал; *б* – локальные СКО уровней ДВП; *в* – значение функции принадлежности сигнала.  
I – участок с ложным срабатыванием; II – участок с реальной аномалией

стемы контроля состояния дамб. Обучение алгоритма «нейронные облака» проводится на исторических данных о нормальном состоянии дамбы.

Преимущества такого подхода состоят в том, что для его применения не требуется подробного описания структуры объекта и его аномального поведения. Кроме того, система мониторинга на его основе сама подстраивается и обучается с момента установки на объект.

Моделирование алгоритма обнаружения аномального состояния, построенного на основе предлагаемого подхода, проведено на реальных данных дамбы города Бостон (Вели-

кобритания). Сползание откоса дамбы было обнаружено на 10 дней раньше визуального обнаружения как аномальное поведение измерений датчиков порового давления. Преимуществом алгоритма является устойчивый контроль частотно-временных свойств сигнала. К недостаткам можно отнести то, что при отсутствии в обучающих данных некоторых примеров нормального поведения, алгоритм может ложно классифицировать их как аномальное состояние. Увеличение обучающего множества будет вести к улучшению результатов классификации.

Представленный подход и алгоритм могут применяться и в других областях, таких



как системы контроля состояния конструкций, медицинские приложения, системы вибродиагностики и др.

Работа выполнена при поддержке гранта Евросоюза FP7, проект UrbanFlood, грант № 248767.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flood – Data and statistics [электронный ресурс]/ URL: <http://www.preventionweb.net/english/hazards/statistics/> (дата обращения: 01.07.2015).
2. **Wohl E.** *Inland Flood Hazards: Human, Riparian, and Aquatic Communities.* Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
3. **Baars S., Kempen M.** *The Causes and Mechanisms of Historical Dike Failures in the Netherlands* // Official Publication of the European Water Association, 2009.
4. FLOODsite project [электронный ресурс]/ URL: <http://www.floodsite.net> (дата обращения: 01.07.2015).
5. FloodControl 2015 [электронный ресурс]/ URL: <http://www.floodcontrol2015.com> (дата обращения: 01.07.2015).
6. UrbanFlood project [электронный ресурс]/ URL: <http://www.urbanflood.eu> (дата обращения: 01.07.2015).
7. **Isermann R.** *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance.* Berlin: Springer, 2006.
8. **Krzhizhanovskaya V.V., Shirshov G.S., Melnikova N.B., Belleman R.G., Rusadi F.I., Broekhuijsen B.J., Gouldby B.P., Lhomme J., Balise B., Bubak M., Pyayt A.L., Mokhov I.I., Ozhigin A.V., Lang B., Meijer R.J.** *Flood early warning system: design, implementation and computational modules* // Procedia Computer Science. 2011. Pp. 106–115.
9. **Simm J., Jordan D., Topple A., Mokhov I., Pyayt A., Abdoun T., Bennett V., Broekhuijsen J., Meijer R.** *Interpreting Sensor Measurements in Dikes – Experiences from Urbanflood Pilot Sites* // Comprehensive Flood Risk Management. 2012.
10. **Pyayt A.L., Kozionov A.P., Kusherbaeva V.T., Mokhov I.I., Krzhizhanovskaya V.V., Broekhuijsen B.J., Meijer R.J., Sloot P.M.A.** *Signal analysis and anomaly detection for flood early warning systems* // J. of Hydroinformatics. 2014. No. 16. Vol. 5. Pp. 1025–1043.
11. **Козионов А.П. и др.** Вейвлет-преобразование и одноклассовая классификация для мониторинга состояния дамб // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. Т. 71.
12. **Козионов А.П., Пяйт А.Л., Мохов И.И., Иванов Ю.П.** *Исследование алгоритмов восстановления пропусков в измеряемых сигналах для системы мониторинга состояния дамб* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2-3. С. 217–222.
13. **Anishe S.R., Sharahi M.J.** *Seismic analysis of Narmab earth dam (Iran) considering dam foundation interaction* // la 78eme congres des grands barrages. Ханой, 2010.
14. **Lennox S.M., Wang Y.G., Darnel R.E., Percival D.B.** *Wavelet-Based Multiresolution Analysis of Wivenhoe Dam Water Temperatures* // Water resources research. 2011.
15. **Noureldin A., Lucero J.L., Baca Taha T.J., Reda Taha M.M.** *Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features* // J. of Structural Health Monitoring. 2006. No. 5. Vol. 2.
16. **Hesari M.A., Lotfollahi-Yaghin M.A.** *Using Wavelet Analysis in Crack Detection at the Arch Concrete Dam under Frequency Analysis with FEM* // World Applied Sciences Journal. 2008.
17. **Teymur B., Madabhush, S.P.G., Newland D.E., Haigh S.K.** *Applications of wavelet analysis to the investigation of the dynamic behaviour of geotechnical structures* // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2002.
18. **Sadek M., Shahrou I., Parish Y.** *Numerical analysis of the seismic behavior of earth dam* // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2009.
19. **Mallat S.** *Wavelet Tour of Signal Processing.* San Diego: Academic Press, 1999.
20. **Lang B. et al.** *Neural Clouds for Monitoring of Complex Systems* // Optical Memory and Neural Networks. 2008. No. 3. Vol. 17. Pp. 183–192.
21. **Bishop C.** *Pattern Recognition and Machine Learning.* New York: Springer, 2006.
22. **Yousri N.A., Ismal M.A., Kamel M.S.** *Fuzzy Outlier Analysis a Combined Clustering-outlier Detection Approach* // Systems, Man and Cybernetics. 2007. Pp. 412–418.
23. Alert Solutions [электронный ресурс]/ URL: <http://www.alertsolutions.nl/>? (дата обращения: 01.07.2015).

#### REFERENCES

1. *Flood – Data and statistics.* Available: <http://www.preventionweb.net/english/hazards/statistics/> (Accessed: 01.07.2015).
2. **Wohl E.** *Inland Flood Hazards: Human, Riparian, and Aquatic Communities.* Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

3. **Baars S., Kempen M.** The Causes and Mechanisms of Historical Dike Failures in the Netherlands. *Official Publication of the European Water Association*, 2009.
4. *FLOODsite project*. Available: <http://www.floodsite.net/> (Accessed: 01.07.2015).
5. *FloodControl 2015*. Available: <http://www.floodcontrol2015.com> (Accessed: 01.07.2015).
6. *UrbanFlood project*. Available: <http://www.urbanflood.eu> (Accessed: 01.07.2015).
7. **Isermann R.** *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Berlin: Springer, 2006.
8. **Krzhizhanovskaya V.V., Shirshov G.S., Melnikova N.B., Belleman R.G., Rusadi F.I., Broekhuijsen B.J., Gouldby B.P., Lhomme J., Balise B., Bubak M., Pyayt A.L., Mokhov I.I., Ozhigin A.V., Lang B., Meijer R.J.** Flood early warning system: design, implementation and computational modules. *Procedia Computer Science*, 2011, Pp. 106–115.
9. **Simm J., Jordan D., Topple A., Mokhov I., Pyayt A., Abdoun T., Bennett V., Broekhuijsen J., Meijer R.** Interpreting Sensor Measurements in Dikes – Experiences from Urbanflood Pilot Sites. *Comprehensive Flood Risk Management*, 2012.
10. **Pyayt A.L., Kozionov A.P., Kuserbaeva V.T., Mokhov I.I., Krzhizhanovskaya V.V., Broekhuijsen B.J., Meijer R.J., Slood P.M.A.** Signal analysis and anomaly detection for flood early warning systems [Wavelet Transform and One-Class Classification for Dike Health Monitoring], *Journal of Hydroinformatics*, 2014, No. 16, Vol. 5, Pp. 1025–1043.
11. **Kozionov A.P. i dr.** Veyvlet-preobrazovaniye i odnoklassovaya klassifikatsiya dlya monitoringa sostoyaniya damb [Wavelet Transform and One-Class Classification for Dike Health Monitoring], *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy [Information and Control Systems]*, 2014, Vol. 71, No. 4. (rus)
12. **Kozionov A.P., Pyayt A.L., Mokhov I.I., Ivanov Yu.P.** Issledovaniye algoritmov vosstanovleniya propuskov v izmeryayemykh signalakh dlya sistemy monitoringa sostoyaniya damb [Research on Gap-filling Algorithms for Dike Health Monitoring Systems]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]*. St. Petersburg, 2015, No. 2-3 (217-222), Pp. 217–222. (rus)
13. **Anishe S.R., Sharahi M.J.** Seismic analysis of Narmab earth dam (Iran) considering dam foundation interaction. *la 78eme congres des grands barrages*, Khanoy, 2010.
14. **Lennox S.M., Wang Y.G., Darnel R.E., Percival D.B.** Wavelet-Based Multiresolution Analysis of Wivenhoe Dam Water Temperatures. *Water resources research*, 2011.
15. **Noureldin A., Lucero J.L., Baca Taha T.J., Reda Taha M.M.** Wavelet Transform for Structural Health Monitoring: A Compendium of Uses and Features. *Journal of Structural Health Monitoring*, 2006, No. 5, Vol. 2.
16. **Hesari M.A., Lotfollahi-Yaghin M.A.** Using Wavelet Analysis in Crack Detection at the Arch Concrete Dam under Frequency Analysis with FEM. *World Applied Sciences Journal*, 2008.
17. **Teymur B., Madabhush S.P.G., Newland D.E., Haigh S.K.** Applications of wavelet analysis to the investigation of the dynamic behaviour of geotechnical structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002.
18. **Sadek M., Shahrou I., Parish Y.** Numerical analysis of the seismic behavior of earth dam. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009.
19. **Mallat S.** *Wavelet Tour of Signal Processing*, San Diego: Academic Press, 1999.
20. **Lang B. et al.** Neural Clouds for Monitoring of Complex Systems. *Optical Memory and Neural Networks*, 2008, No. 3, Vol. 17, Pp. 183–192.
21. **Bishop C.** *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York: Springer, 2006.
22. **Yousri N.A., Ismal M.A., Kamel M.S.** Fuzzy Outlier Analysis a Combined Clustering-outlier Detection Approach. *Systems, Man and Cybernetics*, 2007, Pp. 412–418.
23. *Alert Solutions*. Available: <http://www.alertsolutions.nl/?> (Accessed: 01.07.2015).

---

**КОЗИОНОВ Алексей Петрович** – аспирант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Института аэрокосмических приборов и систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения; инженер ООО «Сименс».

191186, Россия, Санкт-Петербург, Волынский пер., д. 3а.

E-mail: alexey.kozionov@gmail.com

**KOZIONOV Alexey P.** *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; Siemens.*

191186, Volynskii Lane 3a, St. Petersburg, Russia.

E-mail: alexey.kozionov@gmail.com

**ПЯЙТ Александр Леонидович** – *ведущий инженер ООО «Сименс», кандидат технических наук.*  
191186, Россия, Санкт-Петербург, Волынский пер., д. 3а.  
E-mail: alexander.pyayt@siemens.com

**PYAYT Alexander L.** *Siemens.*  
191186, Volynskii Lane 3a, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: alexander.pyayt@siemens.com

**МОХОВ Илья Игоревич** – *ведущий эксперт-исследователь ООО «Сименс»*  
191186, Россия, Санкт-Петербург, Волынский пер., д. 3а.  
E-mail: ilya.mokhov@siemens.com

**МОКHOB Илья I.** *Siemens.*  
191186, Volynskii Lane 3a, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: ilya.mokhov@siemens.com

**ИВАНОВ Юрий Павлович** – *доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов Института аэрокосмических приборов и систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук.*  
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 61.  
E-mail: upi@mail.ru

**IVANOV Yuri P.** *St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.*  
190000, Bolshaya Morskaya Str. 67, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: upi@mail.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.7

УДК 681.51

*С.Ф. Бурдаков, О.Б. Шагниева*

## **МОДЕЛИ МЕХАНИКИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ РОБОТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОФИЛЯ**

*S.F. Burdakov, O.B. Shagniev*

## **MECHANICS MODELS IN THE CONTROL PROBLEM OF THE FORCE INTERACTION BETWEEN A ROBOT AND A FREE-FORMED SURFACE**

На примере задачи управления силовым взаимодействием осязательного робота с поверхностью неопределенного профиля показана решающая роль моделей механики при стремлении получить высокое качество отработки желаемых движений. Адекватные модели механики необходимы как при согласовании инерционных и жесткостных характеристик робота и силового датчика, так и при выборе структуры и настроек системы позиционно-силового управления, а также при выборе реализуемых желаемых движений. Рассмотрены режим позиционирования с выходом робота на контакт с поверхностью и режим управления силовым взаимодействием робота с поверхностью. Исследованы алгоритмы позиционно-силового управления с ПИД-регулятором и интегральным компенсатором. Показана возможность дополнительного повышения качества управления с помощью коррекции желаемых движений методом обучения.

**РОБОТ; ПОВЕРХНОСТЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОФИЛЯ; СИЛОВОЕ ОЧУВСТВЛЕНИЕ; МОДЕЛИ МЕХАНИКИ; ПОЗИЦИОННО-СИЛОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ; ОБУЧЕНИЕ.**

The example of the problem of controlling the force interaction of a robot with a free-formed surface shows the crucial role of mechanics models in obtaining high-quality implementations of the desired motions. Adequate mechanics models are needed both for coordinating the inertial and stiffness characteristics of the robot and the force sensor, and for choosing the structure and configuration of the position-force control, as well as when selecting the implemented desired motions. The article describes a positioning mode with the release of the robot to contact the surface and a force control mode of the robot interacting with surface. We investigated the algorithms of position-force control with a PID-controller and an integral compensator. The article shows the possibility of further enhancing the quality of control by correcting the required motion by learning.

**ROBOT; FREE-FORMED SURFACE; FORCE SENSING; MECHANICS MODELS; POSITION-FORCE CONTROL; LEARNING.**

Проблема силомоментного осязания при управлении движением роботов продолжает оставаться одной из актуальных в современной робототехнике, т. к. силомоментное осязание является важным этапом создания искусственного интеллекта роботов [1]. Несмотря на большие достижения робототехники, круг задач, в которых роботы с силомоментным осязанием могли бы заменить человека-оператора все

еще остается достаточно широким. Прежде всего это относится к роботам для экстремальных условий, для целого ряда технических задач (обработка деталей, сборка и т. п.), а также к медицинским роботам [2–4].

Фундаментальные аспекты использования информации об усилиях при управлении роботами рассмотрены в работе [5]. Наиболее распространенный на практике метод связанного (гибридного) позиционно-

силового управления, когда управление перемещениями происходит в функции от силы взаимодействия, рассмотрен в [6]. На основе этого метода в [7] предложен алгоритм связанного позиционно-силового управления с сохранением базового контура управления по положению. Этот алгоритм позволил после некоторой модернизации (установки датчика сил и моментов) использовать серийные роботы для решения задач управления силомоментным взаимодействием роботов с внешними объектами. Это не только существенно расширяет области применения серийных роботов [3, 8], но и приводит к появлению новых областей, например, в медицине [9]. Однако при подобном очувствлении возникает проблема правильного согласования механических характеристик робота и силомоментного датчика с настройками системы управления и выбором желаемых движений. Эта проблема не может быть решена без адекватных моделей механики.

Вопрос о создании робота-массажера с использованием информации об усилиях взаимодействия впервые был поставлен российскими учеными на Втором симпозиуме по медицинской робототехнике в Гейдельберге в 1997 г. В работах [4, 9] представлена реализация робота-массажера, в алгоритме управления которого важную роль играет механическая модель взаимодействия робота с мягкими тканями и суставами.

Результаты научных исследований и примеры практического применения робо-

тов с силомоментным очувствлением показывают, что достижение высокого качества выполнения роботом контактных операций возможно только с помощью алгоритмов управления, основанных на адекватных моделях механики [5, 10]. В целях повышения качества связанного позиционно-силового управления в настоящей работе анализируются рациональные соотношения механических характеристик робота и датчика силы со структурой и настройками системы управления, а также с желаемыми движениями робота, выполняющего контактные операции.

### Постановка задачи

Рассматривается робот с тремя взаимно перпендикулярными степенями подвижности, оснащенный силовым датчиком. Робот предназначен для выполнения технологических операций, требующих обеспечения заданного силового взаимодействия с поверхностью, профиль которой заранее не определен. Примерами могут служить робот-шлифовщик турбинных лопаток, робот-массажер для восстановительной медицины и т. п. Отсутствие динамического взаимовлияния движений по разным степеням подвижности позволяет свести задачу к одномерной (рис. 1).

Робот имеет два основных режима движения: позиционирование с выходом на контакт с поверхностью (рис. 1 а) и позиционно-силовой режим с поддержанием заданной силы взаимодействия с поверхностью (рис. 1 б). Профиль поверхности

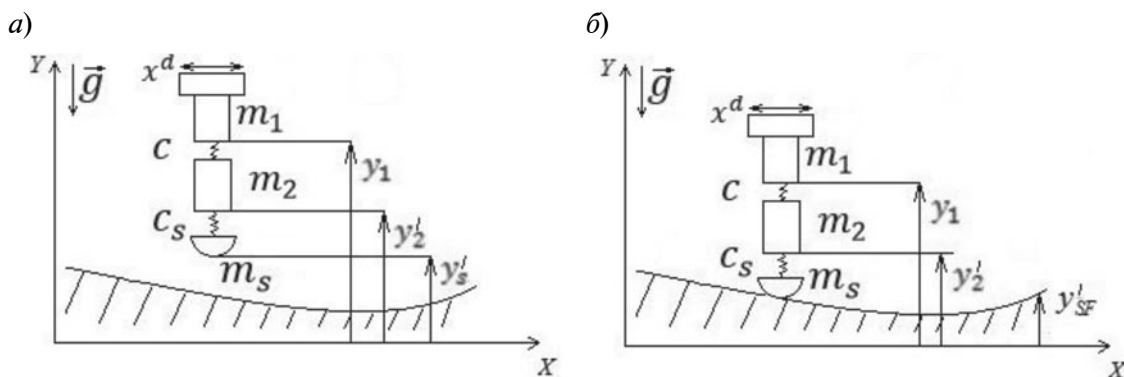


Рис. 1. Расчетные схемы робота в режиме без контакта (а) и с контактом (б)

является гладким, но заранее не определен. Поверхность не деформируема.

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $m_1$  и  $m_2$  – приведенная масса двигателя и масса руки робота;  $c$  – эквивалентная жесткость робота;  $y_1$  и  $y_2$  – координаты двигателя и руки робота;  $m_s$  и  $c_s$  – масса и жесткость датчика силы;  $y_s$  – координата датчика силы;  $y_{SF}(x)$  – координата поверхности.

В режиме позиционирования (рис. 1 а) математическая модель оцувствленного робота как объекта управления имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \\ + c(y_1 - y_2) = F - m_1 g, \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c(y_2 - y_1) + \\ + b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_s) + c_s(y_2 - y_s) = -m_2 g, \\ m_s \ddot{y}_s + b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_2) + c_s(y_s - y_2) = -m_s g, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $F$  – сила, развиваемая двигателем робота;  $m_1 g$ ,  $m_2 g$ ,  $m_s g$  – силы тяжести;  $b$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_s$  – коэффициенты вязкого трения.

В отличие от координат  $y_2$  и  $y_s$  (рис. 1 а), координаты  $y_1$  и  $y_s$  в уравнениях (1) учитывают конструктивные размеры робота и датчика силы, а также статические удлинения упругих элементов  $c$  и  $c_s$ .

Переход к позиционно-силовому режиму управления происходит при безотрывном контакте датчика силы с поверхностью:

$$y_s = y^*, \quad F_s \geq \bar{F}_s, \quad (2)$$

где  $F_s = b_s(\dot{y}_s - \dot{y}_2) + c_s(y_s - y_2)$  – показание датчика силы ( $F_s > 0$  соответствует сжатию упругого элемента датчика);  $\bar{F}_s$  – величина, характеризующая зону переходных процессов по силе  $F_s$  при переходе от режима позиционирования к позиционно-силовому режиму;  $y^*(t) = y_{SF}(x)|_{x=x^d(t)}$  – не определенная заранее координата поверхности при условии, что движение по координате  $x$  происходит по желаемому закону  $x^d(t)$  (рис. 1 б).

Математическая модель робота в позиционно-силовом режиме имеет вид:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + b(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + \\ + c(y_1 - y_2) = F - m_1 g, \\ m_2 \ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + b(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + c(y_2 - y_1) + \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} + b_s(\dot{y}_2 - \dot{y}_s) + c_s(y_2 - y_s) = -m_2 g, \\ y_s = y^*(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Считается, что помимо датчика силы робот оснащен датчиком положения, измеряющим координату двигателя робота  $y_1$ . Такой набор датчиков является стандартным для роботов рассматриваемого типа.

Будем также считать, что в режиме позиционирования обратная связь формируется только по измерениям датчика положения, а датчик силы используется в индикаторном режиме для определения момента времени перехода к позиционно-силовому режиму. В позиционно-силовом режиме обратная связь формируется по измерениям обоих датчиков.

Задающим воздействием для режима позиционирования является  $y^d(t)$ , а для позиционно-силового режима –  $F_s^d(t)$ . Возмущающим воздействием для позиционно-силового режима является  $y^*(t)$ . Дополнительно вводится требование о недопустимости нарушения контакта робота с поверхностью после его установления.

В дальнейшем при компьютерном моделировании будут использоваться следующие значения параметров робота:

$$\begin{aligned} m_1 = m_2 = 1 \text{ кг}, \quad m_s = 0,2 \text{ кг}, \quad c = 2,2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}, \\ c_s = 10^4 \text{ Н/м}, \quad b = 10 \text{ Нс/м}, \\ b_1 = b_2 = 20 \text{ Нс/м}, \quad b_s = 5 \text{ Нс/м}. \end{aligned}$$

По этим параметрам могут быть получены оценки механических характеристик оцувствленного робота:

- для режима позиционирования

$$T_M \cong \frac{m_1 + m_2 + m_s}{b_1 + b_2} \cong (0,05 \div 0,1) \text{ с} \text{ – механическая постоянная времени,}$$

$$\omega_1 \cong \left( \frac{c_s}{m_1 + m_2} + \frac{c_s}{m_s} \right)^{1/2} \cong (30 \div 35) \text{ Гц} \text{ – первая собственная частота,}$$

$$\omega_2 \cong \left( \frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2 + m_s} \right)^{1/2} \cong 100 \text{ Гц} \text{ – вторая собственная частота;}$$

- для позиционно-силового режима

$$\omega_1 \cong \left( \frac{c_s}{m_1 + m_2} \right)^{1/2} \cong (10 \div 12) \text{ Гц} \text{ – первая}$$



собственная частота,

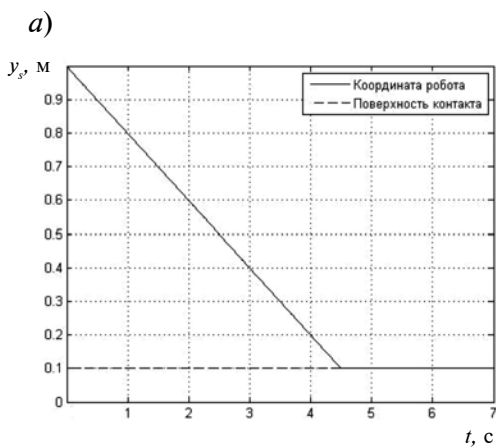
$$\omega_2 \cong \left( \frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2} \right)^{1/2} \cong 100 \text{ Гц} - \text{вторая собственная частота.}$$

Видно, что в позиционно-силовом режиме движения первая собственная частота оцувствленного робота как объекта управления существенно меньше, чем в режиме позиционирования. Вторая собственная частота увеличивается, но незначительно. Подобные соотношения механических характеристик могут служить ориентиром как при выборе силомоментного датчика, так и при формировании обоснованных требований к динамическим характеристикам замкнутых систем управления в основных режимах движения.

**Режим выхода робота на контакт с поверхностью**

В рассматриваемом режиме объектом управления является многомассовая система (см. рис. 1 а). Требуется перевести ее из начального положения  $y_{10}$  в сторону поверхности  $y^*(t)$  до контакта с ней силового датчика. Для решения этой задачи при одном датчике обратной связи, измеряющем координату  $y_1$ , можно использовать ПИД-регулятор, т. е. сформировать управляющую силу  $F$  по закону:

$$F = \left( k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{p}} \right) (y^d - y_1), \quad (4)$$



где  $k_p, k_i, k_d$  – коэффициенты обратных связей;  $N$  – параметр дифференцирующего фильтра.

Замкнутая система (1), (4) обладает астатизмом второго порядка, поэтому задание для режима позиционирования целесообразно выбрать в следующем виде:

$$y^d(t) = y_0^d - V_y t, \quad 0 \leq y^d(t) < y_0^d, \quad (5)$$

где  $y_0^d = y_{10}$  – начальное значение задания, согласованное с начальным положением робота;  $V_y$  – варьируемая скорость убывания задания.

Настройка в Matlab ПИД-регулятора на максимум полосы рабочих частот замкнутой системы при принятых выше значениях параметров объекта управления дает  $k_p = 9,58 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$ ;  $k_i = 1,63 \cdot 10^4 \text{ Н/мс}$ ;  $k_d = 4,71 \cdot 10^2 \text{ Нс/м}$ ;  $N = 3,69 \cdot 10^2 \text{ 1/с}$ .

Выбранная настройка ПИД-регулятора в режиме позиционирования согласована с механическими характеристиками оцувствленного робота так, что  $\omega_c \approx 10T_M^{-1}$ ,  $\omega_1 \leq \omega_c < \omega_2$ , где  $\omega_c$  – частота среза частотной характеристики замкнутой системы от входа  $y^d$  до выхода  $y_1$ .

Начало отсчета для координаты поверхности  $0 \leq y^*(t) < y_0^d$  соответствует рис. 1 а. Учитывая, что координата поверхности  $y^*(t)$  заранее не определена, выход робота на контакт с поверхностью может произойти в любой момент времени  $t^*$

$$0 < t^* \leq y_0^d / V_y.$$

Задание (5) с ограниченной скоростью убывания  $V_y$  позволяет установить при-

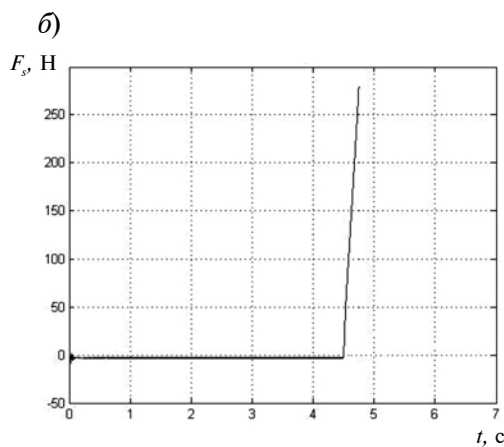


Рис. 2. Графики процессов  $y_s(t)$  (а) и  $F_s(t)$  (б) в режиме позиционирования

емлемый уровень  $\bar{F}_s = \sup_{t \in [0, t^*]} F_s$  показаний датчика силы, который можно принять за индикатор установления безотрывного контакта робота с поверхностью. Заметим, что в режиме позиционирования датчик силы работает только как индикатор перехода к позиционно-силовому режиму управления. Уровень  $\bar{F}_s > 0$  устанавливается путем компьютерного моделирования или экспериментально.

На рис. 2 приведены графики процессов  $y_s(t)$  и  $F_s(t)$  в режиме позиционирования при  $y_0^d = y_{10} = y_{20} = y_{s0} = 1$  м и  $V_y = 0,2$  м/с. Поверхность постоянного профиля находилась на уровне  $y^* = 0,1$  м. Видно, что контакт робота с поверхностью происходит через  $t^* \cong 4,5$  с. По переходным процессам при  $t \leq t^*$  находим  $\bar{F}_s = \sup_{t \in [0, t^*]} F_s = 5$  Н. При  $t > t^*$  упругая сила  $F_s = c_s(y_s - y_2)$  быстро нарастает, т. к. при контакте  $y_s = y^* = 0,1 = \text{const}$ , а координата  $y_2$  про-

должает уменьшаться в соответствии с заданием (5).

Чтобы предотвратить поломку робота или повреждение поверхности необходимо перейти при  $t \geq t^*$  к управлению силовым взаимодействием робота с поверхностью.

### Режим позиционно-силового управления

В соответствии с концепцией связанного позиционно-силового управления [6, 7] контур обратной связи по положению (4) сохраняется без изменения. Однако вместо задания  $y^d$  при выполнении условия (2) автоматически вводится новое задание  $\tilde{y}^d$ , которое операторным образом зависит от измерений датчика силы  $F_s$ :

$$\tilde{y}^d = W(p)(F_s^d - F_s), \quad (6)$$

где  $F_s^d$  – задание по силе взаимодействия с поверхностью, которое должен обрабатывать робот;  $W(p)$  – передаточная функция регулятора силы.

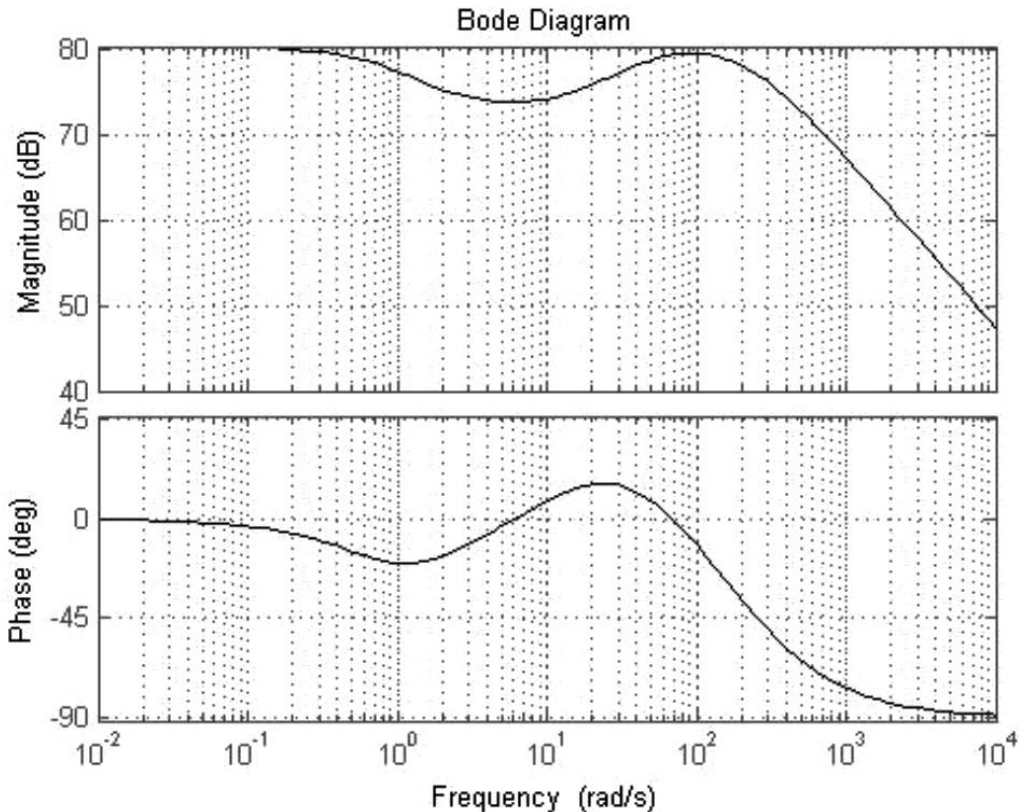


Рис. 3. Частотные характеристики базового контура от задания  $\tilde{y}^d$  до показаний датчика силы  $F_s(t)$

Таким образом, в режиме позиционно-силового управления вводится еще одна обратная связь. При этом базовый контур с обратной связью по положению (3), (4) является для нее объектом управления. Базовый контур положения из-за контакта робота с поверхностью существенно меняет свои динамические свойства по сравнению с тем, что было в режиме позиционирования. На рис. 3 приведены частотные характеристики базового контура от задания  $\tilde{y}^d$  до показаний датчика силы  $F_s$ . Видно, что в диапазоне рабочих частот  $0 \leq \omega < \omega_c$ , который был достигнут при позиционировании, из-за контакта робота с поверхностью происходят изменения частотных характеристик, требующие существенной коррекции замкнутой системы в сторону расширения диапазона рабочих частот. Если пренебречь высокочастотной динамикой, обусловленной упругой податливостью робота, то соответствующая передаточная функция базового контура будет иметь вид:

$$S(p) \cong \frac{c_s(k_d p^2 + k_p p + k_i)}{m p^3 + (b + k_d) p^2 + (c_s + k_p) p + k_i}. \quad (7)$$

При этом базовый контур положения приобретает доминирующую низкочастотную динамику с полюсом  $p_1 = \frac{k_i}{c_s + k_p} = -0,83 \text{ 1/с}$ .

Структурная схема замкнутой системы (6), (7) приведена на рис. 4.

Рассмотрим некоторые способы реализации обратной связи по силе [5, 7, 11].

*Управление при помощи второго ПИД-регулятора*

$$W(p) = w_p + w_i \frac{1}{p} + w_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{p}}. \quad (8)$$

Настройка в Matlab регулятора (8) при принятых выше значениях параметров на максимальный диапазон рабочих частот замкнутой системы (рис. 4) дает:

$$w_p = 3,93 \cdot 10^{-5} \text{ м/Н}, \quad w_i = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ м/сН},$$

$$w_d = -1,11 \cdot 10^{-7} \text{ мс/Н}, \quad N = 3,55 \cdot 10^2 \text{ 1/с}.$$

*Управление при помощи интегрального*

*компенсатора*

$$W(p) = \frac{k}{p} \hat{S}^{-1}(p),$$

где  $k$  – коэффициент усиления;  $\hat{S}^{-1}(p)$  – физически реализуемое приближение оператора  $S^{-1}(p)$ , обратного к  $S(p)$ .

Идея этого метода состоит в том, что при полной компенсации динамики объекта управления, т. е. при  $\hat{S}^{-1}(p) = S^{-1}(p)$ , передаточная функция замкнутой системы (рис. 4) приобретает вид:

$$H(p) = \frac{W(p)S(p)}{1 + W(p)S(p)} = \frac{k}{p + k}.$$

Это значит, что при увеличении коэффициента усиления  $k$  можно обеспечить желаемую динамику замкнутой системы с требуемым диапазоном рабочих частот. Однако оператор  $S^{-1}(p)$  физически не реализуем. Поэтому возможна лишь приближенная компенсация. Для объекта управления (7) с доминирующей низкочастотной динамикой хорошим приближением обратного оператора может быть  $\hat{S}^{-1}(p) = \frac{(c_s + k_p)p + k_i}{c_s(k_d p^2 + k_p p + k_i)}$ .

Приближенная компенсация не допускает неограниченного роста коэффициента усиления  $k$  из-за потери устойчивости замкнутой системы (6), (7). Диапазон приемлемых значений при принятых выше значениях параметров составляет  $k = (30 \div 100) \text{ 1/с}$ .

Замкнутая система (6), (7) обладает свойством астатизма, поэтому целесообразно выбрать задание  $F_s^d$  по силе  $F_s$  с варьируемой скоростью  $V_F$ :

$$F_s^d = \bar{F}_s + V_F(t - t^*), \quad t \in [t^*, t^{**}],$$

где  $t^{**} = t^* + \frac{F_s^* - \bar{F}_s}{V_F}$  – время выхода задания  $F_s^d$  на требуемый уровень  $F_s^*$ .

На рис. 5 приведены графики переходных процессов выхода робота на контакт с поверхностью  $y^* = 0,1 \text{ м}$  и установления силового взаимодействия робота с поверхностью на уровне  $F_s^* = 40 \text{ Н}$ . Рисунок 5 а соответствует варианту со вторым ПИД-

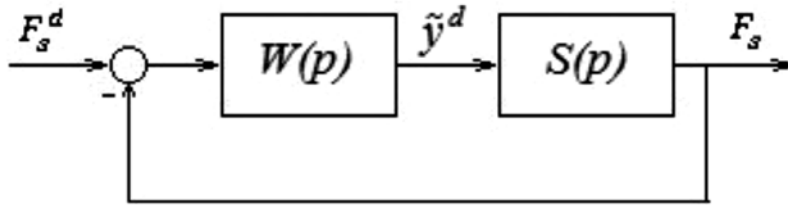


Рис. 4. Структурная схема замкнутой системы в позиционно-силовом режиме управления

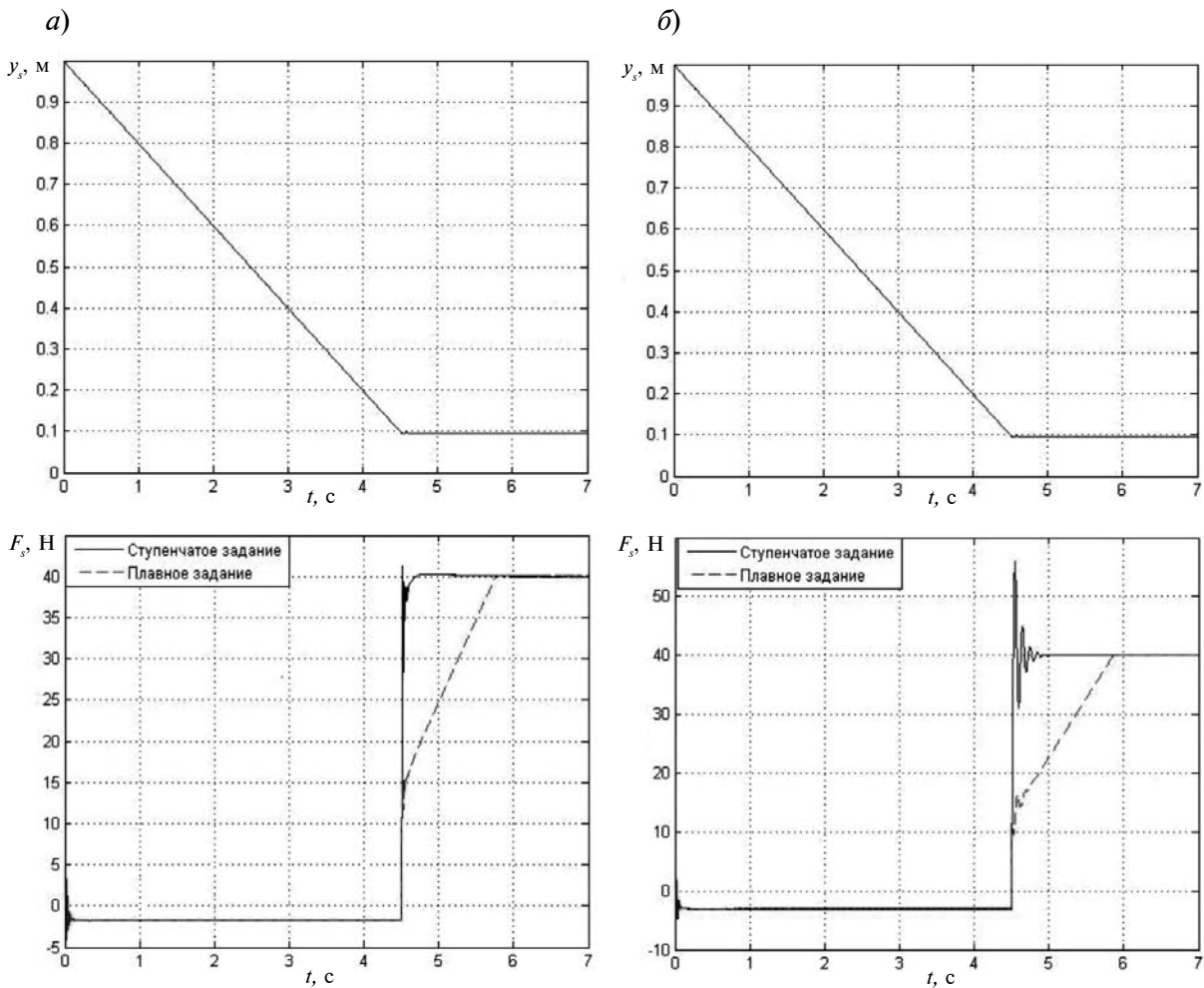


Рис. 5. Графики переходных процессов при использовании второго ПИД-регулятора (а) и интегрального компенсатора (б)

регулятором. Рисунок 5 б соответствует варианту с интегральным компенсатором.

Оба варианта дают вполне приемлемые результаты. Сплошные линии на графиках  $F_s(t)$  соответствуют ступенча-

тому заданию. Пунктирные линии соответствуют заданию с конечной скоростью  $V_F = 40 \text{ Н/с}$ . Плавное задание почти полностью снимает перерегулирование по силе  $F_s$ .

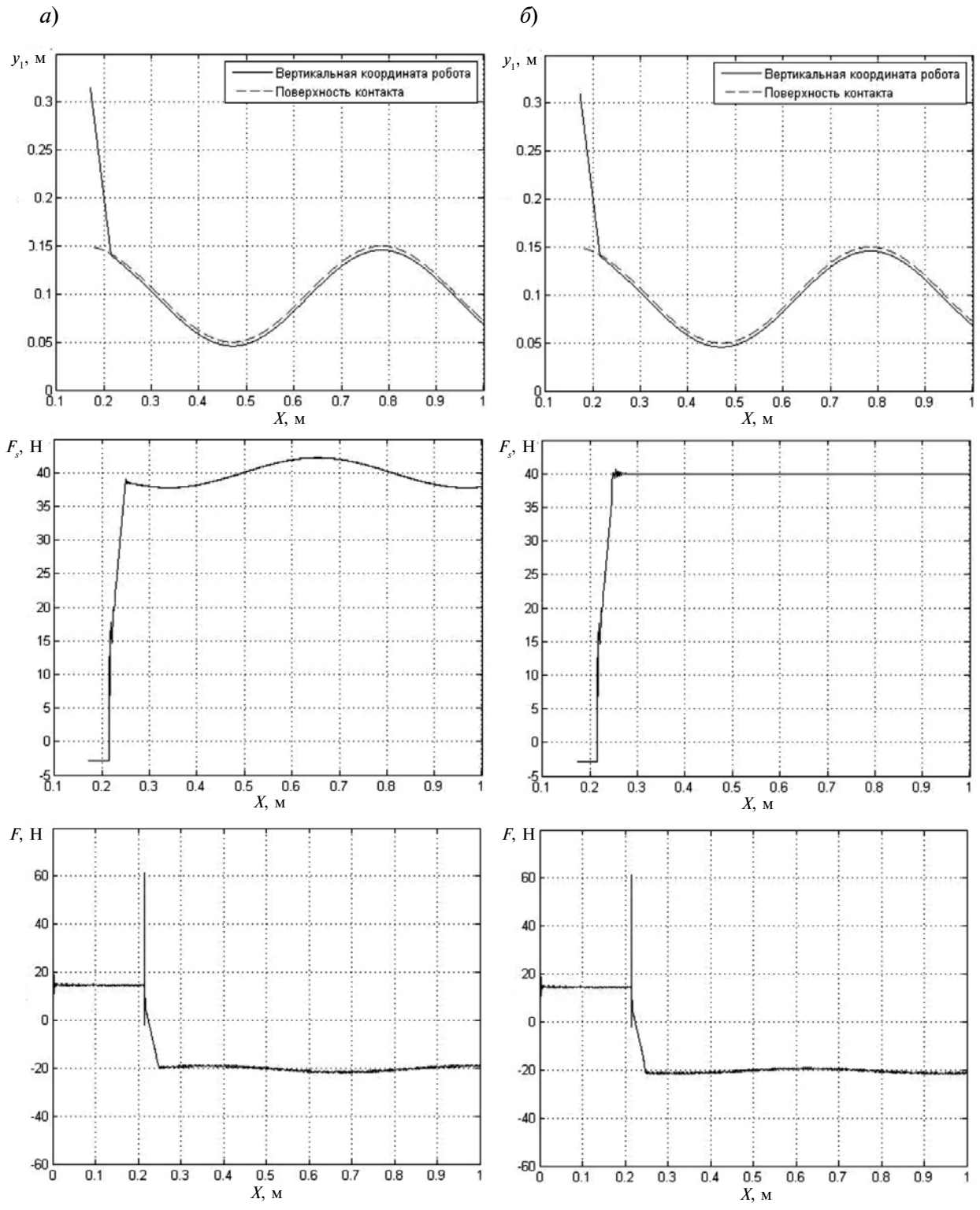


Рис. 6. Графики координаты робота, показаний датчика силы и управляющей силы без обучения (а) и с обучением (б)

### Обучение роботов перед выполнением циклических операций

Для оучувствленных роботов, выполняющих циклические операции, имеется дополнительный ресурс повышения точности поддержания требуемого уровня  $F_s^*$  силы  $F_s$  с помощью процедуры обучения на пробных циклах движения [12, 13].

На (рис. 6 а) приведены графики вертикальной координаты робота  $y_1(t)$ , показаний датчика силы  $F_s(t)$  и управляющей силы  $F(t)$  в случае гармонического профиля  $y^*(t) = 0,1 + 0,05 \sin 10x|_{x=x^d(t)}$ . Хорошо видно, что ошибка обработки задания по силе взаимодействия  $e_F = F_s - F_s^*$  тоже меняется по гармоническому закону с амплитудой порядка 2 Н. Такая точность может оказаться недостаточной. В целях повышения точности будем использовать итеративную процедуру обучения с низкочастотным фильтром [13]:

$$F_s^{*(k+1)} = F_s^{*(k)} - \gamma e_F^{(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где  $\gamma \leq 1$  — настраиваемый весовой коэффициент.

В соответствии с (9) для каждого  $(k+1)$ -го цикла движения коррекция задания производится после завершения  $k$ -го цикла по сохраненной в памяти системы управления ошибке  $e_F$ .

На рис. 6 б приведены графики про-

цессов после выполнения одной корректирующей итерации. Точность поддержания силы  $F_s$  на уровне 40 Н существенно повысилась. Низкочастотный фильтр для ошибки  $e_F^{(k)}$  понадобился для исключения из процедуры обучения высокочастотных составляющих переходных процессов, обусловленных упругой податливостью руки робота.

В настоящей статье на примере связанного позиционно-силового управления движением робота показана важная роль моделей механики при выборе рациональных соотношений инерционных и жесткостных характеристик робота и датчика силы, а также структуры и настроек системы управления и задающих воздействий. Стремление повысить точность обработки желаемых движений приводит к необходимости дальнейшего уточнения моделей механики и учета факторов, которые раньше считались второстепенными. В дальнейших исследованиях речь будет идти об учете моделей взаимодействия робота с поверхностью в зоне контакта, которые существенным образом зависят от функционального назначения робота. Только этот путь позволяет получить высокие, но в то же время принципиально реализуемые требования к замкнутой системе управления и желаемым движениям.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юревич Е.И. Интеллектуальные роботы. М.: Машиностроение, 2007. 360 с.
2. Попов А.В., Юревич Е.И. Позиционно-силовое управление манипуляторами: состояние и перспективы // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. № 5. Приложение. С. 2–6.
3. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. Владимир: Изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. 191 с.
4. Головин А.Ф., Архипов М.В., Журавлев В.В. Проблемы развития робототехники в восстановительной медицине // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 49–53.
5. Гориневский Д.М., Формальский А.М., Шнейдер А.Ю. Управление манипуляционными системами на основании информации об усилиях. М.: Физматлит, 1994. 368 с.
6. Hogan N. Impedance control: an approach to manipulation // ASME J. Dynamic Systems, Measr. and Control. 1985. Vol. 107. Pp. 1–24.
7. Lawrence D., Stronghton R.M. Position-based impedance control: Achieving stability in practice // Proc. AIAA Cont. on Guidance, Navigation and Control. 1997. Pp. 221–226.
8. Обработка турбинной лопатки [электронный ресурс]/ URL: www.youtube.com.
9. Головин А.Ф., Архипов М.В., Журавлев В.В. Метод силового обучения при планировании траекторий робота для восстановительной медицины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 10. С. 29–30.
10. An C., Hollerbach J. The role of dynamic models in cartesian force control of manipulators // Int. J. of Robotics Res. 1989. Vol. 8(4). Pp. 51–72.
11. Rocco P., Ferretti G., Magnani G. Implicit force control for industrial robots in contact with



stiff surfaces // Proc. of the 13th Triennial World Congress. San Francisco, 1996. Pp. 355–360.

12. **Первозванский А.А.** Обучаемое управление и его приложения // Автоматика и телемеханика. 1995. № 11, 12.

13. **Бурдаков С.Ф., Смирнова Н.А.** Обучаемое управление упругим манипулятором при выполнении циклических операций // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2002. № 4. С. 142–149.

## REFERENCES

1. **Yurevich Ye.I.** *Intellektualnyye roboty [Intelligent robots]*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2007, 360 p. (rus)

2. **Popov A.V., Yurevich Ye.I.** Pozitsionno-silovoye upravleniye manipulyatorami: sostoyaniye i perspektivy [Position-force control of manipulators: Status and Prospects]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniye [Mechatronics, automation and control]*, 2008, No. 5, Pp. 2–6. (rus)

3. **Yegorov I.N.** *Pozitsionno-silovoye upravleniye robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami. [Position-force control of robotic and mechatronic devices]*, Vladimir: VGU Publ., 2010, 191 p. (rus)

4. **Golovin A.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V.** Problemy razvitiya robototekhniki v vosstanovitelnoy meditsine [Problems of development of robotics in rehabilitation medicine]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye [Mechatronics, automation and control]*, 2009, No. 9, Pp. 49–53. (rus)

5. **Gorinevskiy D.M., Formalskiy A.M., Shneyder A.Yu.** *Upravleniye manipulyatsionnymi sistemami na osnovanii informatsii ob usilyakh [Office handling systems on the basis of information on efforts]*. Moscow: Fizmatlit Publ., 1994, 368 p. (rus)

6. **Hogan N.** Impedance control: an approach to manipulation. *ASME J. Dynamic Systems, Measr. and Control*, 1985, Vol. 107, Pp. 1–24.

7. **Lawrence D., Stronghton R.M.** Position-based impedance control: Achieving stability in

practice. *Proc. AIAA Cont. on Guidance, Navigation and Control*, 1997, Pp. 221–226.

8. *Obrabotka turbinnoy lopatki [Processing turbine blade]*. Available: [www.youtube.com](http://www.youtube.com) (rus)

9. **Golovin A.F., Arkhipov M.V., Zhuravlev V.V.** Metod silovogo obucheniya pri planirovani trayektoriy robota dlya vosstanovitelnoy meditsiny [The method of power training in the planning of robot trajectories for regenerative medicine]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye [Mechatronics, automation and control]*, 2009, No. 10, Pp. 29–30. (rus)

10. **An C., Hollerbach J.** The role of dynamic models in cartesian force control of manipulators, *Int. J. of Robotics Res.*, 1989, Vol. 8(4), Pp. 51–72.

11. **Rocco P., Ferretti G., Magnani G.** Implicit force control for industrial robots in contact with stiff surfaces. *Proc. of the 13th Triennial World Congress*, San Francisco, 1996, Pp. 355–360.

12. **Pervozvanskiy A.A.** Obuchayemoye upravleniye i yego prilozheniya [Educational management and its application]. *Automatica i telemechanika [Automatics and telemechanics]*, 1995, No. 11, 12. (rus)

13. **Burdaков S.F., Smirnova N.A.** Obuchayemoye upravleniye uprugim manipulyatorom pri vypolnenii tsiklicheskih operatsiy [Educational Management resilient arm when the cyclic operations]. *Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Izvestia RAS. Theory and control systems]*, 2002, No. 4, Pp. 142–149. (rus)

---

**БУРДАКОВ Сергей Федорович** – профессор кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, доктор технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

**BURDAKOV Sergey F.** Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: burdakov.s@yandex.ru

**ШАГНИЕВ Олег Булатович** – инженер 2 категории кафедры механики и процессов управления Института прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: shagnoleg@yandex.ru

**SHAGNIEV Oleg B.** *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.  
E-mail: shagnoleg@yandex.ru



**ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЧИСЛА УЧАСТНИКОВ  
МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧЕНИЙ**

*S.V. Muravyov, I.A. Marinushkina*

**TOWARDS A JUSTIFICATION OF CHOOSING THE NUMBER  
OF PARTICIPANTS FOR INTERLABORATORY COMPARISONS**

---

Исследована модель, основанная на геометрическом распределении, связывающая вероятность определения опорного значения измеряемой величины с числом  $m$  лабораторий – участников межлабораторных сличений. Проведен анализ зависимости вероятности определения опорного значения измеряемой величины от числа дополнительных лабораторий, введенных в состав группы участников сличений. Даны рекомендации по выбору рационального значения числа  $m$  при заданной элементарной вероятности определения опорного значения для одной лаборатории.

МЕЖЛАБОРАТОРНЫЕ СЛИЧЕНИЯ; ОПОРНОЕ ЗНАЧЕНИЕ; СХЕМА БЕРНУЛЛИ; ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ; ВЕРОЯТНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПОРНОГО ЗНАЧЕНИЯ.

The article has investigated a model based on the geometrical distribution and connecting a probability of determining the reference value of a measured quantity with  $m$  interlaboratory comparison participants. We have conducted an analysis of the dependency of the probability of determining the reference value of the measured quantity on the number of additional laboratories introduced into a group of comparison participants. On the base of this analysis, recommendations are given for a reasonable choice of the number  $m$  at a given elementary probability of determining the reference value for a single laboratory that are ranged from 4 to 10-15. As a rule, at this amount of participating laboratories, including new participants into the comparison group does not produce a positive effect.

INTERLABORATORY COMPARISONS; REFERENCE VALUE; BERNOULLI TRIAL; GEOMETRICAL DISTRIBUTION; PROBABILITY OF REFERENCE VALUE DETERMINATION.

---

Для обеспечения метрологической прослеживаемости на разных уровнях метрологических работ [1], подтверждения и признания достоверности результатов испытаний и калибровки в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов [2, 3] необходимо проведение сличений как эталонов различных уровней, так и средств и методик измере-

ний, используемых аккредитованными испытательными и калибровочными лабораториями.

В зависимости от целей сличений, требований к подготовке, проведению и представлению результатов процедуры сличений, различают ключевые сличения (национальных эталонов) и сличения на уровне поверочных, калибровочных и ис-

пытательных лабораторий, проводимые при процедурах проверки их квалификации.

В *ключевых сличениях* Международного комитета по мерам и весам (МКМВ) и региональных метрологических организаций (РМО) принимают участие хранители национальных эталонов: национальные метрологические институты, обладающие наивысшей технической компетенцией и опытом в соответствующем виде измерений [4]. Для мониторинга качества выполнения испытаний или измерений испытательными, поверочными, калибровочными лабораториями применяется проверка квалификации лабораторий посредством проведения межлабораторных сличений [5]. Как показала международная и национальная практика [6], проверка квалификации лабораторий посредством межлабораторных сличений является надежным инструментом оценивания компетентности аккредитованных лабораторий в определенных областях испытаний и измерений.

Процедура межлабораторных сличений заключается в организации и проведении оценивания заданного номинального значения измеряемой величины  $x_{\text{ном}}$  транспортируемого эталона несколькими различными лабораториями в соответствии с заранее установленными условиями. Например, в работе [7] при оценивании компетентности 12 лабораторий в области измерений микроволнового излучения в качестве эталона использован датчик мощности с номинальным калибровочным коэффициентом  $x_{\text{ном}} = 1,0$  на частоте 1 ГГц.

Для реализации программы проверки квалификации лабораторий провайдер осуществляет рассылку участникам сличений характеризующегося номинальным значением  $x_{\text{ном}}$  транспортируемого эталона для проведения измерений. Лаборатории-участники направляют провайдеру результаты измерений в форме оценок  $x_i$  номинального значения и соответствующих стандартных неопределенностей  $u(x_i)$ . Провайдер проводит обработку полученных результатов и формирует заключение для каждой лаборатории-участника.

Основной задачей провайдера (организатора) сличений является установле-

ние *опорного значения* измеряемой величины  $x_{\text{ref}}$  и его интервала неопределенности  $u(x_{\text{ref}})$ . Под опорным значением понимается оценка, наилучшим образом характеризующая номинальное значение измеряемой величины, полученная по результатам всех участников сличений. В РМГ 29-2013 [8] указано, что опорное значение величины используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода.

Существуют различные алгоритмы нахождения опорного значения измеряемой величины  $x_{\text{ref}}$ , которым посвящено много публикаций, см., например, [9, 10]. Традиционно в качестве  $x_{\text{ref}}$  принимают средневзвешенное значение  $y$  и соответствующую неопределенность  $u(y)$ , рассчитываемые по формулам [9]:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m x_i u^{-2}(x_i)}{\sum_{i=1}^m u^{-2}(x_i)},$$

$$u^2(y) = 1 / \sum_{i=1}^m u^{-2}(x_i),$$
(1)

где  $m$  — количество участвующих в сличениях лабораторий.

Во введенном в действие с 01.03.2015 г. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации» (п. 4.4.4.3) рекомендуется при разработке методов обработки данных сличений «тщательно рассмотреть» вопрос о «минимальном количестве участников в программе проверки квалификации, необходимом для достижения целей статистического расчета» [5]. Однако проблеме обоснования рационального выбора числа участников межлабораторных сличений в научно-технической литературе уделено мало внимания.

Действительно, в том случае, когда целью сличений является определение опорного значения измеряемой величины, привлечение к этой процедуре каждого нового участника требует значительных затрат финансовых и временных ресурсов. С другой стороны, количества лабораторий может быть недостаточно для обеспечения заданной достоверности результата. Поэтому число участников сличений, как правило, не должно превышать некоторой мини-

мальной верхней границы и определение обоснованного количества  $m$  участников сличений представляет собой актуальную задачу.

Для этой цели далее в настоящей статье используются простые *вероятностные* соображения, позволяющие получить оценку верхней границы для числа  $m$  в явном аналитическом виде.

### Схема Бернулли и геометрическое распределение

Рассмотрим классическую схему Бернулли (см, например, [11, 12]) для последовательности *независимых* испытаний, каждое из которых может иметь один из *двух* исходов – «успех» или «неудачу». Пусть  $p$  – вероятность успеха (назовем ее *элементарной вероятностью*), тогда вероятность неудачи в каждом испытании равна  $q = 1 - p$ . Вероятности исходов  $p$  и  $q$  остаются *неизменными* во всех испытаниях.

Пусть  $X$  обозначает число испытаний до первого успеха. Тогда вероятность  $P(X = m)$  того, что успех случится во время  $m$ -го испытания, равна вероятности  $(1 - p)^{m-1}$  того, что он не случится во время  $m - 1$  испытаний, умноженной на вероятность  $p$  того, что успех произойдет во время  $m$ -го испытания, то есть:

$$P(X = m) = p(1 - p)^{m-1} = pq^{m-1}, \quad (2)$$

$$m = 1, 2, \dots$$

В этом случае говорят, что случайная величина  $X$  имеет дискретное *геометрическое распределение* с параметром  $p$  [11].

Вероятность того, что успех не наступает при испытании  $m$  или до него, равна вероятности  $(1 - p)^m$  последовательных  $m$  неудач. Это значит, что вероятность того, что успех наступит после  $m$  испытаний, имеет вид:

$$P(X \leq m) = 1 - (1 - p)^m = 1 - q^m. \quad (3)$$

Для геометрического распределения выражения (2) и (3) представляют собой функцию (плотности) вероятности и функцию распределения соответственно.

В терминах геометрического распределения можно ставить и решать много практически полезных задач, таких как выбор

числа экспертов для оценивания удобства и простоты использования пользовательского интерфейса [13, 14] или для оценивания качества продукции [15]. В работе [16] с использованием геометрического распределения дан анализ времени, необходимого для того, чтобы при наборе на печатной машинке произвольных символов получился связный литературный текст. В учебнике Е.С. Вентцель и Л.А. Овчарова [12] рассмотрена следующая задача: «При одном цикле обзора радиолокационной станции, следящей за космическим объектом, объект обнаруживается с вероятностью  $p$ . Обнаружение объекта в каждом цикле происходит независимо от других. Найти вероятность того, что при  $m$  циклах объект будет обнаружен». В качестве решения задачи в [12] использована формула (3).

Воспользуемся геометрическим распределением для определения необходимого и достаточного количества  $m$  лабораторий, участвующих в межлабораторных сличениях.

### Вероятностная модель обнаружения опорного значения

Пусть  $p$  – вероятность обнаружения опорного значения после предоставления результата его измерения одной лабораторией. Считаем, что каждая из участвующих в сличениях лабораторий получает свой результат независимо от других. Тогда по формуле (3) можно рассчитать вероятность  $F$  того, что опорное значение определено по результатам  $m$  лабораторий:

$$F = 1 - (1 - p)^m. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует выражение для числа участвующих в сличениях лабораторий:

$$m = \frac{\ln(1 - F)}{\ln(1 - p)}. \quad (5)$$

Из табл. 1 и графика на рис. 1, построенного по формуле (4), видно, что существует некоторое критическое значение  $m_{кр}$  числа  $m$  такое, что при  $m > m_{кр}$  не происходит существенного увеличения вероятности обнаружения опорного значения. Например, при  $p = 0,6$  нет необходимости

иметь более пяти лабораторий, т. к. вероятность нахождения опорного значения при  $m > m_{кр} = 5$  практически равна единице.

Рассмотрим, как изменится вероятность  $F$  после привлечения *одной новой* лаборатории к участию в сличениях. Выражение, показывающее, во сколько раз вероятность  $F_1 = F(m + 1)$  превосходит вероятность  $F = F(m)$ , имеет следующий вид:

$$\frac{F_1}{F} = \frac{1 - (1 - p)^{m+1}}{1 - (1 - p)^m} = 1 + \frac{p(1 - p)^m}{1 - (1 - p)^m}. \quad (6)$$

Из табл. 2 и рис. 2 видно, что увеличение числа лабораторий-участников на единицу приводит к незначительному росту вероятности  $F$ . Это увеличение становится еще более несущественным для всех

$m > m_{кр} = 4$ . И чем больше элементарная вероятность  $p$ , тем более несущественным становится вклад новой лаборатории.

### Анализ роста вероятности $F$ при добавлении $k$ дополнительных лабораторий в группу участников сличений

Описанное в предыдущем разделе изменение вероятности  $F$  стоит оценить в более явном и общем виде. Обозначим через  $\gamma$  относительный рост вероятности  $F$  в результате добавления  $k$  дополнительных лабораторий в группу  $m$  участников сличений, то есть:

$$\gamma = \frac{F(m + k) - F(m)}{F(m)} = \frac{F_k - F}{F}, \quad (7)$$

где

Таблица 1

Значения вероятности  $F$ , рассчитанные по формуле (4) для различных  $m$  и  $p$

$m$	Элементарная вероятность $p$			
	0,05	0,1	0,2	0,6
2	0,10	0,19	0,36	0,84
4	0,19	0,34	0,59	0,97
6	0,26	0,47	0,74	1,00
8	0,34	0,57	0,83	1,00
10	0,40	0,65	0,89	1,00
12	0,46	0,72	0,93	1,00
14	0,51	0,77	0,96	1,00
16	0,56	0,81	0,97	1,00
18	0,60	0,85	0,98	1,00
20	0,64	0,88	0,99	1,00

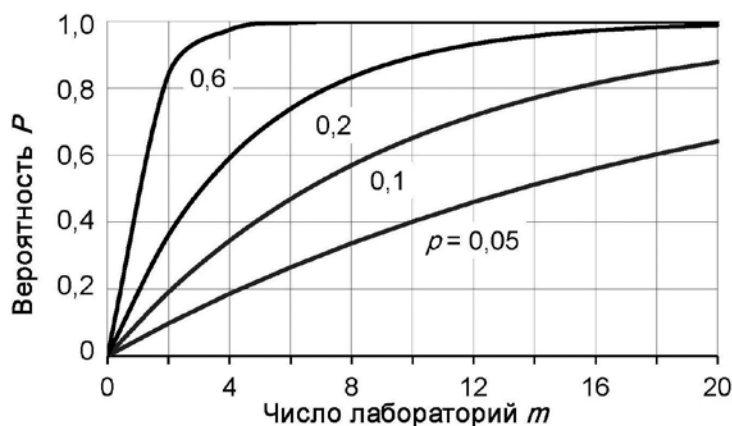


Рис. 1. Зависимость вероятности  $F$  от  $m$  для различных значений  $p$ , см. формулу (4)

Таблица 2

Значения отношения  $F_1/F$ , рассчитанные по формуле (6) для различных  $m$  и  $p$

$m$	Элементарная вероятность $p$		
	0,05	0,2	0,6
1	1,95	1,80	1,40
2	1,46	1,36	1,11
4	1,22	1,14	1,02
6	1,14	1,07	1,00
8	1,10	1,04	1,00
10	1,07	1,02	1,00
12	1,06	1,01	1,00
14	1,05	1,01	1,00
16	1,04	1,01	1,00
18	1,03	1,00	1,00
20	1,03	1,00	1,00

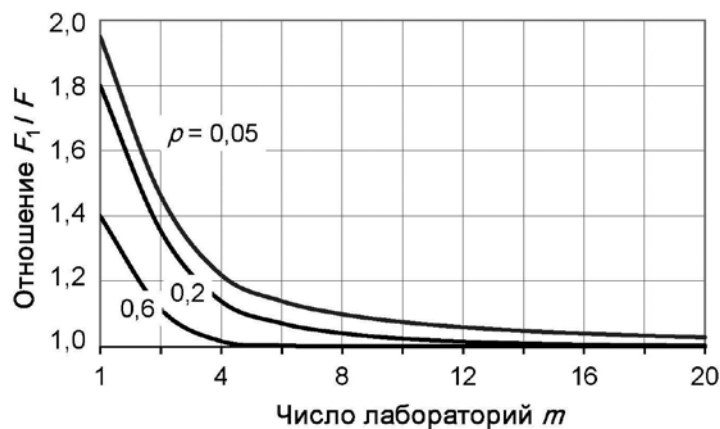


Рис. 2. Зависимость отношения  $F_1/F$  от  $m$  для различных значений  $p$ , см. формулу (6)

$$F_k = 1 - (1 - p)^m(1 - p)^k. \quad (8)$$

Из выражений (4), (7) и (8) получаем:

$$\gamma = (1 - p)^m \frac{1 - (1 - p)^k}{1 - (1 - p)^m}. \quad (9)$$

В табл. 3 представлены значения относительного роста вероятности  $\gamma(k)$  для различных чисел  $m$ , рассчитанные по выражению (9), а на рис. 3 показаны соответствующие графики.

Как видно из данных табл. 3 и рис. 3, существенное увеличение вероятности определения опорного значения, благодаря привлечению дополнительных  $k$  лабораторий-участников, происходит толь-

ко в том случае, если элементарная вероятность  $p$  мала (см. график для  $p = 0,05$  на рис. 3). В этом случае зависимость  $\gamma(k)$  имеет почти линейный характер. Видно, что при  $m = 1$  удвоение шансов найти опорное значение (т. е. когда  $\gamma$  увеличивается на 1 или на 100 %) происходит при каждом увеличении  $k$  на 1, особенно при малых  $k$ . Однако уже при  $m = 7$  такое удвоение шансов происходит только при  $k = 10$ .

При  $p = 0,5$  можно видеть, что если группа участников сличений состоит из четырех лабораторий, добавление в группу нового участника бесполезно, т. к. оно не увеличивает вероятность нахождения опорного значения.

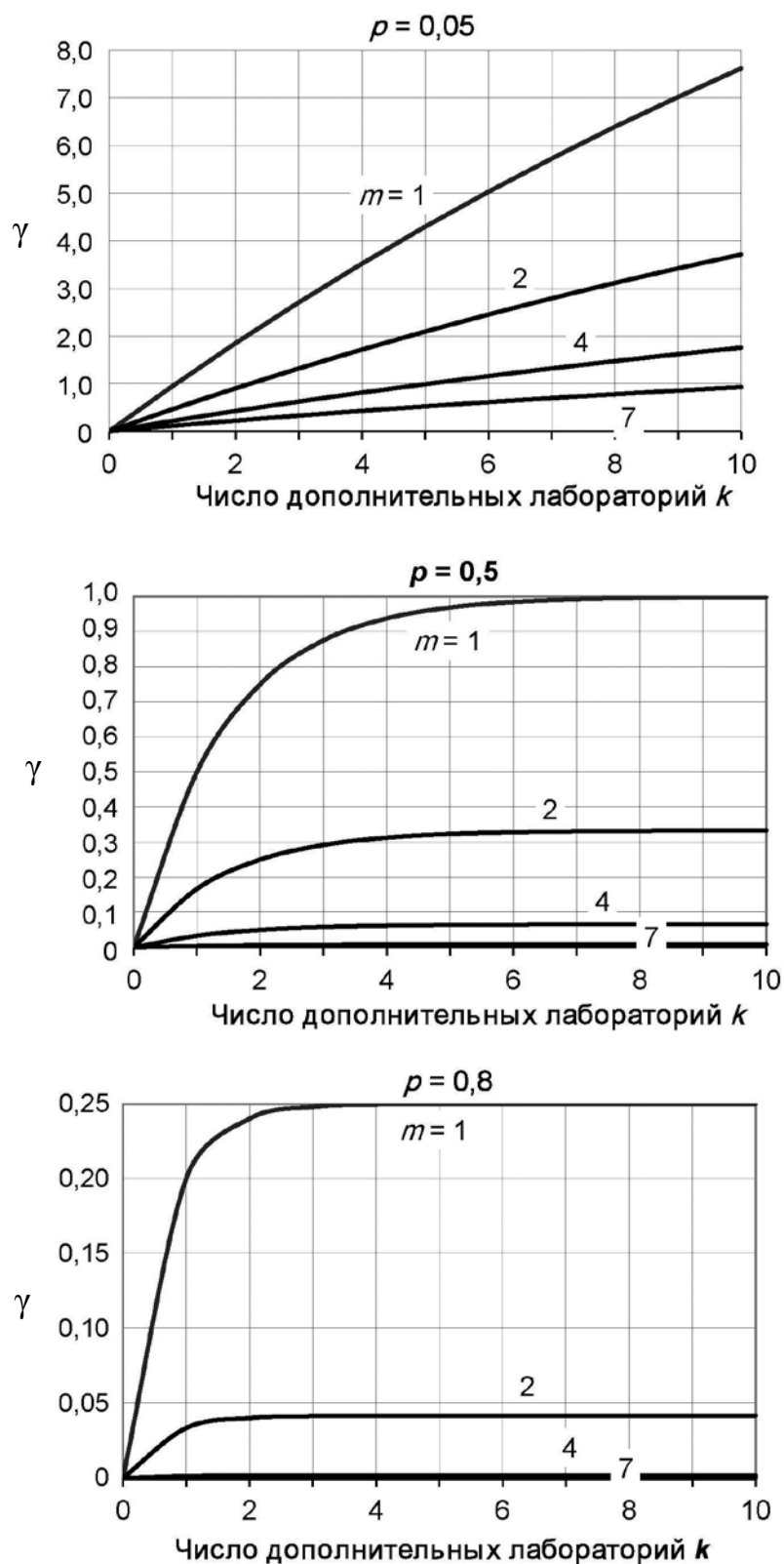


Рис. 3. Зависимости (для  $\rho = 0,05; 0,5$  и  $0,8$ ) относительного роста вероятности  $\gamma$  от числа  $k$  дополнительных лабораторий при различных  $m$ , см. формулу (9)

В случае  $p = 0,8$  можно убедиться, что нет необходимости в добавлении новых участников уже при  $k = 3$ , хотя в группу участников сличений входит лишь одна лаборатория.

Анализ данных табл. 3 и рис. 3 позволяет сделать вывод о важности способа формирования группы участников сличений. Действительно, значения параметров  $p = 0,05$ ,  $m = 2$  и  $k = 8$  дают относительный рост вероятности  $\gamma = 3,11$ , в то время как  $\gamma = 1,16$  при  $m = 4$  и  $k = 6$ ; причем в том и в другом случаях общее число участников  $m + k = 10$ . Следовательно, комбинация различных  $m$  и  $k$  при их одинаковой сумме обеспечивает больший выигрыш  $\gamma$ , если  $m < k$ .

Число  $k$  может быть легко определено в явном виде, используя выражение (7):

$$k = \frac{\ln(1 - F_k)}{\ln(1 - p)} - m = m \frac{\ln(1 - F_k)}{\ln(1 - F)} - m. \quad (10)$$

На практике число  $k$  может быть рассчитано, исходя из известного желательного или критического значения  $F_k$ .

Конечно, элементарная вероятность  $p$  должна быть заранее задана или оценена. Задать ее значение можно, исходя из соображений приемлемого риска с учетом

мнений экспертов. Следует также использовать малейшую возможность оценивания этой вероятности. Ясно, что  $p$  является параметром не только геометрического, но и биномиального распределения. Известны различные методы оценивания параметра  $p$  биномиального распределения на основе метода максимального правдоподобия и метода моментов [17]. Например, оценка  $\tilde{p}$  максимального правдоподобия имеет простейший вид:  $\tilde{p} = m / n$ , где  $n$  – общее число испытаний, т. е. может быть основана на имеющемся опыте проведенных ранее испытаний [18].

При задании значения  $p$  (случай, который нередко имеет место при практических расчетах [19]) следует учитывать факт, что часть участников сличений могут представлять ненадежные результаты [7, 9, 10, 20], несмотря на то, что они декларируют высокий уровень доверительной вероятности при предоставлении результата  $\langle x_p, u(x_p) \rangle$ . Тогда значение  $p$  следует снижать на некоторый согласованный уровень.

Несмотря на простоту, рассмотренная в статье основанная на геометрическом распределении модель, связывающая в явном

Таблица 3

Значения относительного роста вероятности  $\gamma(k)$  для различных чисел  $m$ , см. выражение (9)

k	Элементарная вероятность p											
	0,05				0,5				0,8			
	m				m				m			
	1	2	4	7	1	2	4	7	1	2	4	7
1	0,95	0,46	0,21	0,11	0,5	0,17	0,03	0,004	0,2	0,03	0,0013	0
2	1,85	0,90	0,42	0,22	0,75	0,25	0,05	0,006	0,24	0,04	0,0015	0
3	2,71	1,32	0,63	0,33	0,87	0,29	0,06	0,007	0,25	0,04	0,0016	0
4	3,52	1,72	0,81	0,42	0,94	0,31	0,06	0,007	0,25	0,04	0,0016	0
5	4,30	2,09	0,99	0,52	0,97	0,32	0,06	0,008	0,25	0,04	0,0016	0
6	5,03	2,45	1,16	0,61	0,98	0,33	0,07	0,008	0,25	0,04	0,0016	0
7	5,73	2,79	1,32	0,70	0,99	0,33	0,07	0,008	0,25	0,04	0,0016	0
8	6,39	3,11	1,48	0,78	1,0	0,33	0,07	0,008	0,25	0,04	0,0016	0
9	7,02	3,42	1,62	0,86	1,0	0,33	0,07	0,008	0,25	0,04	0,0016	0
10	7,62	3,71	1,76	0,93	1,0	0,33	0,07	0,008	0,25	0,04	0,0016	0

аналитическом виде вероятность определения опорного значения измеряемой величины с числом  $m$  лабораторий-участников межлабораторных сличений, позволила провести достаточно глубокий анализ зависимости вероятности определения опорного значения измеряемой величины от числа дополнительных лабораторий, введенных в состав группы участников сличений. На основе этого анализа можно рекомендовать назначать число участников сличений от четырех до 10–15. Как правило, при таком

количестве участников привлечение к сличениям новых лабораторий не дает положительного эффекта.

В ситуациях, когда необходимо выявлять опорное значение с помощью группы экспертных лабораторий, за счет минимизации числа лабораторий в такой группе можно избежать значительных материальных затрат.

Базовая часть государственного задания «Наука» Министерства образования и науки РФ, проект № 2078.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ILAC P10:01/2013. ILAC Policy on Traceability of Measurement Results [электронный ресурс] / URL: <http://www.ilac.org/> (дата обращения: 02.07.2015).
2. CIPM MRA-D-05. Measurement comparisons in the CIPM MRA [электронный ресурс] / URL: <http://www.bipm.org> (дата обращения: 02.07.2015).
3. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
4. BIPM 1999. Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates issued by National Metrology Institutes (MRA) [электронный ресурс] / URL: <http://www.bipm.org> (дата обращения: 05.05.2015).
5. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013. Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации.
6. ГОСТ Р ИСО 13528-2010. Статистические методы. Применение при экспериментальной проверке компетентности посредством межлабораторных сравнительных испытаний.
7. Brunetti L., Oberto L., Sellone M., Terzi P. Establishing reference value in high frequency power comparisons // *Measurement*. 2009. Vol. 42. Pp. 1318–1323.
8. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
9. Cox M.G. The evaluation of key comparison data // *Metrologia*. 2002. Vol. 39. Pp. 589–595.
10. Muravyov S.V. Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons // *Measurement*. 2013. Vol. 46. Iss. 8. Pp. 2927–2935.
11. Прохоров Ю.В. Вероятность и математическая статистика: Энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. 912 с.
12. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.
13. Nielsen J., Landauer T.K. A mathematical model of the finding of usability problems // *Proc. of the ACM/IFIP INTERCHI'93 Conf.* Amsterdam: IOS Press, 1993. Pp. 206–213.
14. Nielsen J., Mack R.L. (Eds.) Heuristic evaluation // *Usability Inspection Methods*. New York: John Wiley & Sons, 1994. Pp. 55–62.
15. Muravyov S.V. About reasonable number of rankings in preference profile when measuring quality // *Proc. of the 9th IMEKO Symp. on Measurement and Quality Control*. Chennai: Indian Institute of Technology Madras, 2007. Pp. 331–334.
16. Spiegelhalter D., Smith O. Understanding uncertainty: Infinite monkey business // *Plus Magazine*, University of Cambridge. 2010. Iss. 54 [электронный ресурс] / URL: <https://plus.maths.org/content/infinite-monkey-business>. (дата обращения: 02.07.2015).
17. Blumenthal S., Dahiya R.C. Estimating the Binomial Parameter  $n$  // *J. of the American Statistical Association*. 1981. Vol. 76. No. 376. Pp. 903–909.
18. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 1.3.6.6.18. Binomial Distribution [электронный ресурс] / URL: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda366i.htm> (дата обращения 02.07.2015).
19. Bich W., Penneccchi F. Uncertainty in measurements by counting // *Metrologia*. 2012. Vol. 49. Pp. 15–19.
20. Чуновкина А.Г., Бурмистрова Н.А., Звягин Н.Д. Об одном подходе к оцениванию результатов ключевых сличений эталонов при несогласованных данных // *Измерительная техника*. 2013. № 6. С. 3–6.



## REFERENCES

1. *ILAC P10:01/2013. ILAC Policy on Traceability of Measurement Results*. Available: <http://www.ilac.org/> (Accessed: 02.07.2015).
2. *CIPM MRA-D-05. Measurement comparisons in the CIPM MRA*. Available: <http://www.bipm.org> (Accessed: 02.07.2015).
3. *ISO/IEC 17025:2005. Obschie trebovaniya k kompetentnosti ispytatelnykh i kalibrovocnykh laboratoriy [General requirements for the competence of testing and calibration laboratories]*. (rus)
4. *BIPM 1999. Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates issued by National Metrology Institutes (MRA)*. Available: <http://www.bipm.org> (Accessed: 05.05.2015).
5. *ISO/IEC 17043:2010. Otsenka sootvetstviya. Osnovnyie trebovaniya k provedeniyu proverki kvalifikatsii [Conformity assessment – General requirements for proficiency testing]*. (rus)
6. *ISO 13528:2005. Statisticheskie metodyi. Primenenie pri eksperimentalnoy proverke kompetentnosti posredstvom mezhlaboratornykh sravnitelnykh ispytaniy [Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons]*. (rus)
7. **Brunetti L., Oberto L., Sellone M., Terzi P.** Establishing reference value in high frequency power comparisons, *Measurement*, 2009, Vol. 42, Pp. 1318–1323.
8. *ISO/IEC Guide 99:2007. Metrologiya. Osnovnyie terminyi i opredeleniya [International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM 3)]*. (rus)
9. **Cox M.G.** The evaluation of key comparison data. *Metrologia*, 2002, Vol. 39, Pp. 589–595.
10. **Muravyov S.V.** Ordinal measurement, preference aggregation and interlaboratory comparisons. *Measurement*, 2013, Vol. 46, Iss. 8, Pp. 2927–2935.
11. **Prokhorov Yu.V.** *Veroyatnost i matematicheskaya statistika [Probability and Mathematical Statistics]*. Moscow: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya Publ., 2003, 912 p. (rus)
12. **Venttsel Ye.S., Ovcharov L.A.** *Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya [Probability theory and its engineering applications]*. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2000, 480 p. (rus)
13. **Nielsen J., Landauer T.K.** A mathematical model of the finding of usability problems. *Proceedings of the ACM/IFIP INTERCHI'93 Conference*. Amsterdam: IOS Press, 1993, Pp. 206–213.
14. **Nielsen J., Mack R.L.** (Eds.) Heuristic evaluation. *Usability Inspection Methods*. New York: John Wiley & Sons, 1994, Pp. 55–62.
15. **Muravyov S.V.** About reasonable number of rankings in preference profile when measuring quality. *Proceedings of the 9th IMEKO Symposium on Measurement and Quality Control*. Chennai: Indian Institute of Technology Madras, 2007, Pp. 331–334.
16. **Spiegelhalter D., Smith O.** Understanding uncertainty: Infinite monkey business. *Plus Magazine, University of Cambridge*, 2010, Iss. 54. Available: <http://plus.maths.org/content/infinite-monkey-business>. (Accessed: 02.07.2015).
17. **Blumenthal S., Dahiya R.C.** Estimating the Binomial Parameter  $n$ . *Journal of the American Statistical Association*, 1981, Vol. 76, No. 376, Pp. 903–909.
18. *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 1.3.6.6.18. Binomial Distribution*. Available: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda366i.htm> (Accessed: 02.07.2015).
19. **Bich W., Pennecchi F.** Uncertainty in measurements by counting. *Metrologia*, 2012, Vol. 49, Pp. 15–19.
20. **Chunovkina A.G., Burmistrova N.A., Zvyagin N.D.** Ob odnom podkhode k otsenivaniyu rezultatov klyuchevykh slicheniy etalonov pri nesoglasovannykh dannyykh [An approach to the evaluation of the results of key comparisons of standards when inconsistent data]. *Izmeritelnaya tekhnika [Measurement techniques]*, 2013, No. 6, Pp. 3–6. (rus)

**МУРАВЬЕВ Сергей Васильевич** – профессор кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, доктор технических наук.

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: muravyov@tpu.ru

**MURAVYOV Sergey V.** National Research Tomsk Polytechnic University.

634050, Lenina Ave. 30, Tomsk, Russia.

E-mail: muravyov@tpu.ru

**МАРИНУШКИНА Ирина Александровна** — аспирант кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: irinamar@tpu.ru

**MARINUSHKINA Irina A.** *National Research Tomsk Polytechnic University.*

634050, Lenina Ave. 30, Tomsk, Russia.

E-mail: irinamar@tpu.ru

DOI: 10.5862/JCSTCS.224.9

УДК 656, 004.8, 007.5 , 51-74, 510.67

*Я.А. Селиверстов, С.А. Селиверстов*

## **ФОРМАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ЦЕПОЧЕК ТРАНСПОРТНОЙ АКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО НАСЕЛЕНИЯ**

*Ya.A. Seliverstov, S.A. Seliverstov*

### **THE FORMAL DEVELOPMENT OF PATTERNS OF DAILY TRAVEL ACTIVITY CHAINS OF THE URBAN POPULATION**

---

Разработана процедура построения цепочек транспортной активности городского населения посредством М-оператора. Впервые сформулирован принцип регулярности транспортной активности городского жителя и дано формальное разъяснение процедуры выделения матриц транспортных корреспонденций из цепочек суточной транспортной активности населения посредством оператора транспортных корреспонденций. Разработан метод расчета величины пешеходного и транспортного потоков между корреспондирующими объектами. Сформулировано условие наблюдаемости потоков, введен показатель эффективности работы системы городского транспортно-логистического мониторинга и дано его практическое пояснение. Впервые предложена «простая модель» прогноза цепочек транспортной активности, в которой выбираются наиболее вероятные цепочки на интервале один месяц, с учетом дня недели. Работоспособность модели продемонстрирована на практическом примере.

**ТРАНСПОРТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ; ЦЕПОЧКИ ТРАНСПОРТНОЙ АКТИВНОСТИ ГОРОДСКОГО НАСЕЛЕНИЯ; МАТРИЦЫ ТРАНСПОРТНЫХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ; ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК; ТРАНСПОРТНЫЙ МОНИТОРИНГ; ПРИНЦИП РЕГУЛЯРНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ АКТИВНОСТИ; УМНЫЙ ГОРОД.**

Patterns of chains of daily travel activity of the urban population are developed in the paper by using the M-operator. The principle of the regularity of the travel activity of a city dweller is formulated here. A formal explanation of the calculation of the matrix of correspondence through the chains of daily travel activity of the population using the operator of transport correspondence is given. Values of pedestrian and traffic flows between corresponding objects are determined. The condition of the observability of transport flows is formulated in the article. The efficiency coefficient of the system of urban of transport of monitoring is introduced and its field of use is explained here. Simple patterns of forecast chains of daily travel activity are suggested for the first time and explained by a practical example.

**TRANSPORT MODELING; INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS; DAILY ACTIVITY-TRAVEL PATTERNS; PATTERNS OF DAILY TRAVEL ACTIVITY CHAINS; MATRIX OF TRANSPORT CORRESPONDENCES; TRAFFIC FLOW; TRANSPORT MONITORING; PRINCIPLE OF THE REGULARITY OF TRAVEL ACTIVITY; SMART CITY.**

---

С каждым годом в России, странах Европы и США возрастает интенсивность и сложность транспортно-логистических

процессов [1] в товаропроводящих и улично-дорожных сетях крупных городов. Следствием возрастающей интенсивности

транспортно-логистических процессов является рост дорожно-транспортных происшествий, увеличение времени поездок и ухудшение условий транспортной мобильности городского населения. Решать возникающие транспортные и логистические проблемы мегаполисов призваны интеллектуальные транспортные системы [2, 3].

Развитие интеллектуальных транспортных систем несет в себе принципиально новые методы и подходы к анализу процессов транспортной активности населения. Транспортная активность городского жителя уже не может рассматриваться в отрыве от его социально-экономической деятельности, а следовательно, от его потребительской и информационно-сетевой активностей [4]. Потребительская активность контролируется CRM<sup>1</sup> системами [5, 6], информационно-сетевая активность ISP<sup>2</sup> – системами [7, 8] и операторами сотовой связи [9, 10]. Как следствие, передовые системы управления транспортом должны быть тесно увязаны с потребительскими, информационно-сетевыми и расчетно-денежными системами.

Одним из таких интегрированных решений могла бы стать система городского транспортно-логистического мониторинга (СГТЛМ), представленная ранее в работе [11].

В инженерных транспортных расчетах также необходимы качественные преобразования. Одно из первых, по мнению авторов, преобразований – это отход от вероятностных простых, несвязанных поездок абстрактных жителей между парой районов при оценке прогнозной величины транспортных потоков [12] и переходе к персонифицированным целевым цепочкам суточной транспортной активности населения, опирающимся на реальные данные их социально-экономической активности [13] и субъективных предпочтений [14, 15]. Такой переход позволит производить не-

прерывную комплексную оценку работоспособности всей городской транспортной системы в процессе управления ею в режиме реального времени [16].

Процесс тотальной информатизации городского населения [17], обусловленный внедрением в повседневную жизнь мобильных средств связи и беспроводных информационных систем, позволил использовать последние для изучения транспортной и социально-экономической активности пользователей информационных услуг. В настоящее время данными исследованиями заняты многие российские и зарубежные научные коллективы. Среди последних работ можно отметить следующие. В работе [11] рассмотрены особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга, необходимой для информационного обеспечения взаимодействия между всеми объектами внутри городской транспортной системы; в [12, 18] представлен анализ методов и моделей построения матриц корреспонденций, причем в [12] с использованием модели EVA, а в [18] с использованием энтропийной модели проведена оценка перераспределения транспортных потоков в Санкт-Петербурге с вводом новых станций метрополитена; в [19] рассмотрены аспекты расчета спроса на транспорт с использованием однородных по действиям, дезагрегированных слоев (группы источник-цель); в [13] предложен подход построения автоматических систем классификации и структурной упорядоченности социально-экономической активности городского населения на основе информации, получаемой с систем транспортно-логистического мониторинга; в [20] предложено использовать gprs данные о передвижении городского населения для определения целей передвижения; в [21] раскрыт новый способ анализа поведения транспортного средства с использованием алгоритма Cam-Shift; в [22] регистрацию и прогноз транспортной активности жителей предложено производить по данным gprs-треков.

Анализ предметной области свидетельствует о значительных успехах в развитии отдельных теоретических и прикладных

<sup>1</sup> CRM (Customer Relationship Management) – системы управления взаимоотношениями с клиентами;

<sup>2</sup> ISP (Internet Service Provider) – системы предоставления услуг интернет-провайдера.



решений, направленных на получение информации о передвижении жителей и построение на их основе матриц транспортных корреспонденций. Часть рассмотренных работ сводится к способам классификации транспортной активности жителей, например, [13, 22]. К сожалению, сама процедура построения персонафицированных цепочек транспортной активности и восстановления из них матриц транспортных корреспонденций остается исследователями до сих пор формально не раскрытой. Цель настоящей работы заключается в том, чтобы устранить этот теоретический пробел и последовательно разъяснить процедуру построения цепочек транспортной активности городского населения.

Построение достоверных цепочек транспортной активности городского населения осуществляется с использованием системы городского транспортно-логистического мониторинга (СГТЛМ), рассмотренной в [11]. Данная система осуществляет комплексное наблюдение за транспортными объектами, их состоянием и обеспечивает информационное взаимодействие между всеми объектами внутри городской системы (рис. 1).

Функционал СГТЛМ в формальной интерпретации примет вид *оператора городского транспортно-логистического монито-*

*ринга (ГТЛМ) или М-оператора.* М-оператор включает операции идентификации (*I*), аутентификации (*A*), классификации (*K*), распознавания состояний (*R*), местоопределения (*P*), прямой и обратной связи (*C*) объектов мониторинга с СГТЛМ и между собой.

Формальное представление М-оператора имеет следующий вид:

$$F_T^{SULTM} : SULTM = I \cup A \cup R \cup P \cup C \cup K, \quad (1)$$

где  $F_T^{SULTM} = \{f_M^{\exists_i}, f_{\psi}^d\}$  – оператор городского транспортно-логистического мониторинга или М-оператор;  $f_M^{\exists_i} \approx I \cup A \cup R \cup P \cup C$  – оператор измерения состояний объектов ГТС;  $f_{\psi}^d \approx K$  – оператор классификации объектов ГТС; *SULTM* – система городского транспортно-логистического мониторинга.

Таким образом, каждому жителю  $h_{id}$  с номером  $id_{\eta}^{h_{id}}$  на интервале один месяц М-оператор ставит в соответствие упорядоченные по времени его цепочки суточной транспортной активности  $cta_{h_{id}}^{date}$ , согласно:

$$\forall h_{id} \quad \exists f_M^{\exists_i}, f_{\psi}^d \quad id_{\eta}^{h_{id}} \xrightarrow{f_M^{\exists_i}, f_{\psi}^d} \{cta_{h_{id}}^{date} : date = 1, \dots, N_{month}\}_T, \quad (2)$$

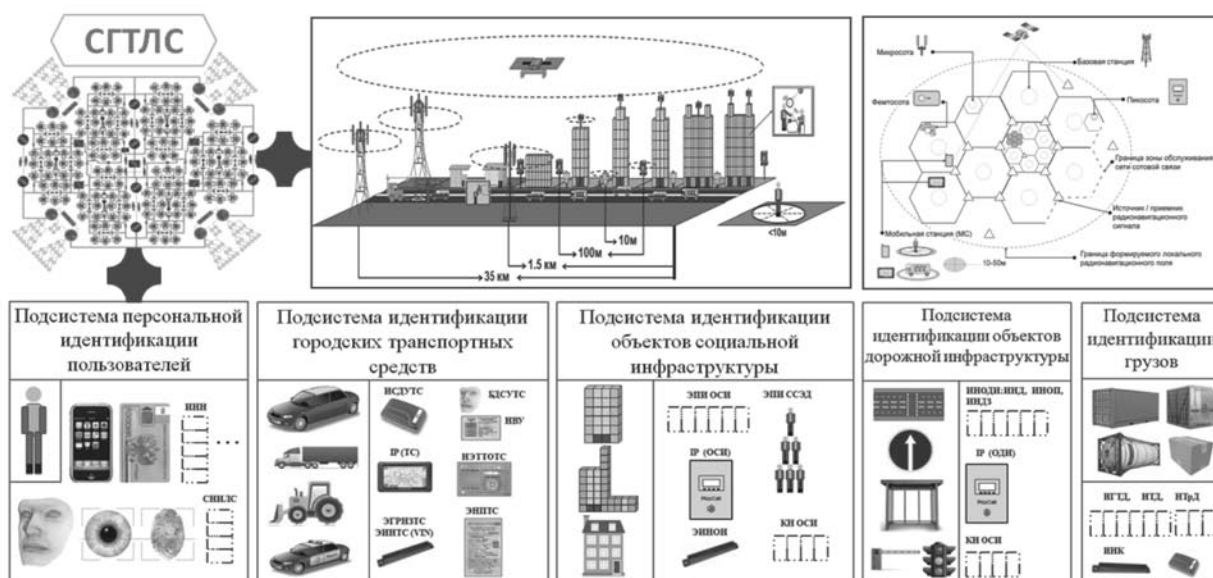


Рис. 1. Система городского транспортно-логистического мониторинга

где  $date$  – указатель календарного дня регистрации цепочки суточной транспортной активности городского жителя,  $date = 1, \dots, N_{month}$ ;  $N_{month}$  – количество дней в месяце;  $T$  – упорядоченное временное множество.

Переходя от одного жителя к городскому населению, выражение (2) примет вид:

$$(H)_T \xrightarrow{F_T^{SULTM}} : (CTA_H)_T, \quad (3)$$

где  $H$  – множество жителей города;  $CTA_H = \{cta_{hid}^{date}\}$  – множество достоверных цепочек транспортной активности жителей.

Достоверная цепочка транспортной активности городского жителя представляет собой упорядоченную во времени последовательность взаимодействий жителя с объектами социальной инфраструктуры, транспортной инфраструктуры, транспортными средствами и участками улично-дорожной сети (рис. 2).

Транспортная активность городского жителя является частью его социально-экономической активности, которая согласно [19] носит регулярный характер.

Натурные исследования также показали [22], что структура цепочек транспортной активности городского населения на протяжении определенных временных интерва-

лов носит циклический характер. Изучение структуры последних позволило перейти от простых маятниковых поездок [23], отражающих характер перемещений из мест проживания к местам приложения труда, к дезагрегированным группам «Источник»-«Сток». Последние позволяют характеризовать перемещения пользователей через 17 транспортных классов [12, 19]. Факт такого транспортного поведения необходимо ввести в свод [24] аксиоматически устойчивых научных утверждений.

Сформулируем принцип регулярности транспортной активности городского жителя (пользователя) в условиях ресурсных (финансовых и временных) ограничений: *транспортная активность городского жителя в условиях ресурсных ограничений имеет регулярную структуру.*

Сохраняя общность рассуждений, перейдем к формальному построению модели транспортного поведения городских жителей.

Формально цепь суточной транспортной активности задается временным графом согласно:

$$cta_{hid}^{date} = \Gamma_{hid}^{date}(ID_{TA}; T_{TA}), \quad (3)$$

где  $cta_{hid}^{date}$  – цепь транспортной активно-

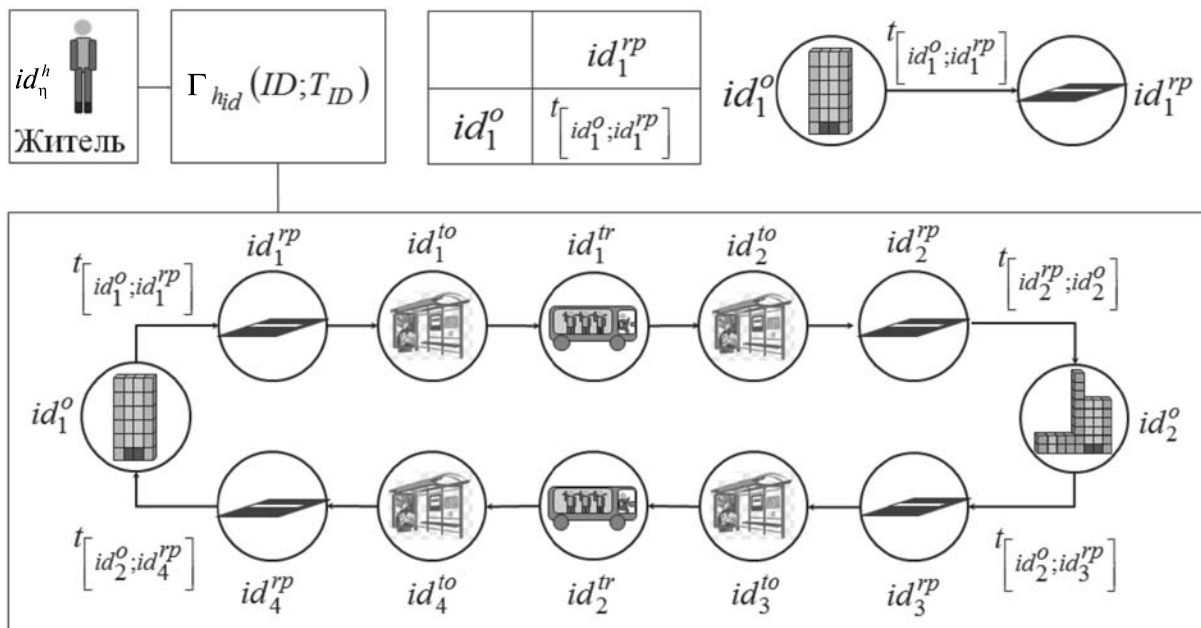


Рис. 2. Цепь суточной транспортной активности городского жителя с  $id_{\eta}^h$

сти городского жителя с  $id_n^h$ ;  $h$  – индекс жителя;  $id(ID)$  – указатель уникального номера (множества номеров) идентификации;  $TA$  – индекс множества объектов, идентифицирующих транспортную активность жителя, вида  $TA = Tr \cup To \cup O \cup Ts$ , в котором  $Tr$  – множество транспортных средств,  $To$  – множество объектов транспортной инфраструктуры,  $O$  – множество объектов социальной инфраструктуры,  $Ts$  – множество участков городской транспортной сети;  $\Gamma_{id}^{date}(ID_{TA}; T_{TA})$  – временной граф транспортной активности пользователя;  $T_{TA}$  – множество времени регистрации взаимодействия городского жителя с объектами множества  $TA$ .

Из цепи суточной транспортной активности жителей посредством оператора транспортных корреспонденций  $f_T^{MC}$  происходит восстановление матриц достоверных транспортных корреспонденций<sup>3</sup> согласно:

$$\Gamma_H^T(ID_{TA}; T_{TA}) \xrightarrow{f_T^{MC}} MC_{TA}^T(P_{[ID_S; ID_D]}); \quad (4)$$

$$\rho_H^{(ID_S; ID_D)} \Big|_{def},$$

где  $MC_{TA}^T((ID_S; ID_D); P_{[ID_S; ID_D]}) \Big|_{def}$  – временная матрица корреспонденций, которая показывает величину потока  $\rho_H^{(ID_S; ID_D)}$  на пути  $P_{[ID_S; ID_D]}$  между определенным местом отправления с  $ID_S$  и определенным местом прибытия с  $ID_D$  из множества  $TA$  в определенный момент времени;  $S$  – индекс, указывающий на место отправления (south – источник);  $D$  – индекс, указывающий на место прибытия (departure – прибытие);  $P_{[ID_S; ID_D]}$  – путь между местом отправления с  $ID_S$  и местом прибытия с  $ID_D$ , вычисляется согласно следующей формуле:

$$P_{[ID_S; ID_D]} = \bigcup_{\substack{ID_D = id_{p=end}^{rp} \\ ID_S = id_{p=sr}^{rp}}} id_p^{rp}, \quad (5)$$

<sup>3</sup> Под достоверной матрицей транспортных корреспонденций понимается матрица корреспонденций, построенная по реальным персонифицированным данным транспортной мобильности городского жителя.

где  $\equiv$  – знак тяготения места отправления/прибытия к транспортной коммуникации, на которой он расположен (например, если местом отправления и прибытия являются объекты социальной инфраструктуры);  $p$  – нижний индекс участка пути в выражении  $id_p^{rp}$ ;  $str$  – начальный участок пути, соответствующий месту отправления;  $end$  – конечный участок пути, соответствующий месту прибытия.

Таким образом, оператор транспортных корреспонденций  $f_T^{MC}$  каждой паре корреспондирующих объектов  $(ID_S; ID_D)$  из множества  $TSD = \{ID_S \times ID_D\}$  ставит в соответствие величину транспортного или пешеходного потока  $\rho_{H,Tr}(ID_S; ID_D)$  между этими корреспондирующими объектами в рассматриваемый момент времени.

Величина пешеходного потока между корреспондирующими районами в рассматриваемый промежуток времени вычисляется согласно

$$\rho_H(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \sum_{\alpha=1}^{\alpha=N_\alpha} h_\alpha^{id_n^h}, \quad (6)$$

а транспортного согласно:

$$\rho_{Tr}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \sum_{k=1}^{k=N_k} tr_k^{id_n^r}. \quad (7)$$

Рассмотрим пример, поясняющий описываемый процесс.

Пример 1. Городской транспортный процесс в момент времени  $t = 09:30$  представлен на рис. 3. Определите величину транспортного потока на пути  $P(ID_S; ID_D)$  между жилым домом с  $id_1^o$  и остановочным пунктом с  $id_1^o$  и постройте матрицу корреспонденций.

Решение. Корреспондирующий путь  $P(ID_S; ID_D)$  между местом отправления с номером  $id_1^o$  и местом прибытия с номером  $id_1^o$  определим из выражения (5):

$$P(ID_S = id_1^o; ID_D = id_1^o) = \bigcup_{ID_D = id_1^o = id_4^{rp}}^{ID_D = id_1^o = id_4^{rp}} id_p^{rp} = id_1^{rp} \cup id_2^{rp} \cup id_3^{rp} \cup id_4^{rp}.$$

Величину транспортного потока на пути определим из выражения (6):

$$\rho_H(id_1^o; id_1^o) \Big|_{T = 9:30} = \sum_{\alpha} h_\alpha^{id_n^h} = 4 \text{ (чел.)}$$

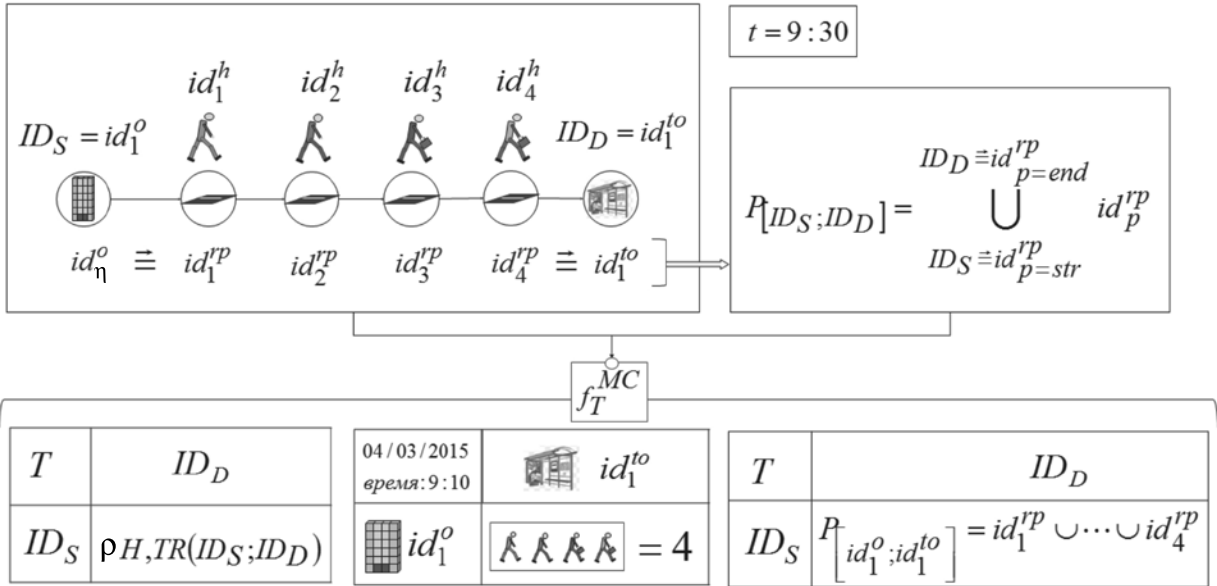


Рис. 3. Городской транспортный процесс

Величина идентифицированного пешеходного потока на участках корреспондирующего пути между корреспондирующими районами в рассматриваемый промежуток времени вычисляется согласно:

$$\rho_H^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \frac{\sum_{\alpha_{id_p^{rp}}} h_{\sum_{\alpha_{id_p^{rp}}}}}{\sum_{\alpha_{id_p^{rp=str}}} \alpha_{id_p^{rp}}}, \quad (8)$$

а транспортного согласно:

$$\rho_{TR}^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} = \frac{\sum_{k_{id_p^{rr}}} tr_{\sum_k}}{\sum_{k_{id_p^{rr}}} k_{id_p^{rr}}}, \quad (9)$$

где  $\sum_{\alpha_{id_p^{rp}}} (\sum_{k_{id_p^{rr}}})$  – общее количество идентифицированных жителей (транспортных средств) на  $p$ -ом идентифицированном участке пути.

Сформулируем *балансовое условие наблюдаемости потоков*: мощность множества идентифицированного пешеходного (транспортного) потока между корреспондирующими районами численно равна величине пешеходного (транспортного) потока между соответствующими корреспондирующими районами. Таким образом, балансовое условие наблюдаемости пешеходного и транспортного потоков можно записать соответственно:

$$\left| \rho_H^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} \right| = \rho_H(ID_S; ID_D), \quad (10)$$

$$\left| \rho_{TR}^{ID}(ID_S; ID_D) \Big|_{T = def} \right| = \rho_{TR}(ID_S; ID_D). \quad (11)$$

Выполнение балансового условия наблюдаемости обуславливает работоспособность системы городского транспортно-логистического мониторинга и говорит о том, что весь транспортный поток идентифицирован. Несоблюдение балансового условия наблюдаемости (9) говорит о том, что система транспортно-логистического мониторинга работает не полностью эффективно.

Введем показатель эффективности работы системы транспортно-логистического мониторинга – *коэффициент полезности системы городского транспортно-логистического мониторинга*,  $\eta^{SULTM}$ :

$$\eta^{SULTM} = \frac{\rho_H^{ID}(ID_S; ID_D)}{\rho_H(ID_S; ID_D)} 100 \%. \quad (12)$$

*Коэффициент полезности системы городского транспортно-логистического мониторинга* показывает, какой процент транспортных средств распознает система.

Рассмотрим пример, поясняющий пред-



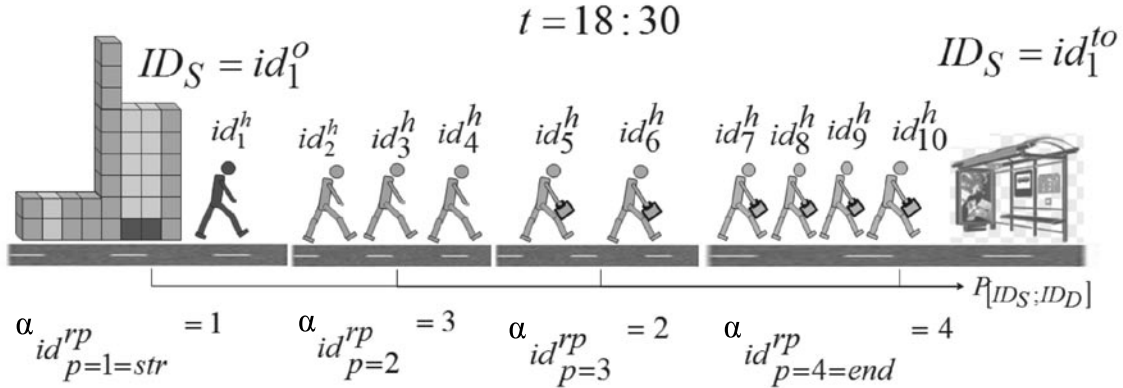


Рис. 4. Идентифицированный пешеходный поток на идентифицированных участках корреспондирующего пути

ставленные выражения.

Пример 2. Городской транспортный процесс в момент времени  $t = 18:30$  представлен на рис. 4. Определите величину пешеходного потока между местом отправления с номером  $id_1^o$  и местом назначения  $id_1^{to}$  на участках корреспондирующего пути  $P(ID_S; ID_D)$ . Проверьте выполнение балансового условия идентификации потока и рассчитайте коэффициент полезного действия системы городского транспортно-логистического мониторинга.

Решение. Расчет пешеходного потока на участках корреспондирующего пути  $P(ID_S; ID_D)$  между местом отправления с номером  $id_1^o$  и местом назначения  $id_1^{to}$  определим из выражения (8):

$$\rho_H^{ID}(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} = \sum_{\alpha_{id^{rp}_{p=1}}}^{\alpha_{id^{rp}_{p=4}}} \left( h_{\sum_{id^{rp}_p}^{\alpha_{id^{rp}_p}}} \right)_{id^{rp}_p} =$$

$$= (id_1^h)_{id^{rp}_1} \cup (id_2^h id_3^h id_4^h)_{id^{rp}_2} \cup$$

$$\cup (id_5^h id_6^h)_{id^{rp}_3} \cup (id_7^h id_8^h id_9^h id_{10}^h)_{id^{rp}_4}.$$

Мощность множества идентифицированного транспортного потока при этом составит:

$$\left| \rho_H^{ID}(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} \right| = 10.$$

Для проверки условия (9), вычислим величину потока согласно (6).

Очевидно, что

$$\rho_H(id_1^o; id_1^{to}) = \sum_{\alpha=1}^{\alpha=10} h_{\alpha}^{id_1^h} = 10 \text{ (чел.)}$$

Таким образом, балансовое условие (9) примет следующий вид:

$$\left| \rho_H^{ID}(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} \right| =$$

$$= \rho_H(id_1^o; id_1^{to}) \Big|_{T=18:30} = 10.$$

Далее рассчитаем коэффициент полезного действия системы городского транспортно-логистического мониторинга, согласно (12):

$$\eta^{SULTM} = \frac{\rho_H^{ID}(ID_S; ID_D)}{\rho_H(ID_S; ID_D)} 100 \% =$$

$$= \frac{10}{10} 100 \% = 100 \%.$$

Выполнение балансового условия наблюдаемости потока позволяет сделать вывод о том, что система транспортно-логистического мониторинга на данном участке городской сети максимально работоспособна.

Опираясь на выведенные процедуры построения цепочек транспортной активности, матриц корреспонденций и анализа структуры транспортного потока, перейдем к моделям прогноза цепочек транспортной активности.

Рассмотрим простую модель прогноза цепочек транспортной активности, опираю-

щуюся на нормальный закон распределе-  
ния [25].

Для построения прогнозной цепочки  
суточной транспортной активности город-  
ского жителя с номером  $id_{\eta}^h$  на прогнозную  
дату  $cta_{pred}$ , необходимо осуществить:

1) сбор данных о транспортной актив-  
ности пользователя с номером  $id_{\eta}^h$  в виде  
его цепочек транспортной активности:

$$CTA_{id_{\eta}^h}^{date} = \{cta_{hid}^{date}; date = 1, \dots, N_{month}\};$$

2) формирование набора цепочек  
транспортной активности в течение меся-  
ца в день недели, соответствующий прог-  
нозному:

$$CTA_{id_{\eta}^h}^{date=date_{pred}} = \{cta_{hid}^{date_{pred}}; date_{pred} = 1, \dots, N_{date_{pred}}^{month}\}; \quad (13)$$

3) подсчет вероятности появления це-  
почек транспортной активности в данный  
день на протяжении месяца:

$$p(cta_i^{id_{\eta}^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = date_{pred}} = \frac{\sum_{d=1}^{d=N_{date_{pred}}^{month}} n_d^{cta_i}}{N_{date_{pred}}^{month}}; \quad (14)$$

выбор наиболее вероятной цепочки транс-  
портной активности:

$$cta_{date_{pred}}^{id_{\eta}^h} = cta_i^{id_{\eta}^h} \left( \max p \times \left( CTA_{id_i^h}^{date}; P_{CTA_{id_i^h}^{date}} \right) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = date_{pred}} \right). \quad (15)$$

Таким образом, *простая модель прогно-  
за цепочек транспортной активности* форм-  
мируется последовательностью действий  
(1–4).

Рассмотрим пример, поясняющий по-

строение простой модели прогнозной це-  
почки транспортной активности городского  
жителя с номером  $id_{\eta}^h$  на прогнозную дату  
 $cta_{pred}$  в соответствии с (13)–(15).

Пример 3. Известно, что система го-  
родского транспортно-логистического  
мониторинга в течение марта 2015 г. за-  
регистровала набор цепочек транспорт-  
ной активности  $CTA_{id_1^h}^{March}$  пользователя с  
номером  $id_1^h$ . Требуется построить це-  
почку транспортной активности на среду  
8 апреля 2015 г. –  $cta_{wedn_{pred}}$ . Данные  
по средам в течение марта имеют вид  
 $CTA_{id_1^h}^{date=Wedn} = \{cta_1; cta_2; cta_3\}$ , представлены в  
таблице и отображены на рис. 5.

Решение. Произведем подсчет веро-  
ятности появления определенных цепочек  
транспортной активности в соответствии с  
(14):

$$p(cta_1^{id_{\eta}^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = w} = \frac{\sum_{d=1}^{d=5} n_d^{cta_1}}{N_d} = \frac{3}{5} = 0,6 \text{ или } 60\%;$$

$$p(cta_2^{id_{\eta}^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = w} = \frac{\sum_{d=1}^{d=5} n_d^{cta_2}}{N_d} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ или } 20\%;$$

$$p(cta_3^{id_{\eta}^h}) \Big|_{T=1 \text{ мес}}^{date = w} = \frac{\sum_{d=1}^{d=5} n_d^{cta_3}}{N_d} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ или } 20\%.$$

Выберем наиболее вероятную цепочку  
транспортной активности, согласно (15):

Данные по транспортной активности пользователя с номером  $id_1^h$  по средам в марте 2015 г.

Date	04.03	11.03	18.03	25.04	01.04	08.04
Цепь транспортной активности	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_2^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_3^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$
$cta_{(03/w/2015-04/w/2015)}^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_2^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$	$cta_3^{id_1^h}$	$cta_1^{id_1^h}$



$$\begin{aligned}
 cta_{pred} &= cta_i \left( \max p \left( CTA_{id_i^h}^{date=Wedn}; P_{CTA_{id_i^h}^{date=Wedn}} \right) \right) = \\
 &= cta_i (\max p((cta_1; 0, 6); (cta_2; 0, 2); \\
 &\quad (cta_3; 0, 2))) = (cta_1; 0, 6) = cta_1^{id_i^h}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, пользователь с номером  $id_i^h$  вероятнее всего будет реализовывать 8 апреля 2015 г. цепочку транспортной активности  $cta_1^{id_i^h}$ .

Рассмотренный пример наглядно разъясняет определение прогнозной цепочки транспортной активности пользователя.

Разработана процедура построения достоверных цепочек транспортной активности городского населения посредством функционала системы городского транспортно-логистического мониторинга, выраженного М-оператором. Сформулирован принцип регулярности транспортной активности городского жителя на основе эмпирических исследований. Описана процедура восстановления матриц достоверных транспортных корреспонденций из цепочек суточной транспортной активности жителей посредством оператора транспортных корреспонденций. Эффективность работы системы городского транспортно-логистического мониторинга предложено оценивать с по-

мощью специально разработанного «коэффициента полезности» и «балансового условия наблюдаемости потоков». Для оценки прогноза транспортной активности жителей разработана простая модель прогноза цепочек транспортной активности.

Предложенная модель обладает рядом достоинств: во-первых, она позволяет оценивать поведение городской транспортной системы на протяжении всего суточного интервала; во-вторых, применима в пакетах имитационного моделирования [26–28]; в-третьих, обладает открытой архитектурой и может быть дополнена разнородными данными; в-четвертых, хорошо согласуется с разработанными ранее в [13] моделью классификации межагентных отношений в ГТС, моделями систем управления ГТС, представленными в [12, 13], логико-алгебраическими моделями систем управления логистикой [22, 23] и интеллектуальными моделями пространственной организации ГТС [29].

Агрегирование представленных выше моделей в программно-аппаратном исполнении с учетом вычислительного аппарата, изложенного в работах [30–32], позволит перейти к построению интеллектуальных распределенных систем управления городскими транспортными потоками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 4(200). С. 57–68.
2. Белый О.В. Проблемы построения и развития транспортных систем: Монография. СПб.: Элмор, 2012. 192 с.
3. Малыгин И.Г. Интеллектуальные системы в городском транспортном комплексе // Экономика качества. 2013. № 3. С. 81–91.
4. Amjad Umar. IT Infrastructure to Enable Next Generation Enterprises // Information Systems Frontiers. 2005. Vol. 7. Iss. 3. Pp. 217–256.
5. Гетманова А.В. Эффективность и перспективы развития CRM-систем в экономике // ФЭН-наука. 2014. № 4 (31). С. 9–11.
6. Бабурин В.А., Яненко М.Б., Яненко М.Е. Маркетинговые технологии инновационного развития в торговом сервисе // ТТПС. 2011. № 16. С. 89–94.
7. Buliung R.N., Kanaroglou P.S. On design and implementation of an object-relational spatial database for activity/travel behaviour research // J. of Geographical Systems. 2004. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 237–262.
8. Fragos S., Stergioulas L.K., Xydeas C.S. Classification of Decision-Behavior Patterns in Multivariate Computer Log Data Using Independent Component Analysis // Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. Lecture Notes in Computer Science. 2003. Vol. 2774. Pp. 73–79.
9. Wiehe S.E., Carroll A.E., Liu G.C., Haberkorn K.L., Hoch Sh.C., Wilson J.S., Fortenberry J.D. Using GPS-enabled cell phones to track the travel patterns of adolescents. 2008. Pp. 1–11.
10. Yan-Tao Zheng, Yiqun Li, Zheng-Jun Zha, Tat-Seng Chua. Mining Travel Patterns from



GPS-Tagged Photos // *Advances in Multimedia Modeling. Lecture Notes in Computer Science*. 2011. Vol. 6523. Pp. 262–272.

11. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А., Стариченков А.Л. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2015. Т. 1. С. 29–36.

12. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Методы и модели построения матриц транспортных корреспонденций // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 2-3 (217-222). С. 49–70.

13. Селиверстов Я.А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса // *Науковедение*. 2014. № 5. С. 188.

14. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Формальная аксиоматика теории функционального субъективного потребительского поведения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. 2014. № 4 (199). С. 34–48.

15. Селиверстов Я.А. Основы теории субъективных функциональных возможностей рационального выбора // *Науковедение*. 2014. № 4. С. 90.

16. Селиверстов Я.А., Стариченков А.Л. Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2014. № 6 (210). С. 81–94.

17. Martínez-López F.G., Gázquez-Abad J.C., Sousa C.M.P., Lengler J. The Internet as a Context for the Generation and Dissemination of the Future's Transnational/Global Culture: A Cultural Constructivist-Based Analysis // *Cultural Perspectives in a Global Marketplace Developments in Marketing Science: Proceedings of the Academy of Marketing Science*. 2016. Pp. 36–42.

18. Селиверстов Я.А. Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2013. № 1. С. 43–50.

19. Lohse D. *Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice*. Dresden: Technical University of Dresden, 2004. Pp. 1–15.

20. Wang D., Sun B. Detecting Activity Types and Trip Purposes from Passive GPS Data: A Data

Mining Approach // *Space-Time Integration in Geography and GIScience*. 2015, Pp. 211–234.

21. Nie X., Xiong Z., Liu C., Yuan X., Bai Y. A New Method on Vehicle Behavior Analysis of Intelligent Transportation Monitoring // *LISS 2014*. 2015. Pp. 741–746.

22. Jun Wu, Chengsheng Jiang, Houston D., Baker D., Delfino R. Automated time activity classification based on global positioning system (GPS) tracking data // *Environmental Health*. 2011. Pp. 1–13.

23. Habib Khandker M.N., Miller Eric J. Modeling daily activity program generation considering within-day and day-to-day dynamics in activity-travel behavior // *Transportation*. 2008. Vol. 35. Iss. 4. Pp. 467–484.

24. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения // *Науковедение*. 2014. № 3 (22). С. 122.

25. Таранцев А.А. Случайные величины и работа с ними: Учеб.-метод. пособие. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: ИД «Петрополис», 2011. 160 с.

26. Yeboah G., Alvanides S., Thompson E.M. *Computational Approaches for Urban Environments*. Springer International Publishing. Chapter 8. Pp. 185–210.

27. Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А. Применение метода имитационного моделирования для оценки эффективности новых видов городского пассажирского транспорта // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. № 3 (31). С. 83–92.

28. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. № 2 (30). С. 69–80.

29. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О построении интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2015. № 2-3 (217–222). С. 139–161.

30. Селиверстов С.А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. СПб.:

ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2014. № 2 (24). С. 92–100.

31. Селиверстов Я.А. Использование правила резолюций в вопросно-ответной процедуре транспортного планировщика // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. СПб.:

ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. № 1 (20). С. 145–152.

32. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А. О методе оценки эффективности организации процесса дорожного движения мегаполиса // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 2 (50). С. 91–96.

#### REFERENCES

1. Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A. O logiko-algebraicheskom predstavlenii transportno-logisticheskogo protsesssa [About logical-algebraic description of the transport logistic process]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2014, No. 4(200), Pp. 57–68. (rus)

2. Belyi O.V. *Problemy postroyeniya i razvitiya transportnykh system* [Problems of construction and development of transport systems]. St. Petersburg: Elmor Publ., 2012, 192 p. (rus)

3. Malygin I.G. Intellektualnyye sistemy v gorodskom transportnom komplekse [Intelligent systems in the urban transport sector]. *Ekonomika kachestva* [Economics of quality], 2013, No. 3, Pp. 81–91. (rus)

4. Amjad Umar. IT Infrastructure to Enable Next Generation Enterprises. *Information Systems Frontiers*, 2005, Vol. 7, Iss. 3, Pp. 217–256.

5. Getmanova A.V. Effektivnost i perspektivy razvitiya CRM-sistem v ekonomike [Effectiveness and prospects for the development of CRM-systems in the economy]. *FoN-nauka*, 2014, No. 4 (31), Pp. 9–11. (rus)

6. Baburin V.A., Yanenko M.B., Yanenko M.Ye. Marketingovyye tekhnologii innovatsionnogo razvitiya v torgovom servise [Marketing technology innovation development in the commercial service]. *TTPS*, 2011, No. 16, Pp. 89–94. (rus)

7. Buliung R.N., Kanaroglou P.S. On design and implementation of an object-relational spatial database for activity/travel behaviour research. *Journal of Geographical Systems*, 2004, Vol. 6, Iss. 3, Pp. 237–262.

8. Fragos S., Stergioulas L.K., Xydeas C.S. Classification of Decision-Behavior Patterns in Multivariate Computer Log Data Using Independent Component Analysis. *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. Lecture Notes in Computer Science*, 2003, Vol. 2774, Pp. 73–79.

9. Wiehe S.E., Carroll A.E., Liu G.C., Haberkorn K.L., Hoch Sh.C., Wilson J.S., Fortenberry J.D. *Using GPS-enabled cell phones to track the travel patterns of adolescents*, 2008, Pp. 1–11.

10. Yan-Tao Zheng, Yiqun Li, Zheng-Jun Zha,

Tat-Seng Chua. Mining Travel Patterns from GPS-Tagged Photos. *Advances in Multimedia Modeling. Lecture Notes in Computer Science*, 2011, Vol. 6523, Pp. 262–272.

11. Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A., Starichenkov A.L. Osobennosti postroyeniya sistemy gorodskogo transportno-logisticheskogo monitoringa [Features of construction of urban transport and logistics monitoring]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2015, No. 1, Pp. 29–36. (rus)

12. Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A. Metody i modeli postroyeniya matrits transportnykh korrespondentsiy [Methods and models of the construction of transport correspondence matrix]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2015, No. 2-3 (217-222), Pp. 49–70. (rus)

13. Seliverstov Ya.A. O postroyenii modeli klassifikatsii mezhagentykh otnosheniy sotsialno-ekonomicheskogo povedeniya gorodskogo naseleniya v sistemakh upravleniya transportnymi potokami megapolisa [On the construction of classification models mezhagentykh relations of social and economic behavior of the urban population in traffic management systems metropolis]. *Naukovedeniye* [Internet magazine Naukovedenie], 2014, No. 5, P. 188. (rus)

14. Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A. Formalnaya aksiomatika teorii funktsionalnogo subyektivnogo potrebitelskogo povedeniya [Formal axiomatic of subjective «functional» theory of consumer]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskiye nauki* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics]. St. Petersburg, 2014, No. 4(199), Pp. 34–48. (rus)

15. Seliverstov Ya.A. Osnovy teorii subyektivnykh funktsionalnykh vozmozhnostey ratsionalnogo vybora [Fundamentals of the theory of subjective functionality of rational choice]. *Naukovedeniye* [Internet magazine Naukovedenie], 2014, No. 4, P. 90. (rus)

16. Seliverstov Ya.A., Starichenkov A.L. Postroyeniye modeley upravleniya gorodskimi transportnymi potokami v usloviyakh neopredelennosti vneshney informatsionnoy sredy

[Construction of an Urban Traffic Control Model Under the Conditions of Information Uncertainty]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2014, No. 6 (210), Pp. 81–94. (rus)

17. **Martínez-López F.G., Gázquez-Abad J.C., Sousa C.M.P., Lengler J.** The Internet as a Context for the Generation and Dissemination of the Future's Transnational/Global Culture: A Cultural Constructivist-Based Analysis. *Cultural Perspectives in a Global Marketplace Developments in Marketing Science: Proceedings of the Academy of Marketing Science*, 2016, Pp. 36–42.

18. **Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye protsessov raspredeleniya i razvitiya transportnykh potokov v megapolisakh [Modelling of processes of distribution and development of traffic in big cities]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2013, No. 1, Pp. 43–49. (rus)

19. **Lohse D.** *Travel Demand Modelling with Model EVA – Simultaneous Model for Trip Generation, Trip Distribution and Mode Choice*. Dresden: Technical University of Dresden, 2004, Pp. 1–15.

20. **Wang D., Sun B.** Detecting Activity Types and Trip Purposes from Passive GPS Data: A Data Mining Approach. *Space-Time Integration in Geography and GIScience*, 2015, Pp. 211–234.

21. **Nie X., Xiong Z., Liu C., Yuan X., Bai Y.** A New Method on Vehicle Behavior Analysis of Intelligent Transportation Monitoring. *LISS 2014*, 2015, Pp. 741–746.

22. **Jun Wu, Chengsheng Jiang, Douglas Houston, Dean Baker, Ralph Delfino.** Automated time activity classification based on global positioning system (GPS) tracking data. *Environmental Health*, 2011, Pp. 1–13.

23. **Khandker M.N. Habib, Eric J. Miller.** Modeling daily activity program generation considering within-day and day-to-day dynamics in activity-travel behavior. *Transportation*. 2008, Vol. 35, Iss. 4, Pp. 467–484.

24. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Osnovy teorii beskonfliktного nepreryvnogo transportnogo protsessa dvizheniya [Fundamentals of the theory of continuous conflict-free movement of the transport process]. *Naukovedeniye [Internet magazine Naukovedenie]*, 2014, No. 3, P. 122. (rus)

25. **Tarantsev A.A.** *Sluchaynyye velichiny i rabota s nimi [Random variables and work with them]*. St. Petersburg: Petropolis Publ., 2011, 160 p. (rus)

26. **Yeboah G., Alvanides S., Thompson E.M.** *Computational Approaches for Urban Environments*. Springer International Publishing, Chapter 8,

Pp. 185–210.

27. **Seliverstov Ya.A., Seliverstov S.A.** Prime-neniye metoda imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki effektivnosti novykh vidov gorodskogo passazhirskogo transporta [Application of the simulation to evaluate the effectiveness of new types of urban passenger transport]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2015, No. 3(31), Pp. 83–92. (rus)

28. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** Modelirovaniye transportnykh potokov megapolisa s vvodom novykh vidov vodnogo vnutrigorodskogo passazhirskogo transporta [Simulation of traffic metropolis with the introduction of new types of water intercity passenger transport]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2015, No. 2(30), Pp. 69–80. (rus)

29. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** O postroyenii intellektualnoy sistemy organizatsii i razvitiya transportnoy sistemy megapolisa [Construction of Intelligent System for the Organization and Development of Transport System Metropolis]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control]. St. Petersburg, 2015, No. 2-3 (217–222), Pp. 139–161. (rus)

30. **Seliverstov S.A.** Metody i algoritmy intellektualnogo analiza protsessa organizatsii transportnoy sistemy [Methods and algorithms for intellectual analysis of the organization of the transport system]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2014, No. 2(24), Pp. 92–100. (rus)

31. **Seliverstov Ya.A.** Ispolzovaniye pravila rezolyutsiy v voprosno-otvetnoy protsedure transportnogo planirovshchika [Using the rule of resolutions in question-answer procedure transport planner]. *Vestnik GUMRF imeni admirala S.O. Makarova [Bulletin GUMRF named after Admiral Makarov]*. St. Petersburg: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova Publ., 2013, No. 1(20), Pp. 145–152. (rus)

32. **Seliverstov S.A., Seliverstov Ya.A.** O metode otsenki effektivnosti organizatsii protsessa dorozhnogo dvizheniya megapolisa [A method of evaluating the effectiveness of the organization of traffic metropolis]. *Vestnik transporta Povolzhya [The Bulletin of Volga region transportation]*, 2015, No. 2 (50), Pp. 91–96. (rus)

**СЕЛИВЕРСТОВ Ярослав Александрович** – научный сотрудник *Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН.*

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13.

E-mail: maxwell\_8-8@mail.ru

**SELIVERSTOV Yaroslav A. IPT RAS.**

199178, 12th line of Vasilievsky Island, 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: maxwell\_8-8@mail.ru

**СЕЛИВЕРСТОВ Святослав Александрович** – научный сотрудник *Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко РАН.*

199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13.

E-mail: amuanator@rambler.ru

**SELIVERSTOV Sviatoslav A. IPT RAS.**

199178, 12th line of Vasilievsky Island, 13, St. Petersburg, Russia.

E-mail: amuanator@rambler.ru





DOI: 10.5862/JCSTCS.224.10

УДК 62-501.72: 62-501.5

*Т.Н. Буштрук, М.В. Царыгин, Д.С. Кленюшин***КОМПЬЮТЕРНЫЙ ОБУЧАЮЩИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПЕРСОНАЛА  
ПРЕДПРИЯТИЙ ВАГОННОГО ХОЗЯЙСТВА С МОДУЛЕМ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ***T.N. Bushtruk, M.V. Tsarygin, D.S. Klenjushin***A TRAINING COMPUTER COMPLEX FOR THE STAFF  
OF RAILCAR DEPOT ENTERPRISES WITH IDENTIFICATION  
AND TIME SERIES FORECASTING MODULE**

Компьютерный обучающий комплекс предназначен для технического и управленческого персонала предприятий инфраструктуры вагонного хозяйства. В комплексе обеспечено интерактивное взаимодействие с исследуемыми объектами. В программный комплекс встраивается модуль идентификации временных рядов производственных процессов.

Представлены метод и алгоритм идентификации модели формирующего фильтра квазистационарных временных процессов. Получены соотношения, обеспечивающие решение задачи идентификации формирующего фильтра. Полученные модели временных рядов используются в системах управления и построении прогнозов. Адаптация измерительно-вычислительной системы идентификации обуславливает достоверность оценок прогноза. Процедуры идентификации и прогнозирования обеспечивают принятие обоснованных управленческих решений по оптимальному формированию сырьевых и технических ресурсов.

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ОБУЧАЮЩИЙ КОМПЛЕКС; ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ; КОРРЕЛЯЦИОННО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР; ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ; СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ; ПРОГНОЗИРОВАНИЕ.**

A training computer complex has been designed for the technical and management staff of a railcar depot. Interactive use of the studied objects is implemented for the complex. A module of time series identification is integrated in the program complex.

We have described a method and an algorithm for identifying time process models and time series prediction algorithms. The expression obtained gives the solution of the formed filter identification. The obtained time series models are used in the control and forecasting systems. Adaptation of the measuring and computing identification system ensures the accuracy of the forecasting assessments. Management decisions for using the material and technical resources will thus be optimal.

**TRAINING COMPUTER COMPLEX; TIME SERIES; CORRELATIVE-SPECTRAL ANALYZER; IDENTIFICATION OF TIME PROCESSES; CONTROL SYSTEM; FORECAST.**

Современный уровень развития транспорта предъявляет высокие требования к квалификации обслуживающего персонала для безопасности пассажирских и грузовых перевозок. Железнодорожный транспорт – важнейшая отрасль экономики, и его удовлетворительное эксплуатационное состояние обеспечивает непрерывность грузоперевозок и пассажиропотоков. Один из решающих аспектов обеспечения своевре-

менного, качественного и технологичного ремонта – эффективная подготовка и переподготовка персонала. Применение современных технологий в процессе подготовки и переподготовки кадров соответствует концепции развития ОАО «РЖД».

Применение компьютерных обучающих комплексов является сложившейся общемировой практикой, поскольку использование в процессе обучения реального оборуду-

дования не всегда доступно. Программные комплексы обеспечивают концентрацию больших объемов информации, позволяют более углубленно изучать отдельные объекты, узлы, устройства и процессы производства, взаимодействовать с ними и получать практические навыки по эксплуатации технологического оборудования. В программном обеспечении реализованы интерактивное взаимодействие с информационными объектами, максимальная визуализация исследуемых объектов, использованы оригинальные метод и алгоритм идентификации временных рядов [3, 4].

### Компьютерный обучающий комплекс

Моделирование (имитация) технологического процесса, производственных си-

туаций окажет существенную помощь при изучении персоналом технологии осмотра вагонов. Поэтому разработка программных комплексов для целей дистанционного обучения и приобретения тренинговых навыков является актуальной.

В программный комплекс-тренажер включены все блоки, позиции, устройства и процедуры, соответствующие технологической карте осмотра вагонов, утвержденной ОАО «РЖД».

На рис. 1 показаны технологический алгоритм реализации комплекса, алгоритм функционирования программных модулей, модуль идентификации временных рядов с корреляционно-спектральным анализатором, модуль для инженерного персонала, обучающий программный комплекс техни-

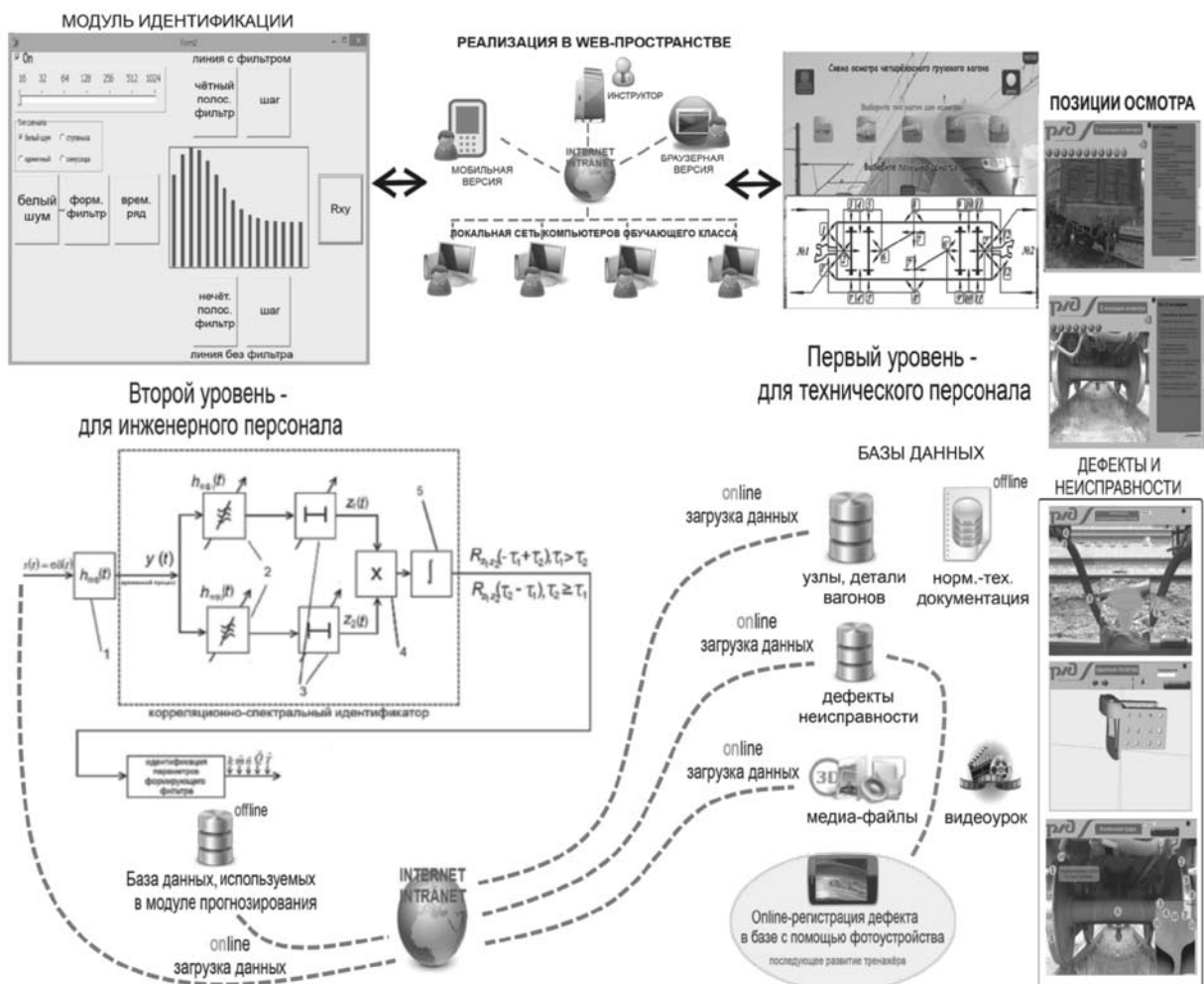


Рис. 1. Взаимодействие и содержание модулей компьютерного обучающего комплекса

ческого персонала, блок с базами данных, блок загрузки данных через сеть Интернет, Интранет, база мультимедийных данных, база неисправностей и дефектов, база узлов и деталей, блок нормативно-технической документации.

Создание библиотеки-базы данных неисправностей вагонов, возникающих при эксплуатации, позволяет их использовать в процессе обучения. Обработка временных последовательностей производственных процессов методами идентификации и использование процедур прогнозирования обеспечат формирование правильных управленческих решений по использованию материальных и технических ресурсов.

Программный комплекс может применяться для обучения эксплуатационного и ремонтного персонала, технологов ОАО «РЖД». Обучающий программный комплекс является платформой для апробации аппарата идентификации квазистационарных временных рядов.

#### Уравнения идентификации моделей квазистационарного временного процесса

Процедура идентификации временно-го ряда основана на вычислении взаимных корреляционных функций [2, 3] для равных по продолжительности участков временного процесса. Основной элемент измерительно-вычислительной системы – четные полосовые фильтры. По мере поступления реализации временного процесса выделяются участки, на которых идентифицируемый процесс является квазистационарным. Идентификация временного ряда сводится к идентификации структуры и параметров формирующего фильтра. В выражения для взаимных корреляционных функций входят модули и фазовые характеристики комплексных передаточных функций формирующего фильтра. Исследование полученных зависимостей дает решение задачи идентификации.

Согласно [5] временной процесс формируется линейным фильтром при подаче на вход сигнала типа белый шум. Предполагается, что временной процесс является квазистационарным на рассматриваемом участке, при этом масштабные коэффици-

енты и постоянные времени меняются незначительно.

Задание исследуемых участков математически можно представить в виде

$$y(t; \Delta t_1) = \int_0^{\infty} h(\mu_1; \Delta t_1) x(t - \mu_1) d\mu_1, \quad y(t; \Delta t_2) = \int_0^{\infty} h(\mu_2; \Delta t_2) x(t - \mu_2) d\mu_2, \quad \dots, \quad y(t; \Delta t_f) = \int_0^{\infty} h(\mu_f; \Delta t_f) x(t - \mu_f) d\mu_f,$$

где  $h(\mu_i; \Delta t_i)$  – импульсная переходная характеристика квазистационарного линейного формирующего фильтра;  $x(t) = \sigma \delta(t)$  – белый шум с неизвестным весом  $\sigma$ ,  $\delta(t)$  – дельта-функция;  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ ,  $i = 1, f$ . Согласно постановке задачи  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \dots = \Delta t_f$ .

Обратное преобразование Лапласа от импульсной переходной функции линейного формирующего фильтра есть дробно-рациональная передаточная функция (ПФ) вида:

$$W_{\text{пф}}^{(i)}(S) = k^{(i)} \frac{\prod_{q=1}^{m^{(i)}} (Q_q^{(i)} S + 1)}{\prod_{q=1}^{n^{(i)}} (T_q^{(i)} S + 1)},$$

где  $k^{(i)}$ ,  $Q_q^{(i)}$  и  $T_q^{(i)}$  – соответственно масштабные коэффициенты и постоянные времени формирующего фильтра, которые являются кусочно-непрерывными функциями времени (на квазистационарном участке эти функции не изменяются),  $m^{(i)}$ ,  $n^{(i)}$  – порядки полиномов числителя и знаменателя ПФ.

Задача идентификации модели квазистационарного временного процесса состоит в определении оценок  $\hat{\sigma}$ ,  $\hat{k}^{(i)}$ ,  $\hat{m}^{(i)}$ ,  $\hat{n}^{(i)}$ ,  $\hat{Q}_q^{(i)}$  и  $\hat{T}_q^{(i)}$  в ПФ формирующего фильтра на квазистационарных участках  $\Delta t_i$ .

Структурная схема измерительно-вычислительной системы с корреляционно-спектральным идентификатором и блоком построения прогноза дана на рис. 2.

В состав измерительно-вычислительной системы входят корреляционно-спектральный анализатор (идентификатор) с

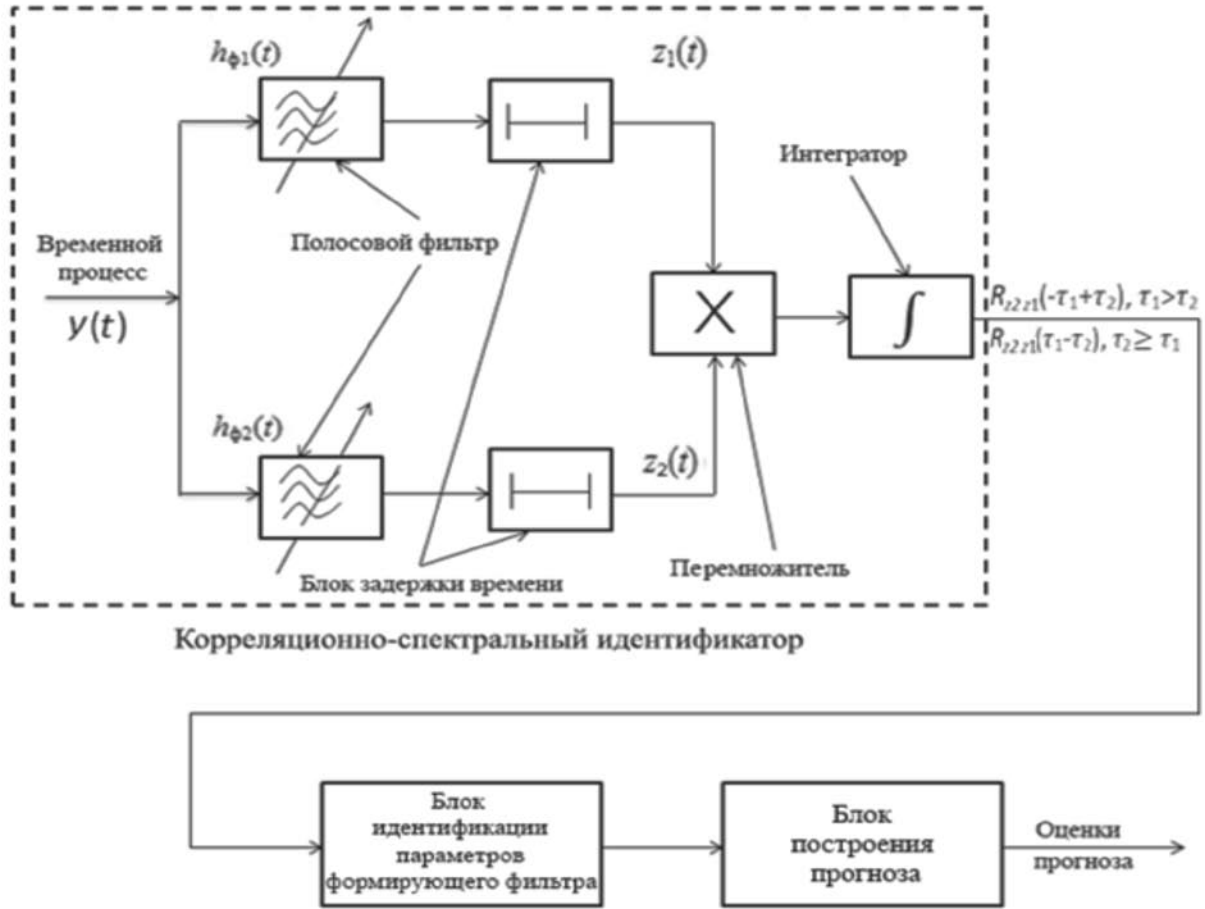


Рис. 2. Корреляционно-спектральный идентификатор с блоком прогнозирования

четными полосовыми фильтрами –  $h_{\Phi i}(t)$ , блоки задержки времени, перемножитель, интегратор, блок идентификации параметров формирующего фильтра, блок формирования оценок прогноза.

Для проведения дальнейших выкладок используются сигналы  $y(t)$ ,  $z_1(t - \tau_1; \Delta t_\gamma)$  и  $z_2(t - \tau_2; \Delta t_q)$ , выражения для которых имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta)x(t - \theta) d\theta, \\
 z_1(t - \tau_1; \Delta t_\gamma) &= \\
 &= \int_0^\infty h_{\Phi 1}(\mu_\gamma)y(t - \tau_1 - \mu_\gamma; \Delta t_\gamma) d\mu_\gamma, \\
 z_2(t - \tau_2; \Delta t_q) &= \\
 &= \int_0^\infty h_{\Phi 2}(\mu_q)y(t - \tau_2 - \mu_q; \Delta t_q) d\mu_q,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\gamma, q \in \overline{1, f}$ ,  $h_{\Phi\Phi}(\cdot)$  – импульсная переходная характеристика формирующего фильтра,  $h_{\Phi 1}(\cdot)$  и  $h_{\Phi 2}(\cdot)$  – импульсные переходные характеристики полосовых фильтров в корреляционно-спектральном анализаторе.

Получение алгоритмов процедуры корреляционно-спектральной идентификации формирующего фильтра основано на вычислении следующих корреляционных функций:

$$\begin{aligned}
 R_{z_2 z_1}(\tau_2 - \tau_1) &= \frac{1}{t_0 - (\tau_2 - \tau_1)} \times \\
 &\times \int_0^{t_0 - (\tau_2 - \tau_1)} z_2(t - \tau_2; \Delta t_\alpha) z_1(t - \tau_1; \Delta t_\beta) dt, \\
 &\tau_2 \geq \tau_1, \\
 R_{z_2 z_1}(-\tau_1 + \tau_2) &= \frac{1}{t_0 - (\tau_1 - \tau_2)} \times
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\times \int_0^{t_0 - (\tau_1 - \tau_2)} z_1(t - \tau_1; \Delta t_c) z_2(t - \tau_2; \Delta t_d) dt, \quad (2)$$

$$\tau_1 > \tau_2,$$

где  $\alpha, \beta, c, d \in \overline{1, f}$ .

Уравнения (2) справедливы для случая, когда  $t_{\text{пп}} \ll \Delta t_i$ , где  $i = \overline{1, f}$ ,  $t_{\text{пп}}$  — время переходного процесса полосового фильтра. Также необходимо, чтобы  $t_0 - (\tau_2 - \tau_1) \leq \Delta t_i$ ,  $\tau_2 \geq \tau_1$ ;  $t_0 - (\tau_1 - \tau_2) < \Delta t_i$ ,  $\tau_1 > \tau_2$  и  $i = \overline{1, f}$ .

Подставим в уравнения (2) выражения для сигналов  $y(t)$ ,  $z_1(t - \tau_1; \Delta t_\gamma)$ ,  $z_2(t - \tau_2; \Delta t_q)$  (1) и получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) &= \int_0^\infty \dots \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_\alpha) h_{\Phi\Phi}(\theta_2; \Delta t_\beta) \times \\ &\times h_{\Phi_2}(\mu_\alpha) h_{\Phi_1}(\mu_\beta) R_{xx}(\tau_2 - \tau_1 + \theta_2 - \theta_1 + \\ &+ \mu_\alpha - \mu_\beta) d\mu_\alpha d\mu_\beta d\theta_1 d\theta_2, \\ R_{Z_2 Z_1}\{-(\tau_1 - \tau_2)\} &= \int_0^\infty \dots \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_c) \times \\ &\times h_{\Phi\Phi}(\theta_2; \Delta t_d) h_{\Phi_2}(\mu_c) h_{\Phi_1}(\mu_d) R_{xx}\{-(\tau_1 - \tau_2) + \\ &+ \theta_1 - \theta_2 + \mu_c - \mu_d\} d\mu_c d\mu_d d\theta_1 d\theta_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R_{xx}(\tau) = \sigma^2 \delta(\tau)$  — автокорреляционная функция белого шума с неизвестной  $\sigma^2$ . Порядки интегрирования интегральных уравнений (2) изменялись, поскольку  $\int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(t) dt \neq \infty$ ,  $\int_0^\infty h_{\Phi_1}(t) dt \neq \infty$  и  $\int_0^\infty h_{\Phi_2}(t) dt \neq \infty$ .

Структура и параметры четного полосового фильтра в корреляционно-спектральном анализаторе должны быть выбраны такими, чтобы его импульсная переходная характеристика имела вид:

$$h_{\Phi_i}(t) = k_{\Phi_i} \{\exp(-|t|/T_i) \cos \omega_0^{(i)} t\} / T_i,$$

где  $\omega_0^{(i)}$  — центральные частоты настройки фильтров,  $k_{\Phi_i}$  — масштабные коэффициенты,  $T_i$  — постоянные времени. Предел  $\lim h_{\Phi_i}(t)$  при  $T_i \rightarrow \infty$  и  $k_{\Phi_i}/T_i = 1$  равен  $\cos \omega_0^{(i)} t$  при  $i = 1, 2$ . Предельные значения для  $h_{\Phi_i}(t)$  подставляем в (3). Получаемые при этом интегралы вычисляются на основе фильтрующего свойства дельта-функций:

$$R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_\alpha) \times \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\times h_{\Phi\Phi}(\theta_2; \Delta t_\beta) h_{\Phi_1}(\mu_\beta) \cos(\omega_0^{(2)}(-\tau_2 - \tau_1 + \theta_2 - \\ &- \theta_1 - \mu_\beta)) d\mu_\beta d\theta_1 d\theta_2, \\ R_{Z_2 Z_1}\{-(\tau_1 - \tau_2)\} &= \sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_c) \times \\ &\times h_{\Phi\Phi}(\theta_2; \Delta t_d) h_{\Phi_1}(\mu_d) \cos(\omega_0^{(1)}(-\tau_1 + \tau_2 + \theta_1 - \\ &- \theta_2 + \mu_c)) d\mu_c d\theta_1 d\theta_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку  $h_{\Phi\Phi}(t)$ ,  $h_{\Phi_1}(t)$  и  $h_{\Phi_2}(t)$  — симметричные функции на квазистационарных участках, то для преобразования (4) используем теорему Бореля о свертке:

$$\begin{aligned} R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) &= \sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_\alpha) h_{\Phi_1}(\mu_\beta) \times \\ &\times d\theta_1 d\mu_\beta \int_{-\infty}^\infty e^{j\omega(\tau_1 - \tau_2 + \theta_1 + \mu_\beta)} K_{\Phi\Phi}^{(\beta)}(\omega) e^{-j\Psi_{\Phi\Phi}^{(\beta)}(\omega)} \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega_0^{(2)}) + \frac{1}{2} \delta(\omega + \omega_0^{(2)}) \right\} d\omega, \\ R_{Z_2 Z_1}\{-(\tau_1 - \tau_2)\} &= \sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_c) \times \\ &\times h_{\Phi_1}(\mu_c) d\theta_1 d\mu_c \int_{-\infty}^\infty e^{j\omega(\tau_1 - \tau_2 + \theta_1 + \mu_d)} K_{\Phi\Phi}^{(c)}(\omega) \times \\ &\times e^{-j\Psi_{\Phi\Phi}^{(c)}(\omega)} \left\{ \frac{1}{2} \delta(\omega - \omega_0^{(1)}) + \frac{1}{2} \delta(\omega + \omega_0^{(1)}) \right\} d\omega, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $K_{\Phi\Phi}^{(\beta)}(\omega)$ ,  $K_{\Phi\Phi}^{(c)}(\omega)$ ,  $\Psi_{\Phi\Phi}^{(\beta)}(\omega)$ ,  $\Psi_{\Phi\Phi}^{(c)}(\omega)$  — модули и фазы комплексных коэффициентов передачи формирующего фильтра для временных участков  $\beta$  и  $c$  соответственно.

Интегралы, входящие в (5), вычисляются на основе фильтрующего свойства дельта-функций и свойства эрмитовой симметрии для формирующего фильтра. Затем к интегралам по  $\mu_\alpha$  и  $\mu_d$  также применяется теорема Бореля о свертке. После преобразований имеем:

$$\begin{aligned} R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) &= \sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_\alpha) h_{\Phi_1}(\mu_\beta) \times \\ &\times d\theta_1 d\mu_\beta K_{\Phi\Phi}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)}) \cos(\omega_0^{(2)}(\tau_1 - \tau_2 + \theta_1 + \\ &+ \mu_\beta + \Psi_{\Phi\Phi}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)}) / \omega_0^{(2)})), \\ R_{Z_2 Z_1}\{-(\tau_1 - \tau_2)\} &= \sigma^2 \int_0^\infty \int_0^\infty h_{\Phi\Phi}(\theta_1; \Delta t_c) \times \\ &+ h_{\Phi_1}(\mu_c) d\theta_1 d\mu_c K_{\Phi\Phi}^{(c)}(\omega_0^{(1)}) \cos(\omega_0^{(1)}(\tau_1 - \tau_2 + \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ \theta_1 + \mu_c + \Psi_{\text{фф}}^{(c)}(\omega_0^{(1)} / \omega_0^{(1)})). \quad (6)$$

Для преобразования (6) также используем теорему Бореля о свертке:

$$R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \sigma^2 K_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)}) K_{\text{фф}}^{(\alpha)}(\omega_0^{(2)}) \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_0^{(1)} \mu_\beta) \cos(\omega_0^{(2)}(\tau_2 - \tau_1 - \mu_\beta - \\ - \Psi_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)} / \omega_0^{(2)})) d\mu_\beta, \\ R_{Z_2 Z_1}(-(\tau_1 - \tau_2)) = \sigma^2 K_{\text{фф}}^{(d)}(\omega_0^{(1)}) K_{\text{фф}}^{(c)}(\omega_0^{(1)}) \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \cos(\omega_0^{(1)} \mu_d) \cos(\omega_0^{(1)}(\tau_2 - \tau_1 + \mu_c - \\ - \Psi_{\text{фф}}^{(d)}(\omega_0^{(1)} / \omega_0^{(2)})) d\mu_c.$$

Последние интегральные уравнения вычисляются на основе теоремы Бореля о свертке:

$$R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \sigma^2 K_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)}) K_{\text{фф}}^{(\alpha)}(\omega_0^{(2)}) \times \\ \times \cos\{\omega_0^{(1)}((\tau_2 - \tau_1) + \Psi_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0^{(2)} / \omega_0^{(2)} - \\ - \Psi_{\text{фф}}^{(\alpha)}(\omega_0^{(2)} / \omega_0^{(2)}))\}; \quad (7) \\ R_{Z_2 Z_1}(-\tau_1 + \tau_2) = \sigma^2 K_{\text{фф}}^{(d)}(\omega_0^{(1)}) K_{\text{фф}}^{(c)}(\omega_0^{(1)}) \times \\ \times \cos\{\omega_0^{(2)}((-\tau_1 + \tau_2) - \Psi_{\text{фф}}^{(d)}(\omega_0^{(1)} / \omega_0^{(1)} + \\ + \Psi_{\text{фф}}^{(c)}(\omega_0^{(1)} / \omega_0^{(1)}))\}.$$

При выводе формул (7) учитывалось свойство эрмитовой симметрии для  $\delta$ -функций от частотных аргументов.

В случае равенства частот  $\omega_0^{(2)} = \omega_0^{(1)} = \omega_0$  имеем:

$$R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \sigma^2 K_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0) K_{\text{фф}}^{(\alpha)}(\omega_0) \times \\ \times \cos\{\omega_0(\tau_2 - \tau_1) + \Psi_{\text{фф}}^{(\beta)}(\omega_0) - \Psi_{\text{фф}}^{(\alpha)}(\omega_0)\}; \quad (8) \\ R_{Z_2 Z_1}(-\tau_1 + \tau_2) = \sigma^2 K_{\text{фф}}^{(d)}(\omega_0) K_{\text{фф}}^{(c)}(\omega_0) \times \\ \times \cos\{\omega_0(-\tau_1 + \tau_2) - \Psi_{\text{фф}}^{(d)}(\omega_0) + \Psi_{\text{фф}}^{(c)}(\omega_0)\}.$$

Таким образом, получены выражения для взаимных корреляционных функций [2, 3], в которые входят модули комплексных передаточных функций и фазовые характеристики формирующего фильтра.

### Алгоритм идентификации параметров модели формирующего фильтра

Ниже приведен алгоритм идентифи-

кации параметров [1–4] модели формирующего фильтра квазистационарных временных процессов. Для максимального быстродействия устройства идентификации проведем анализ участков временного процесса, для которых  $\alpha = \beta \pm 1$ ,  $c = d \pm 1$ . Эти условия соответствуют близлежащим отрезкам временного процесса. Для первого участка имеем:

$$R_{Z_2 Z_1}(-\tau_1 + \tau_2) = R_{Z_2 Z_1}(\tau_2 - \tau_1) = \\ = \sigma^2 \{K_{\text{фф}}^{(1)}(\omega_0)\}^2 \cos(\omega_0(\tau_2 - \tau_1)). \quad (9)$$

На основе (9) определяем следующие характеристики и параметры.

1. Статическая характеристика [1, 2] находится по следующему алгоритму:

$$\{b_{\text{ст}}^{(1)}\}^2 = \max_{\omega_0} R_{Z_2 Z_1} \{\pm(\tau_2 - \tau_1)\} = (k_{\text{фф}}^{(1)})^2 \sigma^2 \quad (10)$$

при  $\omega_0(\tau_2 - \tau_1) = \pm 2p\pi$ , где  $p = \overline{0, \infty}$ ,  $k_{\text{фф}}^{(1)}$  – масштабные коэффициенты,  $i = \overline{1, f}$ .

Идентификация квазистационарного временного процесса проводится в классе блочно-ориентированных моделей [2]. Эти модели относятся к нелинейным моделям, и вследствие этого избирательные свойства нелинейного корреляционно-спектрального анализатора должны увеличиваться при меньших значениях добротностей полосовых фильтров по сравнению с линейным случаем. Интервалы времени  $\Delta t_i$ , где  $i = \overline{1, f}$ , на которых осуществляется обработка сигналов, уменьшаются. Значение  $(k_{\text{фф}}^{(1)} \sigma)^2$  можно выбрать достаточно произвольно. Из этого выбранного значения  $\max_{\omega_0} R_{Z_2 Z_1} = [k_{\text{фф}}^{(1)} \sigma]^2$  извлекаем квадратный корень и определяем значение  $(k_{\text{фф}}^{(1)} \sigma)$ , которое является статической характеристикой  $b_{\text{ст}}^{(1)}$ . Аналогично определяются статические характеристики [2, 4] и на других отрезках времени  $\Delta t_i$ , где  $i = \overline{1, f}$ .

2. Частотные функции для первого участка, частотные функции для второго участка, взаимная частотная функция между первым и вторым участками и т. д. квазистационарного временного процесса определяются соотношениями:

$$\max_{(\tau_2 - \tau_1)} R_{Z_2 Z_1} \{\pm(\tau_2 - \tau_1)\} = \sigma^2 \{K_{\text{фф}}^{(1)}(\omega_0)\}^2, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \max_{(\tau_2 - \tau_1)} R_{Z_2 Z_1} \{\pm(\tau_2 - \tau_1)\} = \\ = (K_{\text{фф}}^{(1)}(\omega_0) K_{\text{фф}}^{(2)}(\omega_0)) \sigma^2, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\max_{(\tau_2 - \tau_1)} R_{Z_2 Z_1} \{\pm(\tau_2 - \tau_1)\} = \sigma^2 \{K_{\text{фф}}^{(2)}(\omega_0)\}^2.$$

От функций (7) и (8) строятся знаковые функции при сдвигах 0 и  $\pi/2$ :

$$\text{sign}[R_{z_2 z_1}^{(0)}(\omega_0, \tau)], \text{sign}[R_{z_2 z_1}^{(\pi/2)}(\omega_0, \tau)].$$

От функций (7), (8) и (11) строятся логарифмические функции и разницы между логарифмическими функциями для исследуемых участков [2]:

$$\widehat{L}_k^{(0)} = \widehat{L}_k^{(0)}(\omega_0, \pm\tau), \quad \widehat{L}_k^{(\pi/2)} = L_k^{(\pi/2)}(\omega_0, \pm\tau),$$

где  $k \div \overline{1, n}$ ,  $\widehat{L}_k^{(\cdot)} = 20 \lg |R_{z_2 z_1}(\omega_0, \tau)|$ .

Все эти функции являются частотно-временными критериями [2], по которым можно определить структуру модели для формирующего фильтра. Аналогичные частотно-временные критерии приведены в работах [1–3].

В общем случае корреляционно-спектральный идентификатор может быть представлен блочно-ориентированной моделью, в которую входит перемножитель. Наличие нелинейного элемента обеспечивает улучшение избирательности корреляционно-спектрального анализатора при меньших значениях добротностей полосовых фильтров [4].

В результате проведения процедур идентификации в общем случае для системы с постоянными сосредоточенными параметрами можно перейти к дискретной передаточной функции эквивалентной импульсной системы

$$\begin{aligned} K_*(z) &= \frac{A_0 + A_1 z + \dots + A_{l-1} z^{l-1} + A_l z^l}{1 + B_1 z + \dots + B_{m-1} z^{m-1} + B_m z^m} = \\ &= \frac{\sum_{k=0}^l A_k z^k}{1 + \sum_{k=1}^m B_k z^k}. \end{aligned}$$

## Построение прогноза

Известны подходы к прогнозированию [5], основанные на представлении временного ряда в виде бесконечной взвешенной суммы текущего и предшествующих импульсов как бесконечной взвешенной суммы предыдущих наблюдений плюс случайный импульс и представлении модели процесса в виде разностного уравнения. Наиболее предпочтительным является представление модели процесса (формирующего фильтра) в виде разностного уравнения.

Выражение для получения прогнозных значений временного ряда при наличии адекватной модели формирующего фильтра в общем имеет вид

$$y[n+l] = \sum_{i=0}^{n+l} h(i)x(n-i).$$

Для получения прогноза нужно выразить полученную модель процесса в виде разностного уравнения. Процедура получения значений прогноза  $\hat{y}_t(l)$  приведена в [5]. Достоверность полученных прогнозных значений временного ряда обеспечивается адаптацией измерительно-вычислительной системы идентификации.

Функциональность компьютерного обучающего комплекса существенно повышается за счет включения в структуру комплекса модуля идентификации временных рядов по производственным потокам. Данные обрабатываются методами идентификации [2–4] с целью получения моделей временного ряда для дальнейшего использования их в системах управления и прогнозах. Блок идентификации и прогнозирования обеспечит принятие обоснованных управленческих решений по оптимальному формированию сырьевых и технических ресурсов. Эти модули могут быть использованы при проведении тренинговых мероприятий с персоналом управленческого звена.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буштрук А.Д., Буштрук Т.Н. Структурная идентификация нелинейных динамических объектов в режиме пассивного эксперимента // Автоматика и телемеханика. 2001. № 8. С. 61–67.
2. Буштрук Т.Н., Буштрук А.Д. Методы идентификации объектов и процессов. Самара: СамГАПС, 2005. 150 с.
3. Буштрук А.Д., Буштрук Т.Н. Корреляционно-спектральный метод идентификации квазистационарных временных процессов // Автоматика и телемеханика. 2005. № 2. С. 46–54.
4. Буштрук А.Д., Буштрук Т.Н., Фазлыев И.И. Корреляционно-спектральный метод идентификации квазистационарных временных процессов с разрешением противоречия между точностью и быстродействием // Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 147–158.
5. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Пер. с англ. М.: Мир, 1974. Вып. 1.

### REFERENCES

1. Bushtruk A.D., Bushtruk T.N. Strukturnaya identifikatsiya nelineynykh dinamicheskikh obyektov v rezhime passivnogo eksperimenta [Structural identification of nonlinear dynamic objects in a passive mode, the experiment]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and telemechanics], 2001, No. 8, Pp. 61–67. (rus)
2. Bushtruk T.N., Bushtruk A.D. *Metody identifikatsii obyektov i protsessov* [Methods of identification of objects and processes], Samara: SamGAPS Publ., 2005, 150 p. (rus)
3. Bushtruk A.D., Bushtruk T.N. Korrelyatsionno-spektralnyy metod identifikatsii kvazistatsionarnykh vremennykh protsessov [Correlation-spectral identification method for quasi-stationary time processes]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and telemechanics], 2005, No. 2, Pp. 46–54. (rus)
4. Bushtruk A.D., Bushtruk T.N., Fazlyyev I.I. Korrelyatsionno-spektralnyy metod identifikatsii kvazistatsionarnykh vremennykh protsessov s razresheniyem protivorechiya mezhdru tochnostyu i bystrodeystviyem [Correlation-spectral identification method for quasi-stationary time processes with a resolution of the contradiction between accuracy and speed]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and telemechanics], 2011, No. 7, Pp. 147–158. (rus)
5. Boks Dzh., Dzenkins G. *Analiz vremennykh ryadov. Prognoz i upravleniye* [Time series analysis. Forecast and Control], Moscow: Mir Publ., 1974, Vol. 1. (rus)

---

**БУШТРУК Татьяна Николаевна** – доцент кафедры электротехники Самарского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.  
443066, Россия, г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18.  
E-mail: btnsam@mail.ru

**BUSHTRUK Tatyana N.** Samara State Transport University.  
443066, 1st Bezymjannyi lane, 18, Samara, Russia.  
E-mail: btnsam@mail.ru

**ЦАРЫГИН Максим Вячеславович** – аспирант кафедры электротехники Самарского государственного университета путей сообщения.  
443066, Россия, г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18.  
E-mail: max\_crazy@mail.ru

**TSARYGIN Maksim V.** Samara State Transport University.  
443066, 1st Bezymjannyi lane, 18, Samara, Russia.  
E-mail: max\_crazy@mail.ru

**КЛЕНЮШИН Дмитрий Сергеевич** – инженер-технолог эксплуатационного депо дирекции инфраструктуры подвижного состава Приволжской железной дороги.  
413108, Россия, Саратовская область, г. Энгельс-8.  
E-mail: klenyshinds@gmail.com





**KLENJUSHIN Dmitry S** *Privolgskey gelezny doroga.*  
413108, Engels 8, Saratov region, Russia.  
E-mail: klenyshinds@gmail.com

**НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**  
**«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО**  
**ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**  
**ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»**  
**«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.**  
**COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»**

**№ 4 (224) 2015**

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный редактор  
*Е.А. Калинина* – литературный редактор, корректор  
*Г.А. Пышкина* – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: [infocom@spbstu.ru](mailto:infocom@spbstu.ru)

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

---

Подписано в печать 31.08.2015. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 13,48. Тираж 1000. Заказ

---

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Издательство Политехнического университета  
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России  
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

## **УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ**

**в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»**

### **1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикациях представлены в РИНЦ, в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала – 6 номеров в год.

### **2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ**

#### **2.1. Оформление материалов**

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук – 8–15 страниц формата А-4; аспирантов – 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул – в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – **TNR**, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

## 2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

## 2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

**Более подробную информацию можно получить:**

**на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>**

**по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10<sup>00</sup> до 18<sup>00</sup> Галина Александровна**

**или по e-mail: [infocom@spbstu.ru](mailto:infocom@spbstu.ru)**