

ISSN 2078-9181

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

# ТРУДЫ СПИИРАН

[proceedings.spiiras.nw.ru](http://proceedings.spiiras.nw.ru)



ВЫПУСК 3(46)



Санкт-Петербург  
2016

18+

# Труды СПИИРАН

Выпуск № 3(46), 2016

Научный, научно-образовательный, междисциплинарный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации и прикладной математики

Журнал основан в 2002 году

## Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук  
(СПИИРАН)

## Главный редактор

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

## Редакционная коллегия

**А.А. Ашимов**, академик национальной академии наук Республики Казахстан д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан

**С.Н. Баранов**, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Н.П. Веселкин**, академик РАН, д-р мед. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.И. Городецкий**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**О.Ю. Гусихин**, Ph.D., Диаборн, США

**В. Делич**, д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия

**А.Б. Долгий**, Dr. Habil., проф., Сент-Этьен, Франция

**М. Железны**, Ph.D., доцент, Пльзень, Чешская республика

**Д.А. Иванов**, д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия

**И.А. Каляев**, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Таганрог, РФ

**Г.А. Леонов**, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**К.П. Марков**, Ph.D., доцент, Аизу, Япония

**Ю.А. Меркурьев**, академик Латвийской академии наук, Dr. Habil., проф., Рига, Латвия

**Р.В. Мещеряков**, д-р техн. наук, профессор, Томск, РФ

**Н.А. Молдовян**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.Е. Павловский**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва, РФ

**А.А. Петровский**, д-р техн. наук, проф., Минск, Беларусь

**В.А. Путилов**, д-р техн. наук, проф., Апатиты, РФ

**В.Х. Пшихопов**, д-р техн. наук, профессор, Таганрог, РФ

**А.Л. Ронжин** (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**А.И. Рудской**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В. Сгурев**, академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария

**В.А. Скормин**, Ph.D., проф., Бингемптон, США

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

**Б.Я. Советов**, академик РАО, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.А. Сойфер**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

**Б.В. Соколов**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Л.В. Уткин**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**А.Л. Фрадков**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Н.В. Хованов**, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Л.Б. Шереметов**, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

**А.В. Язенин**, д-р техн. наук, профессор, Тверь, РФ

## Адрес редакции

191718, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,

e-mail: [publ@iias.spb.su](mailto:publ@iias.spb.su), сайт: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Подписано к печати 01.06.2016. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 15,25. Заказ № 246. Тираж 150 экз., цена свободная

Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,

свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.

Подписной индекс 29393 по каталогу «Почта России»

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

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2015

Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН»

# SPIIRAS Proceedings

Issue № 3(46), 2016

Scientific, educational, and interdisciplinary journal primarily specialized  
in computer science, automation, and applied mathematics

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

---

## Founder and Publisher

Federal State Budget Institution of Science

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences  
(SPIIRAS)

---

## Editor-in-Chief

R.M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

---

## Editorial Board Members

**A.A. Ashimov**, Prof., Dr. Sci., Academician  
of the National Academy of Sciences of the  
Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan  
**S.N. Baranov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**N.P. Veselkin**, Prof., Dr. Sci., Academician of RAS,  
St. Petersburg, Russia  
**V.I. Gorodetski**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**O.Yu. Gusikhin**, Ph. D., Dearborn, USA  
**V. Delic**, Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia  
**A. Dolgui**, Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France  
**M. Zelezny**, Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech  
Republic  
**I.A. Kalyaev**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,  
Taganrog, Russia  
**D.A. Ivanov**, Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany  
**G.A. Leonov**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,  
St. Petersburg, Russia  
**K.P. Markov**, Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan  
**Yu.A. Merkurjev**, Prof., Dr. Habil., Academician  
of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia  
**R.V. Meshcheryakov**, Prof., Dr. Sci., Tomsk, Russia  
**N.A. Moldovian**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**V.E. Pavlovskiy**, Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia  
**A.A. Petrovsky**, Prof., Dr. Sci., Minsk, Belarus

**V.A. Putilov**, Prof., Dr. Sci., Apatity, Russia  
**V.K. Pshikhopov**, Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia  
**A.L. Ronzhin** (Deputy Editor-in-Chief),  
Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**A.I. Rudskoi**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,  
St. Petersburg, Russia  
**V. Sgurev**, Prof., Dr. Sci., Academician  
of the Bulgarian academy of sciences, Sofia,  
Bulgaria  
**V. Skormin**, Prof., Ph.D., Binghamton, USA  
**A.V. Smirnov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**B.Ya. Sovetov**, Prof., Dr. Sci., Academician of RAE,  
St. Petersburg, Russia  
**V.A. Soyfer**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS,  
Samara, Russia  
**B.V. Sokolov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**L.V. Utkin**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**A.L. Fradkov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**N.V. Hovanov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg,  
Russia  
**L.B. Sheremetov**, Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico,  
Mexico  
**A.V. Yazenin**, Prof., Dr. Sci. Tver, Russia

---

## Editorial Board's address

14-th line VO, 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,

e-mail: [publ@iias.spb.su](mailto:publ@iias.spb.su), web: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Signed to print 01.06.2016

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

---

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications and Mass-Media Supervision,  
certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 r.

Subscription Index 29393, Russian Post Catalog

© Federal State Budget Institution of Science

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 2015

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### ***Методы управления и обработки информации***

С.В. Кулешов, Р.М. Юсупов СОФТВЕРИЗАЦИЯ — ПУТЬ К ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЮ?	5
А.А. Крещук, В.В. Зяблов, В.Г. Потапов СИГНАЛЬНО-КОДОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ МОЩНЫХ ПОЛОСОВЫХ ПОМЕХ	14
О.К. Альсова АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА ПЕРИОДА-АНАЛОГА	27
А.С. Вершинин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ МАКЕТА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОДЕМА	40
А.Д. Хомоненко, Д.Ю. Старобинец, В.А. Лохвицкий МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	49
С.В. Васьков, А.Н. Жуков, А.Ю. Коваленко АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ НАВИГАЦИОННО-БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ	65
Р.Ю. Будко, И.Б. Старченко СОЗДАНИЕ КЛАССИФИКАТОРА МИМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМИОГРАММЫ	76

### ***Информационная безопасность***

А.А. Проноза, А.А. Чечулин, И.В. Котенко МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В SIEM-СИСТЕМАХ	90
А.В. Бурделев, В.Г. Никонов, И.И. Лапиков РАСПОЗНАВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, РЕАЛИЗОВАННОГО ПОРОГОВОЙ К-ЗНАЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ	108
А.Р. Биричевский УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОБИЛЬНАЯ ОПЕРАЦИОННАЯ СИСТЕМА С ПОДСИСТЕМАМИ АУТЕНТИФИКАЦИИ И ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПСЕВДОВЕРОЯТНОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	128

### ***Средства вычислительной техники и систем управления***

Р.Б. Трегубов, Ю.Г. Алексиков, С.И. Саитов ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МНОГОУРОВНЕВЫХ МАРШРУТИЗИРУЮЩИХ СИСТЕМ В ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОМ БАЗИСЕ	139
А.И. Мотиенко, А.Г. Тарасов, И.В. Дорожко, О.О. Басов ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ СПАСЕНИЯ ПОСТРАДАВШИХ	169
Д.Н. Халиуллина ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОДДЕРЖКИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ МАЛЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	190

### ***Теоретическая и прикладная математика***

В.А. Гончаренко КОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ АППРОКСИМАЦИОННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ ФУНКЦИЕЙ	212
А.М. Жукова НАВИГАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ПЛОСКОГО ШАРНИРНОГО МНОГУГОЛЬНИКА	226

## CONTENTS

### *Methods of Information Processing and Management*

S.V. Kuleshov, R.M. Yusupov IS THE SOFTWARIZATION A WAY TO IMPORT SUBSTITUTION?	5
A.A. Kreshchuk, V.V. Zyablov, V.G. Potapov SIGNAL CODE CONSTRUCTIONS FOR CHANNELS WITH POWERFUL WIDEBAND INTERFERENCE	14
O.C. Alsova AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR HYDROLOGICAL TIME SERIES FORECASTING BASED ON THE SELECTION OF AN ANALOGUE-PERIOD	27
A.S. Vershinin EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE DATA TRANSFER RATE OF A HYDROACOUSTIC MODEM MODEL	40
A.D. Khomonenko, D.Yu. Starobinets, V.A. Lokvitskii A MODEL OF ESTIMATING QUICKNESS OF FUNCTIONING OF ONBOARD CONTROL SYSTEMS OF SPACECRAFT REMOTE SENSING OF THE EARTH	49
S.V. Vaskov, A.N. Zhukov, A.Y. Kovalenko CURRENT PROBLEMS OF USING PRECISION EPHEMERIS AND TIME DATA IN TECHNOLOGICAL CYCLES OF NAVIGATION-BALLISTIC SUPPORT OF SPACE SYSTEMS	65
R.Yu. Budko, I.B. Starchenko CREATION OF THE FACIAL GESTURES CLASSIFIER BASED ON THE ELECTROMYOGRAM ANALYSIS	76

### *Information Security*

A.A. Pronoza, A.A. Chechulin, I.V. Kotenko MATHEMATICAL MODELS OF VISUALIZATION IN SIEM SYSTEMS	90
A.V. Burdeljov, V.G. Nikonov, I.I. Lapikov RECOGNIZING PARAMETERS OF THE INFORMATION SECURITY UNIT IMPLEMENTED BY THE THRESHOLD K-VALUED FUNCTION	108
A.R. Birichevskij UNIVERSAL MOBILE OPERATING SYSTEM INCLUDING SUBSYSTEMS OF AUTHENTICATION AND DATA PROTECTION BASED ON THE PSEUDO-PROBABILITY TRANSFORMATION	128

### *Means of Computer Facilities and Control Systems*

R.B. Tregubov, Yu.G. Aleksikov, S.I. Saitov REPRESENTATION OF THE HIERARCHICAL MULTILAYER ROUTING SYSTEMS IN A SET-THEORETIC BASE	139
A.I. Motienko, A.G. Tarasov, I.V. Dorozhko, O.O. Basov PROACTIVE CONTROL OF ROBOTIC SYSTEMS FOR RESCUE OPERATIONS	169
D.N. Khaliullina A PROBLEM-ORIENTED PROGRAM COMPLEX TO SUPPORT STRATEGIC PLANNING OF DEVELOPMENT OF SMALL INNOVATIVE ENTERPRISES	190

### *Theoretical and Applied Mathematics*

V.A. Goncharenko COMPOSITE METHOD OF FORMING APPROXIMATING DISTRIBUTIONS WITH AN ARBITRARY PHASE FUNCTION	212
A.M. Zhukova NAVIGATION ALGORITHM FOR A PLANAR POLYGONAL LINKAGE	226

## С.В. КУЛЕШОВ, Р.М. ЮСУПОВ СОФТВЕРИЗАЦИЯ — ПУТЬ К ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЮ?

---

*Кулешов С.В., Юсупов Р.М. Софтверизация — путь к импортозамещению?*

**Аннотация.** В статье рассматривается процесс софтверизации — превращение в программу всего, что может быть лишено физической оболочки или физического воплощения. Рассматриваются подходы к реализации этого процесса. Предлагается подход к импортозамещению аппаратного обеспечения на основе развития программно-определяемых систем.

**Ключевые слова:** софтверизация, контент, программно-определяемая система.

*Kuleshov S.V., Yusupov R.M. Is Softwarization the Way to Import Substitution?*

**Abstract.** The paper discusses the phenomenon of softwarization — the transformation of everything that can be deprived of its physical embodiment into a software form. The approaches to realization of this process and its application to import substitution of hardware based on the software-defined systems development are considered.

**Keywords:** softwarization; content; software-defined system.

---

В последние десятилетия наблюдается интенсивное проникновение новых технологий в нашу жизнь. Расширение области применения новых информационных технологий в обществе вызывает необходимость их включения в парадигму исследований практически всех отраслей науки. Современная политическая и экономическая ситуация в нашей стране и в мире требует сокращения доли импортозамещающих технологий и изделий на отечественном рынке высокотехнологичных продуктов.

Обычно под компонентами импортозамещения понимаются аппаратное и программное обеспечение, а также инжиниринг [1]. Кроме этого импортозамещение охватывает и другие составляющие жизненного цикла изделия: поддержка, сопровождение, внедрение, обучение персонала. К сожалению, у большинства отечественных предприятий уже выстроены системы, работающие на импортных компонентах и программных платформах, и внести в них что-то отечественное очень сложно.

Сегодня ситуация на рынке высоких технологий такова, что при наличии значительного потенциала в индустрии разработки программного обеспечения имеется отставание в технологиях производства элементной базы аппаратного обеспечения в сравнении с зарубежными производителями. Это наиболее заметно в сегменте массового производства аппаратного обеспечения.

Альтернативным путем к импортозамещению при сложившемся отставании российской элементной базы от передовых западных производителей становится глобальная софтверизация.

Под софтверизацией (от англ. software — программное обеспечение) понимается превращение в программу всего, что может быть лишено физической оболочки или физического воплощения [2]. Наряду с компьютеризацией этот процесс находит применение во все новых и новых областях [3]. Одним из векторов развития в рамках софтверизации является замещение труднореализуемых аппаратных компонентов на программные функциональные аналоги, менее ресурсоемкие при своей разработке, но не уступающие по эффективности. Предлагаемая методология заключается в смещении акцентов разработки высокотехнологических аппаратных решений в область программной реализации требуемых функций. При этом получаемый результат оказывается доступнее по стоимости, чем их «железные» аналоги.

Такое смещение в сторону программируемых технологий в нашей стране оправдано еще и наличием огромного нереализованного потенциала в этой области, который подтверждается ставшими регулярными победами представителей Санкт-Петербурга на чемпионатах мира по программированию среди студентов. Но в то же время Россия продолжает импортировать дорогостоящие производственные линии и технологии производства микроэлектроники [4].

Явление софтверизации уже широко распространено во многих сферах деятельности. Ярким примером процесса софтверизации служит эволюция устройства iPod: изначально его корпус оснащался крутящимся колесом, затем оно стало нарисованным — движущиеся части исчезли, а звук вращения имитировался из динамика; потом осталась только метафора колеса и наконец устройство превратилось в иконку iPod (в новых моделях iPhone это программа «Музыка») [2].

В социальной сфере софтверизация проявляется через осуществление привычных действий путем взаимодействия с приложением или онлайн-сервисом на телефоне, планшете, компьютере. Например, отправка бумажного письма заменилась сообщением в электронной почте или SMS, а покупка компакт-диска с музыкой — получением доступа к музыкальному альбому через iTunes. Некоторые обиходные предметы также были заменены программами и приложениями — у многих исчезли калькуляторы, часы, плееры как отдельные устройства — они все стали приложениями на смартфоне.

Люди все чаще сталкиваются с плодами софтверизации, часто даже не осознавая этого. Чтобы купить билет в театр или на поезд уже не нужно ехать в билетную кассу и менять там бумажные деньги на бумажные билеты. Достаточно несколько нажатий на сайте онлайн-продажи билетов, и ваши электронные деньги становятся вашим электронным билетом. Теперь вместо предъявления бумажного билета

контролеру, достаточно поднести QR-код, синтезируемый на экране смартфона, к турникету и пройти. В технологическом плане произошло уменьшение суммы на вашем банковском счете, увеличение суммы на счете компании, продавшей билет, а также резервирование за Вами места. Для человека такой переход — это всего лишь исключение «лишних» этапов на пути достижения требуемой цели: посещения театра или поездки на транспорте.

Важная тенденция рынка интерактивной связи — повышение доступности соответствующих сервисов через экспансию относительно недорогих программных решений, которая идет в нескольких направлениях. Одно из них — распространение разнообразных программных клиентов видео-конференц-связи, в том числе для смартфонов и планшетов. Повышение производительности персональных компьютеров и мобильных устройств позволяет превратить их в полноценные видеотерминалы с поддержкой видео высокого разрешения [5].

В технических системах софтверизация как явление проявляется в форме программно-определяемых систем. На сегодняшний момент известен целый ряд программно-определяемых технологий: программно-определяемое радио, программно-определяемые центры обработки данных, программно-определяемые системы хранения данных, программно-определяемое производство и т.д.

В телекоммуникационной сфере софтверизацию можно осуществить путем виртуализации каналов доставки контента. В традиционных каналах использовались ориентированные на конкретный тип контента каналы, имеющие специализированное оконечное коммуникационное оборудование (телефон для передачи голоса, телеграф для передачи текстовых сообщений и т.п.), что наглядно показано на рисунке 1.

Использование принципа софтверизации при доставке контента позволяет преобразовать передаваемые данные в универсальную форму, которая может быть передана через универсальную инфокоммуникационную среду (рисунок 2). Совокупность преобразователей из контентно-ориентированной формы (изображения, звук) в универсальную (транспортно-ориентированную) и обратно, а также физической составляющей коммуникационной среды можно считать универсальными виртуальными каналами [6]. Функции оконечных (терминальных) абонентских устройств в этом случае выполняют универсальные мобильные устройства (компьютеры, смартфоны) — преобразование и отображение контента реализовано в них программно.



Рис. 1. Процесс передачи данных в традиционной телекоммуникационной системе



Рис. 2. Универсальная инфокоммуникационная среда

Использование программно-определяемых систем в области телекоммуникации позволяет в режиме реального времени изменять форматы передачи данных, диапазоны частот, типы модуляции, топологии сетей радиоустройств, что, в свою очередь, обеспечивает воз-

возможность динамически строить сети передачи данных из устройств общего назначения путем их временного реконфигурирования для передачи данных специального назначения между передатчиком и приемником, не находящимися в пределах радио-видимости. Перечисленные особенности позволяют говорить о появлении новой виртуальной сущности — программно-определяемого канала передачи данных [7].

Главным достоинством программно-определяемого канала передачи данных является возможность гибкой адаптации к радиообмену с различными унаследованными системами без модернизации оборудования, а также потенциально большое количество одновременно поддерживаемых протоколов локационных, навигационных и коммуникационных систем, что особенно актуально при использовании оборудования в различных географических зонах.

Дополнительным результатом является повышение эффективности использования радиоресурса и повышение электромагнитной совместимости путем использования незадействованной пропускной способности используемых в данный момент времени цифровых каналов между имеющимися устройствами общего назначения без введения новых передатчиков. Также это обеспечивает повышение надежности резервирования системы в целом.

Программно-определяемые каналы передачи данных позволяют экономить на инфраструктуре специализированных каналов (физической транспортной составляющей) путем программной реализации требуемых свойств, реализованных на базе имеющихся каналов, а также гибкого управления свойствами таких каналов.

Подобный подход проявляется и в более «серьезных» приложениях. Еще несколько лет назад в аэронавигации использовалась система радионавигации, состоящая из сети радиопередатчиков (VOR — всенаправленных азимутальных радиомаяков), размещенных равномерно по территории страны, и соответствующего бортового оборудования — антенны, навигационного приемника и указателей. В России подобная сеть так до конца и не сформировалась, но сама технология уже успела устареть морально и технологически. В результате она была вытеснена программными решениями, использующими данные GPS/ГЛОНАСС-приемников и имитирующими, в том числе работу сети радиомаяков и курсоглиссадных систем. В результате удалось улучшить функционал, «экономив» на очень дорогостоящей инфраструктуре, но зачастую жертвуя надежностью.

Дальнейшее развитие софтверизации может охватить область материального производства путем применения аддитивных технологий и 3D-принтеров. При этом модель и вся технология производства материального объекта загружается в виде программы в 3D-принтер и распечатывается при необходимости, а не приобретает как готовое

изделие. В принципе, такой подход решает не только проблемы с ограниченностью производственных мощностей и их технологическими недостатками, но и проблемы логистики и последующего обслуживания, так как готовое изделие (или его составные части производятся прямо на месте их потребления).

Обратной стороной медали софтверизации является возможное усложнение устройств и некоторое снижение их надежности в некоторых областях техники, традиционно выполнявшейся на специализированной элементной базе (часто аналоговой).

Кроме того, программы, реализующие заданный функционал, все равно требуют наличия процессора — аппаратной платформы для их выполнения. Это в любом случае обуславливает необходимость собственных импортозамещающих разработок и производственных мощностей. Но эти мощности могут быть более эффективно ориентированы не на широкую номенклатуру специализированных устройств, а на универсальный процессор с высокой производительностью.

В любом случае, целенаправленное развитие софтверизации в форме разработки и внедрения программно-определяемых систем должно повысить долю отечественных решений на рынке специальной и потребительской техники и сыграть положительную роль в импортозамещении.

### Литература

1. *Аннушкин С.Л.* Российские разработчики готовы замещать импортное оборудование // Роснаука. URL: <http://rosnauka.ru/publication/1300> (дата обращения: 30.05.2016).
2. *Лебедев А.А.* Софтверизация. URL: <http://www.artlebedev.ru/kovodstvo/sections/184/> (дата обращения: 30.05.2016).
3. *Saariketo M.* Imagining Alternative Agency in Techno-Society: Outlining the Basis of Critical Technology Education (EN) // Media Practice and Everyday Agency in Europe. 2014. pp. 129–138.
4. Юсупов Р.М. Роль информационных технологий в развитии экономики нового общества // Труды международного форума «Неделя науки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета». 2014. № 1. С. 26–33.
5. *Барсков А.* ВКС уже не «остров» // Журнал сетевых решений LAN. № 10. 2013. URL: <http://www.osp.ru/lan/2013/10/13037888/> (дата обращения: 30.05.2016).
6. *Кулешов С.В.* Гибридные коды и их применение в цифровых программируемых каналах передачи данных // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Вып. 10. № 5. С. 41–45
7. *Alexandrov V.V., Kuleshov S.V. and Zaytseva A.A.* Active Data in Digital Software Defined Systems Based on SEMS Structures // Logical Analysis of Data and Knowledge with Uncertainties in SEMS. 2016. pp. 61–69

### References

1. Annushkin S.L. *Rossijskie razrabotchiki gotovy zameshat' importnoe oborudovanie* [Russian developers are ready to replace imported equipment]. Rosnauka. Available at: <http://rosnauka.ru/publication/1300> (accessed: 30.05.2016). (In Russ.).

2. Lebedev A.A. *Softverizacija* [Softwarization]. Available at: <http://www.artlebedev.ru/kovodstvo/sections/184/> (accessed: 30.05.2016). (In Russ.).
3. Saariketo M. Imagining Alternative Agency in Techno-Society: Outlining the Basis of Critical Technology Education (EN). *Media Practice and Everyday Agency in Europe*. 2014. pp 129–138.
4. Yusupov R.M. [The role of information technology in the economic development of the new society]. *Trudy mezhdunarodnogo foruma «Nedelja nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta»* [Proceedings of Week of Science, St. Petersburg State Polytechnic University]. 2014. no. 1. pp. 26–33. (In Russ.).
5. Barskov A. [Videoconferencing is no longer an "island"]. *Zhurnal setevyh reshenij LAN – Journal of network LAN solutions*. vol.10. 2013. Available at: <http://www.osp.ru/lan/2013/10/13037888/> (accessed: 05.30.2016). (In Russ.).
6. Kuleshov S.V. [Hybrid codecs and their use in programmable digital data transmission channels]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy – Information-measuring and operating systems*. 2012. vol. 10. no. 5. pp. 41–45 (In Russ.).
7. Alexandrov V.V., Kuleshov S.V. and Zaytseva A.A. Active Data in Digital Software Defined Systems Based on SEMS Structures. *Logical Analysis of Data and Knowledge with Uncertainties in SEMS*. 2016. pp. 61–69.

**Кулешов Сергей Викторович** — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория автоматизации научных исследований Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: инфологические информационные системы, инфокоммуникационные системы, гибридные кодеки, обработка потоков видеоданных. Число научных публикаций — 70. [kuleshov@iias.spb.su](mailto:kuleshov@iias.spb.su); 14 линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7 812 3235139.

**Kuleshov Sergey Victorovich** — Ph.D., Dr. Sci., leading researcher, laboratory of Research Automation of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: infology information systems, infocommunication systems, hybrid codecs, video data streams processing. The number of publications — 70. [kuleshov@iias.spb.su](mailto:kuleshov@iias.spb.su); 14-th Line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7 812 3235139.

**Юсупов Рафаэль Мидхатович** — д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), президент, НП Национальное общество имитационного моделирования («НОИМ»). Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 390. [spiran@iias.spb.su](mailto:spiran@iias.spb.su); 14 линия, 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7-812-328-3311.

**Yusupov Rafael Midhatovich** — Dr. Sci., professor, Corr. Member of RAS, director, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), president of NP National Simulation Society («NSS»). Research interests: control theory, informatics, theoretic basics of informatization and information society, information security. The number of publications — 390. [spiran@iias.spb.su](mailto:spiran@iias.spb.su); 39, 14-th Line, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7-812-328-3311.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при частичной поддержке бюджетной темы №0073-2014-0005.

**Acknowledgements.** This work was supported by №0073-2014-0005.

## РЕФЕРАТ

### *Кулешов С.В., Юсупов Р.М.* **Софтверизация — путь к импортозамещению?**

Современная политическая и экономическая ситуация в нашей стране и в мире требует сокращения доли импортосодержащих технологий и изделий на отечественном рынке высокотехнологичных продуктов. Сегодня ситуация на рынке высоких технологий такова, что при наличии значительного потенциала в индустрии разработки программного обеспечения имеется отставание в технологиях производства элементной базы аппаратного обеспечения в сравнении с зарубежными производителями. Особенно явно это проявляется в области универсального (пользовательского сегмента) аппаратного обеспечения. Альтернативным путем к импортозамещению при сложившемся отставании российской элементной базы от передовых западных производителей становится глобальная софтверизация. Под софтверизацией понимается превращение в программу всего, что может быть лишено физической оболочки или физического воплощения. В технических системах софтверизация как явление проявляется в форме программно-определяемых систем. Использование принципа софтверизации при доставке контента позволяет преобразовать передаваемые данные в универсальную форму, которая может быть передана по универсальной инфокоммуникационной среде. Программно-определяемые каналы передачи данных позволяют экономить на инфраструктуре специализированных каналов (физической транспортной составляющей) путем программной реализации требуемых свойств, реализованных на базе имеющихся каналов, а также гибкого управления свойствами таких каналов. Целенаправленное развитие софтверизации в форме разработки и внедрения программно-определяемых систем должно повысить долю отечественных решений на рынке специальной и потребительской техники и сыграть положительную роль в импортозамещении.

## SUMMARY

### *Kuleshov S.V., Yusupov R.M.* **Is Softwarization the Way to Import Substitution?**

The current political and economic situation in our country and in the world is demanding minimization of the share of imported technology and products on domestic hi-tech market which is currently has significant potential in the software development field and a significant gap in the hardware element base as compared to foreign manufacturers. As an alternative approach to import substitution under the conditions of the technology gap, global softwarization can be proposed. The process of softwarization is the transformation of everything that can be deprived of its physical embodiment into a software form.

In technical systems, softwarization as a phenomenon manifests in the form of software-defined systems. The use of the softwarization principle in content delivery allows for transformation of transmitted data into the universal form, which can be further delivered through universal infocommunication media.

The software-defined data transmission channels allow economizing on the infrastructure of specialized channels (physical transport components) by software realization of the required features on the basis of existing channels infrastructure, which further permits flexible control of such channels capabilities. The targeted development of softwarization in the form of creation and application of software-defined systems will increase the share of native products on the market of special and consumer technology and will have positive influence on import substitution.

А.А. КРЕЩУК, В.В. ЗЯБЛОВ, В.Г. ПОТАПОВ  
**СИГНАЛЬНО-КОДОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ РАБОТЫ В  
УСЛОВИЯХ МОЩНЫХ ПОЛОСОВЫХ ПОМЕХ**

---

*Крещук А.А., Зяблов В.В., Потапов В.Г. Сигнально-кодовые конструкции для работы в условиях мощных полосовых помех.*

**Аннотация.** Данная работа посвящена вопросам организации передачи в «плохих» каналах, в которых отношение сигнал/шум мало, и присутствует мешающий сигнал, с использованием частотно-позиционного кодирования с быстрой перестройкой частот. В данной работе предложено два новых алгоритма демодуляции, существенно более устойчивый к наличию мощного мешающего сигнала. В результате компьютерного моделирования показано, что предложенный алгоритм демодуляции в условиях сильного мешающего сигнала имеет более высокую корректирующую способность, чем известные ранее.

**Ключевые слова:** ППРЧ, критерий согласия, критерий однородности, частотно-позиционное кодирование, борьба с помехами.

*Kreshchuk A.A., Zyablov V.V., Potapov V.G. Signal Code Constructions for Channels with Powerful Wideband Interference.*

**Abstract.** In this paper, we consider data transmission in “bad” channels with low snr and wideband interference. We propose a code construction based on frequency shift keying with fast frequency hopping. We also propose two new decoders that are more robust in regard to interference compared to the known OSN decoder. The computer simulation has shown that the proposed decoders have higher error correction efficiency than the previously known decoder.

**Keywords:** FFHFSK; Frequency-Shift Keying; Fast Frequency Hopping; Interference.

---

**1. Введение.** В настоящее время большинство работ по теории кодирования и коммуникациям предполагают использование канала с большим отношением сигнал/шум. Тем не менее задача передачи данных в частотно-селективных каналах с низким отношением сигнал/шум актуальна. Примером такого канала может служить канал передачи по линиям передачи электроэнергии [1]. В таком канале коэффициент передачи на некоторых диапазонах частот достигает -40 дБ.

Другим примером передачи в «плохом» канале является надежная передача в лицензируемом диапазоне радиочастот на большие расстояния. На этих частотах могут передавать различные широкополосные излучатели, такие как точки доступа Wi-Fi. Уровень такого мешающего сигнала может превышать 30 дБ относительно полезного сигнала. Эволюция коэффициентов передачи канала может быть приближена моделью COST 207.

В данной работе предложена конструкция для некоторых таких каналов, основанная на частотно-позиционном кодировании с быстрой перестройкой частот. Для ее приема было предложено два новых алгоритма декодирования.

Многие результаты данной работы были ранее опубликованы в работе [2]. В работе [3] была рассмотрена возможность применения продолженного метода приема для систем множественного доступа. В работах [4] и [5] были исследованы каскадные конструкции с декодированием внутренних кодов по решетке, также использующие описанные в данной работе алгоритмы. В работе [6] была предложена аналогичная конструкция, поддерживающая одновременную работу 200 пользователей. Некоторые обобщения этих результатов представлены в работе [7].

Во втором разделе статьи описана используемая модель канала. Затем, в разделе 3 вводится система передачи данных. В разделе 4 приводятся некоторые существующие и два новых алгоритма демодуляции такого сигнала, в том числе новый статистический декодер, основанный на критерии Колмогорова-Смирнова, в подразделе 4.3и новый ранговый декодер в подразделе 4.2. Для оценки корректирующей способности предложенных декодеров проведено численное моделирование. Его результаты представлены в разделе 5.

**2. Модель канала.** В настоящее время существует множество различных моделей распространения сигнала, построенных для различных условий распространения. В общем виде такой канал можно записать в виде:

$$r(t) = \sum_{i=0}^{\tau} h(t,i)s(t-i) + \eta(t), \quad (1)$$

где  $s(t)$  — сигнал, переданный в момент времени  $t$ ,  $r(t)$  — сигнал, полученный в момент времени  $t$ ,  $h(t,i)$  — импульсный отклик канала в момент времени  $t$  и  $\eta(t)$  — белый гауссов шум. Большинство моделей канала можно представить в виде мультипликативного в частотной области канала с белым гауссовым шумом и некоторым законом эволюции. Таким образом, при использовании OFDM модуляции в квазистационарном канале, формулу (1) можно переписать в виде:

$$r_i = h_i s_i + \eta_i, \quad (2)$$

где  $r_i$  —  $i$ -й канал на выходе OFDM приемника,  $s_i$  —  $i$ -й канал на входе OFDM передатчика,  $h_i$  — коэффициенты передачи канала и  $\eta_i$  — белый гауссов шум. В дальнейшем мы будем рассматривать только частотное представление канала.

В данной работе использовался канал, описываемый в модели COST 207. Для различных условий передачи, таких как равнина, холмистая местность или городские условия, и различных скоростей дви-

жения приемника и передатчика построены модели, описывающие эволюцию коэффициентов  $h_t$  во времени.

**3. Сигнально-кодовая конструкция.** Для каналов с малым отношением сигнал/шум достаточно часто используется частотно-позиционное кодирование (англ. frequency shift keying). Пусть у приемника и передатчика есть диапазон частот, в котором выделено  $q$  несущих частот  $F_i$ ,  $i = \overline{1, q}$ . При передаче символа  $i$  в канал передается синусоидальный сигнал с частотой  $F_i$ . Выберем частоты  $F_i$  так, чтобы на интервале передачи одного символа все передаваемые сигналы были ортогональны. Тогда на передатчике и на приемнике мы сможем использовать OFDM модуляцию.

Для увеличения помехозащищенности нередко применяют быструю перестройку частот. При этом приёмнику и передатчику известны перестановки частот  $\pi_t(\vec{x})$ , где  $t$  — номер символа OFDM. Каждый OFDM символ передается несколько раз с разными перестановками частот. Перед демодуляцией сигнал подвергается обратной перестановке  $\pi_t^{-1}(\vec{x})$ . Таким образом, на вход демодулятору подается матрица размера  $q \times T$ , где  $q$  — порядок модуляции, а  $T$  — количество перестановок (прыжков по частотам) на один символ. Во всех описанных ниже алгоритмах элементами матрицы являются энергии отдельных сигналов, то есть абсолютные значения принятых комплексных символов.

В данной работе используется более сложная схема частотно-позиционного кодирования, когда каждый символ кодирует не одну частоту, а некоторую последовательность из  $n$  частот. Эти последовательности мы будем называть *трафаретом*. При этом для каждого OFDM символа используется одна частота из этой последовательности.

Для увеличения скорости передачи мы будем использовать несколько наборов из  $q$  частот. Разные наборы частот при этом будут использоваться для передачи разных информационных символов. Обозначим число таких наборов  $M$ .

Обозначим множество используемых трафаретов  $\mathcal{C}$ . Отдельные трафареты могут быть представлены как в виде последовательности частот  $\vec{c}^i = (c_1^i, \dots, c_T^i)$ , так и в матричной форме  $\mathbf{C}^i$ , где

$$\mathbf{C}_{ij}^a = \begin{cases} 1, & j = c_t^a \\ 0, & j \neq c_t^a \end{cases}.$$

Тогда процедура кодирования будет устроена следующим образом:

$$\vec{R}_{it} = R_{c_t^i t}.$$

Пусть заданы информационные символы  $i_1, \dots, i_M, i_j = \overline{1, |\mathcal{C}|}$ .  
 Запишем кодовое слово в таком виде:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} c_1^{i_1} \\ c_2^{i_2} \\ \vdots \\ c_M^{i_M} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}.$$

К каждому столбцу полученной матрицы применим отдельную перестановку частот  $\pi_t$ .

В качестве множества трафаретов предлагается выбирать слова хорошего линейного кода длины  $T$  над полем  $GF(q^k)$ . В данной работе в качестве такого кода выбран расширенный код Рида-Соломона  $(q + 1, 2, q)_q$ .

**4. Алгоритмы демодуляции.** Многие алгоритмы демодуляции являются развитием демодуляции по максимальной суммарной энергии. Его можно описать следующей формулой:

$$\text{demod}(R) = \max_{i=1, |\mathcal{C}|} \sum_{t=1}^T R_{c_t^i t},$$

где  $R$  — матрица принятого сигнала, первый индекс которой обозначает номер несущей частоты, а второй индекс обозначает номер OFDM символа. Можно представить, что демодулятор прикладывает к полученной матрице поочередно каждый трафарет и суммирует энергию, находящуюся в позициях этого трафарета.

Известно, что для гауссовского канала демодулятор по максимальной суммарной энергии является демодулятором по максимуму правдоподобия. К сожалению, в канале с замираниями его корректирующая способность становится хуже на несколько дБ. При наличии мощного мешающего сигнала его использование становится весьма нерациональным. В случае простого частотно-позиционного кодирования существует несколько модификаций данного алгоритма, позволяющих частично решить эти проблемы. Многие из них описаны в [8]. Ниже мы опишем одну из них. Для применения их к используемой в данной работе сигнально-кодовой конструкции необходимо вместо принятой матрицы  $R$  использовать матрицу  $\tilde{R}$ , определенную следующим образом:

$$\tilde{R}_{it} = R_{c_t^i t}.$$

**4.1 Декодер OSN.** Алгоритм работы декодера Order Statistics-Normalized Envelope Detection Based Diversity Combining [8] (OSN) можно схематично описать следующим образом:

1. Отсортируем каждую строку матрицы  $\tilde{R}$  по возрастанию энергии.
2. Отнормируем каждый столбец полученной матрицы, то есть разделим каждый элемент столбца на сумму всех элементов столбца.
3. Применим к полученной матрице демодуляцию по максимуму суммарной энергии.

Данный алгоритм неплохо работает для каналов с замираниями, но при наличии мощного мешающего сигнала он проигрывает предложенным алгоритмам.

**4.2 Ранговый критерий.** Для снижения вероятности ошибки при наличии мощного мешающего сигнала мы решили отказаться от использования самого значения энергии принятого сигнала, ограничившись лишь номером каждого символа в вариационном ряду, построенном по матрице  $R$ . Уход от использования значений энергии позволяет повысить устойчивость к мешающему сигналу.

Введем следующее обозначение:

$$Y_{it} = |\{(l,m): R_{it} > R_{lm}\}|.$$

Тогда решение, принимаемое ранговым декодером, можно записать как:

$$\max_{i=1,|\mathcal{C}|} \sum_{t=1}^T Y_{c_{it}}.$$

**4.3 Статистический демодулятор, основанный на критерии Колмогорова-Смирнова.** Пусть есть некоторый статистический критерий неоднородности выборок  $x$  и  $y$ , имеющий метрику  $K(x,y)$ , то есть чем больше  $K(x,y)$ , тем с большим уровнем допустимости можно сказать, что  $x$  и  $y$  имеют разное распределение вероятности.

Основная идея алгоритма демодуляции заключается в том, что демодулятор вычисляет  $K_i = K(\tilde{R}_i, R)$ , где  $\tilde{R}_i$  —  $i$ -ая строка матрицы  $\tilde{R}$ . Благодаря наличию псевдослучайных перестановок распределение шума и помех не может зависеть от выбора строки матрицы  $\tilde{R}$ , в то время как полезный сигнал полностью присутствует лишь в одной из ее строк. Таким образом, в правильной строке (для переданного траффарета) различие в распределениях будет максимальным. Поэтому выходом демодулятора является число  $\max_i K_i$ .

В качестве критерия однородности мы предлагаем использовать критерий Колмогорова-Смирнова. В терминах эмпирических функций

распределения критерий Колмогорова-Смирнова представлен следующей метрикой:

$$K(R,i) = \max_x |F_i(x) - F(x)|, \quad (3)$$

где  $F_i(x)$  — эмпирическая функция распределения  $i$ -й строки матрицы  $\tilde{R}$ , а  $F(x)$  — эмпирическая функция распределения всей матрицы  $R$ .

Такая формулировка критерия Колмогорова-Смирнова удобна для понимания, но для непосредственного вычисления удобнее переписать этот критерий в терминах рангов. Для этого введем матрицу  $\tilde{Y}$ ,  $i$ -я строка которой содержит элементы  $Y_{c_{it}}$ , упорядоченные по возрастанию.

Так как функции  $F_i(x)$  и  $F(x)$  являются ступенчатыми, достаточно проверить значение метрики (3) в точках  $R_{it}$ . По определению,  $Y_{it} = F(R_{it}) \cdot T \cdot q$ . Максимум  $K(R,i)$  достигается только в точках  $R_{it} - 0$  и  $R_{it} + 0$ . Таким образом, перепишем выражение (3) в виде:

$$K(R_i, R) = \max_t \max(qt - \tilde{Y}_{it}, (\tilde{Y}_{it} - 1) - q(t - 1)). \quad (4)$$

**5. Результаты моделирования.** Для оценки вероятности ошибки в среде MATLAB™ была написана программа, позволяющая проводить моделирование для выбранной модели канала, алгоритма демодуляции и типа помехи. Было предложено две сигнально-кодовые конструкции: помехозащищенная и более простая. Параметры более простой сигнально-кодовой конструкции:

- Порядок модуляции  $q$  равен 256.
- Использовался только один набор частот,  $M = 1$ .
- Количество скачков на один символ  $T$  равно 10.
- Трафареты были заданы как  $c_i = i$ ,  $i = \overline{1, q}$  и  $t = \overline{1, T}$ .
- Длина преобразования Фурье составляет 2048.
- Мешающий сигнал имеет мощность, на 30 дБ превышающую мощность полезного сигнала, и имеет ширину полосы в 25% полосы передача.

Параметры более помехозащищенной сигнально-кодовой конструкции:

- Порядок модуляции  $q$  равен 8.
- Использовалось  $M = 22$  наборов частот.
- Количество скачков на один символ  $T$  равно 45.
- Трафареты были построены на пятикратном повторении кода  $[9, 2, 8]_8$ , то есть  $[45, 2, 40]_8$  коде.
- Длина преобразования Фурье составляет 2048.

- Мешающий сигнал имеет мощность, на 20 или 30 дБ превышающую мощность полезного сигнала, и имеет ширину полосы либо в четверть, либо в половину ширины полосы приемника.

Рассмотрим сначала более помехозащищенную конструкцию. На рисунке 1 представлены результаты моделирования предложенной конструкции при использовании разных алгоритмов приема. Декодер по критерию Колмогорова-Смирнова (далее декодер КС), описанный в разделе 4.3, обозначен в легенде «К.-С.». Ранговый декодер, описанный в разделе 4.2, обозначен «Ранг», а декодер OSN, описанный в разделе 4.1, — «OSN». Канал соответствует 12-лучевой модели для холмистой местности при относительной скорости движения передатчика 120 км/ч. Мощность мешающего сигнала превышает мощность полезного сигнала в 1000 раз (на 30 дБ). При этом мешающий сигнал занимает четверть полосы передачи.

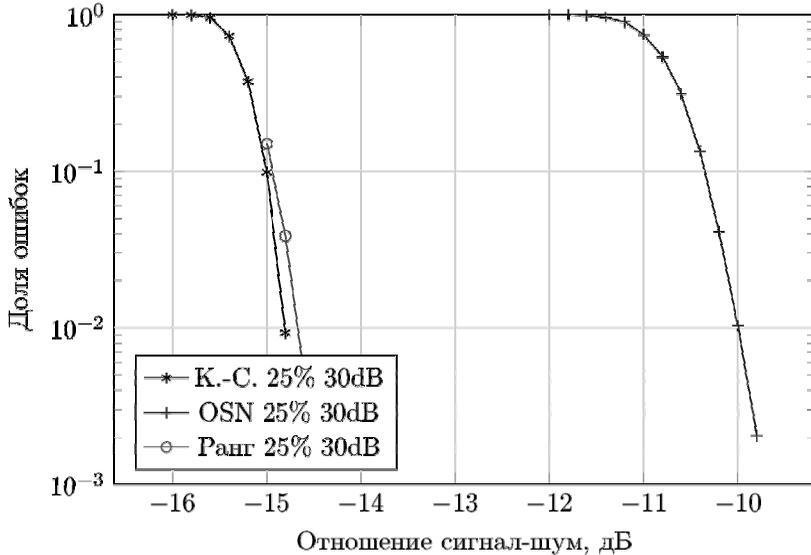


Рис. 1. Корректирующая способность представленной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 30 дБ относительно полезного сигнала

Из рисунка видно, что декодер по критерию Колмогорова-Смирнова и ранговый декодер имеют близкую корректирующую способность и выигрывают около 5 дБ по сравнению с известным OSN декодером.

На рисунке 2 мощность мешающего сигнала была уменьшена до 20 дБ. При этом рабочий диапазон для декодера КС изменился очень слабо, а для остальных декодеров он заметно увеличился. В данных условиях наибольшей корректирующей способностью обладает ранговый декодер.

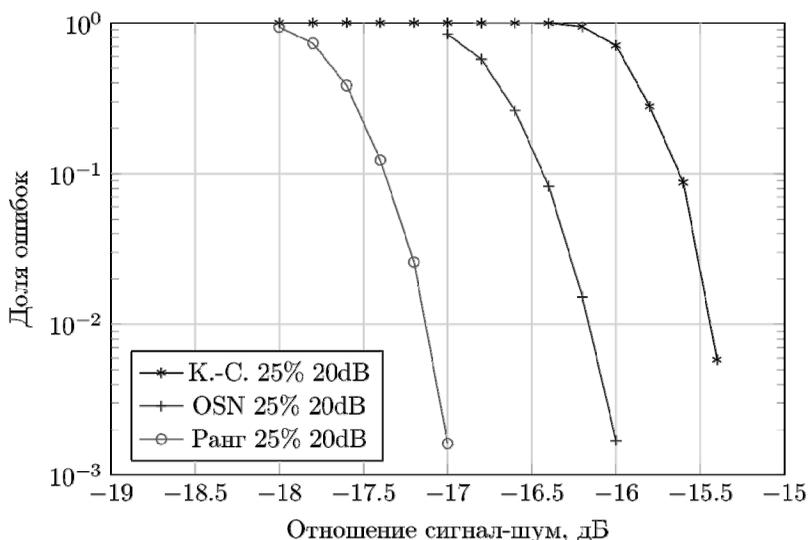


Рис. 2. Корректирующая способность представленной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 20 дБ относительно полезного сигнала

На рисунке 3 представлены результаты моделирования для мешающего сигнала в половину полосы полезного сигнала, имеющего мощность в 1000 раз превышающего мощность полезного сигнала. К сожалению, добиться устойчивой работы рангового декодера в этих условиях не удалось. При этом декодер КС выигрывает у декодера OSN 5 дБ. По сравнению со случаем, когда помеха занимает четверть полосы, изображенный на рисунке 1 рабочий диапазон отношений сигнал/шум уменьшился на 5 дБ.

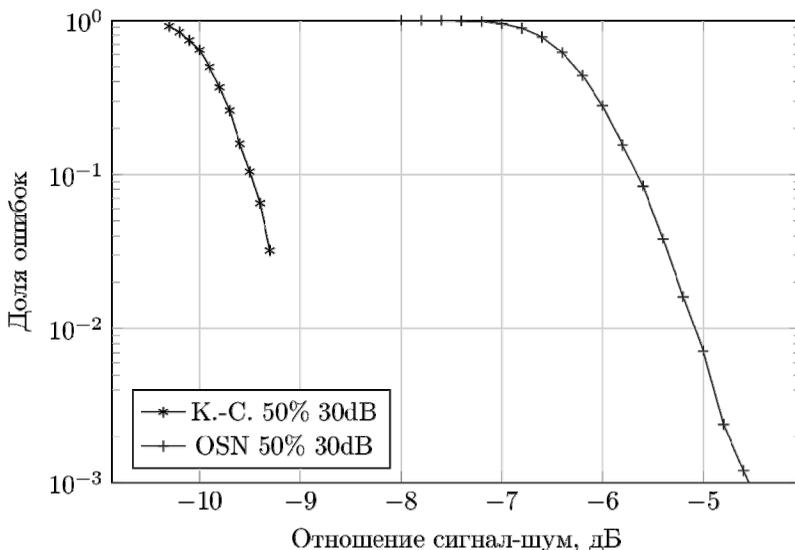


Рис.3. Корректирующая способность представленной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 30 дБ относительно полезного сигнала

Для более простой сигнально-кодовой конструкции результаты моделирования выглядят по-другому. На рисунке 4 редставлены результаты сравнения корректирующей способности для канала с мощным мешающим сигналом, занимающим четверть полосы передачи. Работа рангового декодера для этого случая не исследовалась. Кривая, соответствующая вероятности неправильного приема демодулятором по сумме энергий, описанном в начале раздела 4, практически не отклоняется от уровня 0.5, а значит, передача данных с этим декодером весьма нерациональна. Как видно из рисунка, в этих условиях выигрыш при использовании статистического демодулятора вместо известного декодера OSN превосходит 10 дБ.

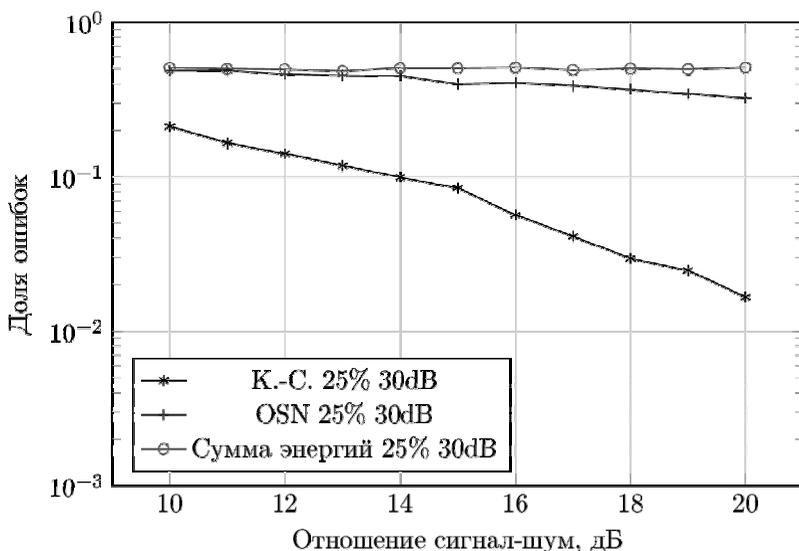


Рис. 4. Корректирующая способность представленной высокоскоростной кодовой конструкции для канала с полосовой помехой шириной в четверть диапазона и мощности 30 дБ относительно полезного сигнала

**6. Заключение.** Задача построения системы передачи данных для «плохих» каналов актуальна. Одной из сигнально-кодовых конструкций, используемых для ее решения, является частотно-позиционное кодирование с быстрой перестройкой частот. Существующие алгоритмы демодуляции плохо работают при наличии мощного мешающего сигнала. В работе предложена сигнально-кодовая конструкция, основанная на частотно-позиционном кодировании, имеющая скорость около 1,5 бит на OFDM символ. Данная конструкция позволяет организовывать передачу данных в каналах с мощными широкополосными помехами и высоким уровнем шума, в том числе при отношении сигнал-помеха -30 дБ и отношении сигнал/шум -9 дБ.

В работе также предложено два алгоритма приема: декодер КС и ранговый декодер. Первый более устойчив к присутствию в канале очень мощных широкополосных помех, в то время как последний имеет более широкий рабочий диапазон отношений сигнал/шум для более слабых или более узкополосных помех. Компьютерное моделирование также показало, что в каналах с широкополосной помехой декодер КС выигрывает 5 дБ у известного декодера OSN. В указанных условиях демодулятор по сумме энергий дает вероятность ошибки близкую к 0,5. Таким образом, мы можем рекомендовать предложенные алгорит-

мы демодуляции к использованию. Выбор конкретного алгоритма из предложенных зависит от конкретных условий применения.

Благодаря использованию предложенных в работе методов декодирования, в работе [6] удалось построить похожую сигнально-кодую конструкцию для систем множественного доступа, где в одной полосе частот работают несколько сотен пользователей.

## Литература

1. Langfeld P. OFDM für die schnelle Powerline Communication // Mensch & Buch: Berlin. 2002.
2. Крещук А.А., Потопов В.Г. Некоторые статистические демодуляторы для частотно-позиционного кодирования с быстрой перестройкой частот // Автоматика и телемеханика. 2013. Вып. 74. №. 10. С. 1688–1695.
3. Kreshchuk A., Potapov V. New coded modulation for the frequency hopping OFDMA system // Proceedings of 13<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2012. pp. 209–212.
4. Osipov D. Order statistics-based decoder with reliability information in a multiple access system under interference // Proceedings of 14<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2014. pp. 283–288.
5. Osipov D. Inner Convolutional Codes and Ordered Statistics Decoding in a Multiple Access System Enabling Wireless Coexistence // Proceedings of 6<sup>th</sup> International Workshop on Multiple Access Communications. 2013. pp 33–38.
6. Фролов А.А., Зяблов В.В. Метод кодирования для Q-частотного гауссовского канала с S пользователями // Информационные Процессы. 2014. Вып. 14. №. 2. С. 151–159.
7. Frolov A., Zyablov V. A new coding method for a multiple-access system with a large number of active users // In Proc. IEEE Information Theory Workshop. 2015. pp 1–5.
8. Ahmed S., Yang L.L., Hanzo L. Diversity Combining for Fast Frequency Hopping Multiple Access Systems Subjected to Nakagami-m Fading // Proceedings of 6<sup>th</sup> IEE International Conference on 3G and Beyond. 2005. pp. 235–239.

## References

1. Langfeld P. OFDM für die schnelle Powerline Communication. Mensch & Buch: Berlin. 2002.
2. Kreshchuk A.A., Potapov V.G. [Statistical demodulators for frequency shift keying with fast frequency hopping]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2013. vol. 74. no. 10. pp. 1688–1695. (In Russ).
3. Kreshchuk A., Potapov V. New coded modulation for the frequency hopping OFDMA system. Proceedings of 13<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2012. pp. 209–212.
4. Osipov D. Order statistics-based decoder with reliability information in a multiple access system under interference. Proceedings of 14<sup>th</sup> International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. 2014. pp. 283–288.
5. Osipov D. Inner Convolutional Codes and Ordered Statistics Decoding in a Multiple Access System Enabling Wireless Coexistence. Proceedings of 6<sup>th</sup> International Workshop on Multiple Access Communications. 2013. pp 33–38.
6. Frolov A., Zyablov V. [A coding technique for Q-frequency S-user gaussian channel]. *Informacionnye Processy – Information Processes*. 2014. vol. 14. no. 12. pp. 151–159. (In Russ.).

7. Frolov A., Zyblov V. A new coding method for a multiple-access system with a large number of active users. In Proc. IEEE Information Theory Workshop. 2015. pp 1–5.
8. Ahmed S., Yang L.L., Hanzo L. Diversity Combining for Fast Frequency Hopping Multiple Access Systems Subjected to Nakagami-m Fading. Proceedings of 6<sup>th</sup> IEE International Conference on 3G and Beyond. 2005. pp. 235–239.

**Крещук Алексей Андреевич** — к-т техн. наук, младший научный сотрудник сектора № 3.2 прикладных проблем теории кодирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН). Область научных интересов: теория помехоустойчивого кодирования. Число научных публикаций — 20. krsch@iitp.ru; Большой Каретный пер., 19 стр. 1., Москва, 127051; р.т.: (495)6995096.

**Kreshchuk Alexey Andreevich** — Ph.D., junior researcher of sector №3.2 - applied coding theory, Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) (IITP RAS). Research interests: coding theory. The number of publications — 20. krsch@iitp.ru; 19, Bolshoy Karetny per., build.1, Moscow, 127051, Russia; office phone: (495)6995096.

**Зяблов Виктор Васильевич** — д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией №3 информационных технологий передачи, анализа и защиты информации, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН). Область научных интересов: помехоустойчивое кодирование и защита информации. Число научных публикаций — 300. zyblov@iitp.ru; Большой Каретный пер., 19 стр. 1., Москва, 127051; р.т.: +7(495)6506214.

**Zyablov Victor Vasil'evich** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of laboratory #3 - transmission, protection and analysis of information, Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) (IITP RAS). Research interests: coding theory. The number of publications — 300. zyblov@iitp.ru; 19, Bolshoy Karetny per., build.1, Moscow, 127051, Russia; office phone: +7(495)6506214.

**Потапов Владимир Георгиевич** — к-т техн. наук, заведующий сектором 3.2 прикладных проблем теории кодирования, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН). Область научных интересов: помехоустойчивое кодирование и защита информации. Число научных публикаций — 30. potapov@iitp.ru, <http://iitp.ru/ru/users/326.htm>; Большой Каретный пер., 19 стр. 1., Москва, 127051; р.т.: +7(495)6995096.

**Potapov Vladimir Georgievich** — Ph.D., head of the sector 3.2 - applied coding theory, Institute for Information Transmission Problems of the Russian Academy of Sciences (Kharkevich Institute) (IITP RAS). Research interests: coding theory. The number of publications — 30. potapov@iitp.ru, <http://iitp.ru/ru/users/326.htm>; 19, Bolshoy Karetny per., build.1, Moscow, 127051, Russia; office phone: +7(495)6995096.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00150).

**Acknowledgements.** This research is supported by Russian Science Foundation (project №14-50-00150).

## РЕФЕРАТ

### *Крещук А.А., Зяблов В.В., Потапов В.Г.* **Сигнально-кодовые конструкции для работы в условиях мощных полосовых помех.**

Данная работа посвящена вопросам организации передачи в «плохих» каналах, в которых отношение сигнал/шум мало, и присутствует мешающий сигнал, с использованием частотно-позиционного кодирования с быстрой перестройкой частот. Стандартный алгоритм приема по максимальной сумме мощностей в таких условиях не работает.

В работе предложена сигнально-кодовая конструкция, основанная на частотно-позиционном кодировании, имеющая скорость около 1.5 бит на OFDM символ. Данная конструкция позволяет организовывать передачу данных в каналах с мощными широкополосными помехами и высоким уровнем шума, в том числе при отношении сигнал-помеха -30 дБ и отношении сигнал/шум -9 дБ.

В работе также предложено два алгоритма приема: декодер КС и ранговый декодер. Первый более устойчив к присутствию в канале очень мощных широкополосных помех, в то время как последний имеет более широкий рабочий диапазон отношений сигнал/шум для более слабых или более узкополосных помех. Компьютерное моделирование также показало, что в каналах с широкополосной помехой декодер КС выигрывает 5 дБ у известного декодера OSN. В указанных условиях демодулятор по сумме энергий дает вероятность ошибки близкую к 0,5. Таким образом, мы можем рекомендовать предложенные алгоритмы демодуляции к использованию. Выбор конкретного алгоритма из предложенных зависит от конкретных условий применения.

## SUMMARY

### *Kreshchuk A.A., Zyablov V.V., Potapov V.G.* **Signal Code Constructions for Channels with Powerful Wideband Interference.**

In this paper, we consider data transmission in “bad” channels with low snr and wideband interference. We propose a code construction based on frequency shift keying with fast frequency hopping having the rate of 1.5 bit per OFDM symbol. This code construction allows transmitting data in channels with strong wideband interference and high noise levels, including with SIR equal to -30 dB and SNR equal to -9 dB. We also propose two new decoders that are more robust in regard to interference compared with the known OSN decoder. The first one, based on the Kolmogorov-Smirnov criterion, is more robust in case of very strong interference, while the second decoder has a wider working range for weaker interference and interference with narrower band.

The computer simulation has shown that the proposed decoders have higher error correction efficiency than the previously known decoder. Thus, they can be recommended for use in real systems.

О.К. АЛЬСОВА  
**АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ  
ВЫБОРА ПЕРИОДА-АНАЛОГА**

---

*Альсова О.К. Адаптивный алгоритм прогнозирования гидрологических временных рядов на основе выбора периода-аналога.*

**Аннотация.** В работе предложен адаптивный алгоритм прогнозирования временного ряда на основе выбора периода-аналога. Особенностью алгоритма является использование обучающей выборки прогнозов для автоматического выбора оптимальных параметров его работы. Алгоритм применялся для прогнозирования гидрологических временных рядов притока воды в Новосибирское водохранилище (река Обь). Показана эффективность его применения (повышение точности прогнозирования) по сравнению с базовым алгоритмом.

**Ключевые слова:** прогнозирование, гидрологический временной ряд, период-аналог, мера близости, адаптивный алгоритм.

*Alsova O.C. An Adaptive Algorithm for Hydrological Time Series Forecasting Based on the Selection of an Analogue-Period.*

**Abstract.** In the paper, an adaptive algorithm for time series forecasting based on the selection of an analogue period is proposed. A distinctive feature of the algorithm is the use of training sample of forecasts for the automatic selection of optimal parameters of its work. The algorithm was employed for prediction of the hydrological time series of inflow to Novosibirsk Reservoir (the Ob River). The efficiency of its use (an increase in the accuracy of forecasts) is demonstrated compared with the basic algorithm.

**Keywords:** forecasting; hydrological time series; analogue-period; similarity measure; adaptive algorithm.

---

**1. Введение.** Исследование и прогнозирование гидрологических временных рядов, описывающих изменение характеристик водного режима рек (объемов притока, уровней воды) — одна из основных задач, которые решаются в гидрологии. В частности, в зависимости от прогнозного значения притока определяется тактика функционирования водохранилищ, созданных на реках. От этого показателя зависит объем сброса воды, поддерживающий динамическое равновесие между ее притоком и оттоком. Кроме того, прогноз притока служит основой для разработки оптимальной тактики расхода воды через гидросооружения, обеспечивающей максимальную выработку электроэнергии ГЭС.

Изменение во времени гидрологических характеристик рек и факторов, влияющих на их формирование, представляет собой сложный, многофакторный процесс, имеющий стохастическую природу. Поэтому, как один из основных, исторически сложился статистический подход к исследованию колебаний гидрологических характери-

стик рек, основанный на применении вероятностно-статистических моделей.

Проблемам изучения и прогнозирования гидрологических характеристик водного режима рек на основе статистического подхода посвящено много научных работ. Большой вклад в изучение этих вопросов внесли Крицкий С.Н. и Менкель М.Ф. (1981, 1982), Раткович Д.Я. (1976), Музылев С.В. (1982), Дружинин И.П. (1991), Иващенко А.Г. (1985), Голяндина Н.Э. (2004) и другие. Для исследования и прогнозирования временных рядов гидрологических характеристик рек используются разные классы вероятностно-статистических методов и моделей [1]. Однако задача идентификации и прогнозирования временных рядов гидрологических характеристик рек еще не решена с достаточной степенью точности и по-прежнему остается актуальной.

На кафедре вычислительной техники НГТУ на протяжении нескольких лет ведется исследовательская работа в области изучения закономерностей и прогнозирования притока воды в Новосибирское водохранилище. Разработаны и исследованы различные алгоритмы и модели прогнозирования притока разной дискретности (сутки, декада, квартал, год): модели с распределенным лагом, модели скользящего прогнозирования, модели на основе сингулярного спектрального анализа и моделетеки, а также метод последовательной идентификации составляющих временного ряда [2-4].

Одно из направлений работ связано с разработкой методов прогнозирования, основанных на выделении периода-аналога. Методы этого класса широко и эффективно используются в гидрологии для предсказания характеристик водного режима рек, уровней воды и объемов притока в водохранилища.

В данной статье приводится описание и результаты исследования разработанного адаптивного алгоритма прогнозирования гидрологического временного ряда на основе выбора периода-аналога. Предложенный адаптивный алгоритм тестировался на гидрологических временных рядах объема притока воды в Новосибирское водохранилище (река Обь). Данные предоставлены Верхне-Обским бассейновым водным управлением Федерального агентства водных ресурсов (г. Новосибирск).

**2. Постановка задачи.** Основная идея метода прогнозирования на основе выбора периода-аналога (года-аналога) заключается в следующем предположении: если значения прогнозируемого показателя за некоторые периоды рассматриваемого года оказываются близкими к значениям показателя соответствующих периодов другого года (предыстории процесса), то и в последующие периоды значения показателей между годами будут отличаться статистически незначимо.

Если руководствоваться этим предположением, то с помощью выбора года-аналога можно осуществлять различные типы прогнозирования (краткосрочное, среднесрочное, долгосрочное). В основе метода — задание мер близости между периодами (годами) [5].

На практике, как правило, применяется простейший базовый алгоритм, основанный на выборе одного года-аналога с использованием заданной меры близости [5, 6]. Однако на формирование значений временных рядов гидрологических характеристик оказывает влияние комплекс случайных факторов, что приводит к их большой изменчивости от года к году и невозможности однозначного выбора единственного года-аналога. Поэтому перспективной представляется идея разработки алгоритма, основанного на использовании нескольких годов-аналогов.

Точность прогнозирования определяется заданными на входе значениями параметров работы алгоритма. В качестве параметров задаются длина периода предыстории или длина обучающей выборки, на основе которой выбирается год-аналог, количество выбираемых лет-аналогов, последний период из выборки исходных данных, который учитывается при выборе аналога. Каждый из этих параметров оказывает существенное влияние на точность прогнозирования, при этом содержательно обосновать выбор параметров алгоритма не представляется возможным.

В статье поставлена задача разработки и исследования адаптивного алгоритма, реализующего автоматический выбор оптимальных параметров его работы, на основе использования обучающей выборки прогнозов.

**3. Математическое описание задачи прогнозирования временного ряда на основе выбора периода-аналога.** Пусть задан временной ряд (ВР)  $y(t)$  наблюдений  $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)$  анализируемого случайного процесса  $Y(t)$ , произведенных в последовательные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ :

$$y(t) = \{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)\}. \quad (1)$$

Необходим прогноз значений временного ряда  $y(t)$  на один или несколько временных тактов вперед  $\hat{y}(t_{n+m})$ , где  $m = 1, 2, \dots$  — горизонт прогноза.

В качестве исходных данных для прогнозирования используются фрагменты исследуемого временного ряда  $y(t)$  (предыстория процесса).

Фрагмент значений ВР, соответствующий  $i$ -ому периоду:

$$y_i(t) = \{y(t_{n-p-i}), y(t_{n-p-i-1}), \dots, y(t_{n-p-i-l+1})\}, \quad (2)$$

где  $i$  — номер фрагмента ВР,  $i = \overline{0, k}$ ,  $k$  — количество рассматриваемых периодов-аналогов;  $l$  — длина периода предыстории, который используется для выбора периода-аналога;  $p$  — период ВР (период дискретности ВР). Для ВР среднесуточных значений период дискретности  $p = 365$  (366) дней соответствует годовой периодичности в изменении значений ВР, для ВР среднедекадных значений —  $p = 36$ , для ВР среднемесячных значений —  $p = 12$  и т.д.

Мера близости (сходства) между фрагментом значений ВР непосредственно предшествующим прогнозируемому периоду  $y_0(t)$  и соответствующими значениями предполагаемых периодов-аналогов  $y_i(t)$ ,  $i = \overline{1, k}$  вычисляется на основе использования одной из мер расстояний либо ранговых коэффициентов корреляции. Реализованы следующие меры расстояния.

Расстояние Евклида:

$$d_e \{y_0(t), y_i(t)\} = \sqrt{\sum_{j=0}^{l-1} (y(t_{n-j}) - y(t_{n-p+i-j}))^2}. \quad (3)$$

Расстояние Чебышева:

$$d_{ch} \{y_0(t), y_i(t)\} = \max_{0 \leq j \leq l-1} (|y(t_{n-j}) - y(t_{n-p+i-j})|). \quad (4)$$

Ранговый коэффициент корреляции Спирмена:

$$\tau_s \{y_0(t), y_i(t)\} = 1 - \frac{6}{(l-1)^3 - (l-1)} \sum_{j=0}^{l-1} (y(t_{n-j}) - y(t_{n-p+i-j}))^2. \quad (5)$$

Наиболее близким к прогнозируемому году принимается период-аналог, которому соответствует минимальное значение меры расстояния, либо максимальное значение коэффициента корреляции.

Например, для меры расстояния Евклида:

$$d_e^{(analog)} = \min_{1 \leq i \leq k} \{d_e \{y_0(t), y_i(t)\}\}. \quad (6)$$

В общем случае год-аналог выбирается по нескольким показателям, например, помимо ВР объема притока в предшествующие периоды рассматриваются ВР метеорологических показателей (температура воздуха, количество осадков). В этом случае используется мера расстояния, позволяющая находить год-аналог по совокупности показателей:

$$d_{i(mul)} = \sqrt{\sum_{r=1}^R \sum_{j=0}^{l-1} \frac{(y^{(r)}(t_{n-j}) - y^{(r)}(t_{n-p-i-j}))^2}{\bar{y}_j^{(r)}}}, \quad (7)$$

где  $R$  — количество ВР показателей, участвующих в выборе периода-аналога;  $\bar{y}_j^{(r)}$  — среднее значение  $r$ -го показателя за  $j$ -ый период.

Исходные показатели имеют разную размерность и не могут сравниваться по вкладу, вносимому в определение года-аналога. Поэтому используется усреднение в (7) для приведения значений показателей к безразмерному виду.

В общем случае может быть выбрано несколько периодов-аналогов  $a$  с минимальными (максимальными) значениями меры близости.

**4. Адаптивный алгоритм прогнозирования временного ряда на основе выбора периода-аналога.** Для работы алгоритма прогнозирования на основе выбора периода-аналога необходимо задать следующие исходные данные:

- ВР значений показателей;
- тип прогнозируемого периода, зависимый период (сутки, декада, месяц, квартал, год) и его номер (например, 15 декада или 2 квартал);
- количество тактов прогнозирования (глубина прогноза) —  $m$  и входные параметры:

- количество рассматриваемых периодов-аналогов —  $k$ ;
  - количество выбираемых периодов-аналогов —  $a$ ;
  - длина периода предыстории для выбора периода-аналога —  $l$ ;
  - номер последнего периода, участвующего в выборе аналога —  $s$ .
- Например, если требуется прогноз на 9-ую декаду года, можно в обучающую выборку включить последнее значение показателя за 8-ую или 7-ую декады и т.д.;
- мера расстояния.

В алгоритме периоды-аналоги для прогнозируемого года выбираются на основе использования выбранной меры близости (3-5, 7). За прогнозную оценку значений исследуемого временного ряда  $y(t)$  принимаются соответствующие значения, усредненные по периодам-аналогам с учетом нормализованных весов:

$$\hat{y}(t_{n+m}) = \sum_{i=1}^k w_{inorm} \cdot y_i(t_{n+m-p-i}) \cdot f_i, m = 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где  $f_i = 1$ , если  $i$  — период выбран в качестве периода-аналога и  $f_i = 0$  — в противном случае;  $W_{inorm}$  — нормализованный вес года-аналога.

Нормализованный вес года-аналога рассчитывается по формуле:

$$W_{inorm} = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i}, \quad (9)$$

где  $w_i$  — вес года-аналога определяется по формуле:

$$w_i = \frac{d_{\min}}{d_i}, \quad (10)$$

где  $d_i$  — значение меры расстояния для  $i$ -го года,  $d_{\min}$  — значение меры расстояния для наиболее близкого года.

Каждый из заданных входных параметров алгоритма влияет на точность прогнозирования. При этом исследователь, как правило, не может содержательно обосновать выбор параметров алгоритма. Поэтому для повышения качества прогнозов целесообразным представляется реализация в алгоритме автоматического выбора оптимальных значений параметров, которые обеспечили бы максимальную точность прогнозов и уменьшили дисперсию прогнозной ошибки. Исходя из этого, было предложено реализовать в алгоритме автоматическую настройку параметров алгоритма в зависимости от исходных данных (временного ряда предыстории процесса), тем самым и обеспечить его адаптивность.

Идея адаптивного алгоритма прогнозирования заключается в формировании и последующем использовании обучающей выборки прогнозов. Выборка формируется из прогнозов, составленных для аналогичных исследуемому году периодов предыдущих лет с известными реальными значениями признаков при различных входных параметрах работы алгоритма.

При составлении выборки варьируются следующие параметры:

- количество выбираемых периодов-аналогов —  $a_i, i = \overline{1, I}$ ;
- длина периода предыстории или длина обучающей выборки —  $l_j, j = \overline{1, J}$ ;
- номер последнего учитываемого периода —  $s_z, z = \overline{1, Z}$ .

На первом этапе для каждого года составляется выборка, которая содержит в себе наборы параметров алгоритма, прогнозную оценку значений исследуемого временного ряда  $y(t)$  на обучающей выборке

ке и значения относительных ошибок для прогнозов, запущенных с этими параметрами. Общее количество прогнозов в выборке для одного года равно  $Q = I \cdot J \cdot Z$ , то есть она содержит все возможные комбинации параметров (полный перебор).

Относительная ошибка прогнозирования для  $h$ -года при задании  $q$ -ых параметров алгоритма определяется по формуле:

$$\varepsilon_{hq} = \frac{|y(t) - \hat{y}_{hq}(t)|}{y(t)}, q = \overline{1, Q}, h = \overline{1, H}, \quad (11)$$

где  $y(t)$  — наблюдаемое (реальное) значение ВР;  $\hat{y}_{hq}(t)$  — прогнозное значение ВР при выборе  $q$ -ых параметров алгоритма для  $h$ -года,  $H$  — количество лет в обучающей выборке.

На втором этапе определяются оптимальные параметры алгоритма, обеспечивающие минимальную суммарную относительную ошибку прогнозирования по совокупности лет:

$$\varepsilon = \min_{1 \leq q \leq Q} \sum_{h=1}^H \varepsilon_{hq}. \quad (12)$$

Таким образом, в алгоритме выполняется адаптация по следующим параметрам: длина обучающей выборки, на основе которой выбирается год-аналог, количество выбираемых лет-аналогов, последний период из выборки исходных данных, который учитывается при выборе аналога.

На третьем этапе выбирается несколько наиболее близких годов-аналогов к прогнозируемому году на основе использования выбранной меры близости (3-5,7) при задании оптимальных параметров работы алгоритма, определенных на предыдущем (втором) этапе.

На последнем этапе усредняется значение прогнозируемого показателя за период (сутки, декада, месяц) в выбранных годах-аналогах с учетом нормализованных весов. Это значение  $\hat{y}(t_{n+m})$  принимается за прогноз показателя (8).

Адаптивный алгоритм может применяться как в случае использования в качестве исходных данных одного показателя, так и нескольких.

Программная реализация алгоритма была выполнена в среде *IDE NetBeans 8.0.2* на языке программирования *Java*.

Очевидно, что использование алгоритмов прогнозирования, базирующихся на выборе периода-аналога, возможно только для временных рядов, имеющих четко выраженную периодическую (сезонную) составляющую, обусловленную зависимостью изменения его значений от времени. Во временных рядах гидрологических характеристик рек — это

составляющая годового цикла, связанная с вращением Земли вокруг Солнца. Подобная периодическая закономерность имеет ясное происхождение и характерна для водного режима любой реки.

Кроме того, эффективность работы алгоритма во многом зависит от объема выборки исходных данных. Чем длиннее исследуемый временной ряд, описывающий предысторию процесса, тем вероятнее нахождение наиболее близкого года-аналога для прогнозируемого года и тем точнее определяются оптимальные параметры работы адаптивного алгоритма. Также следует отметить, что алгоритмы, основанные на выборе периода-аналога, пригодны для предсказания средних по водности лет с типичным распределением объема воды по периодам года и имеют низкую точность при прогнозировании аномальных лет, для которых не существует близких аналогов в выборке исходных данных.

**5. Прогнозирование гидрологических временных рядов притока воды к створу Новосибирской ГЭС.** Разработанный адаптивный алгоритм применялся для прогнозирования гидрологических временных рядов притока. В качестве исходных данных использовался ВР декадного объема притока воды (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ) к створу Новосибирской ГЭС за период с 1985 по 2015 гг.

Для исследования эффективности алгоритма был выбран 2015 год. Прогнозировался объем притока за декады года (всего 36 декад). Таким образом, период с 1985 по 2014 гг. выступал в качестве обучающей выборки, а тестировался алгоритм на данных 2015 г.

Было выполнено прогнозирование с помощью базового алгоритма с выбором одного года-аналога. В качестве меры близости использовалось расстояние Евклида, период предыстории для выбора года-аналога составлял 35 предыдущих прогнозируемому периодов (декад).

Также было выполнено прогнозирование с помощью адаптивного алгоритма. В качестве меры близости использовалось расстояние Евклида, период предыстории рассматривался от 3 до 35 предыдущих прогнозируемому периоду декад, количество годов-аналогов изменялось от 1 до 5.

В таблице 1 приведены характеристики точности прогнозирования, а именно: — средняя относительная ошибка прогноза,  $\sigma_\varepsilon$  — среднеквадратическое отклонение ошибки прогноза,  $\varepsilon_{cp, \min}$  и  $\varepsilon_{cp, \max}$  — минимальная и максимальная относительные ошибки прогноза и процент оправдываемости прогнозов. В качестве оценки оправдываемости прогноза использовалась допустимая погрешность (ошибка)  $\delta_{\text{дон}}$  —

предельное значение погрешности (ошибки) прогноза, при котором последний считается оправдавшимся, принятая в гидрологии [7]:

$$\delta_{\text{дон}} = \pm 0,674 \cdot \sigma, \quad (13)$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение прогнозируемой величины от ее среднего значения за период наблюдения.

Таблица 1. Характеристики точности прогнозирования

Алгоритм	Характеристики точности				
	$\varepsilon_{cp.}$	$\sigma_{\varepsilon}$	$\varepsilon_{cp.min}$	$\varepsilon_{cp.max}$	% оправдаваемости
Базовый	0,25	632,5	0	0,88	61%
Адаптивный	0,14	414,3	0	0,48	78%

На рисунке 1 приведены фактический (реально наблюдаемый) и модельные (рассчитанные по базовому алгоритму и адаптивному алгоритмам) гидрографы декадного притока воды в Новосибирское водохранилище за 2015 г.

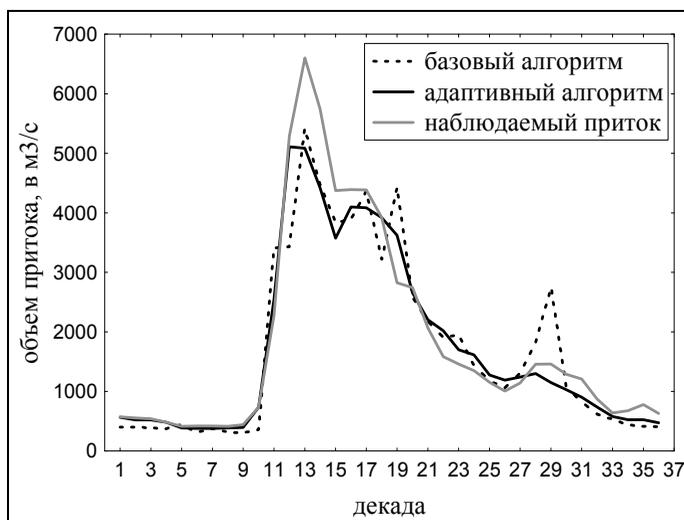


Рис. 1. Фактический и модельные гидрографы декадного притока воды в Новосибирское водохранилище за 2015 год

Результаты проведенного исследования показали, что характеристики точности прогнозирования у адаптивного алгоритма лучше, чем у базового (см. таблицу 1). Средняя относительная ошибка прогноза и дисперсия прогнозной ошибки ниже при использовании адаптивного алгоритма и равны, соответственно, 0,14 и 414,3, тогда как у

базового алгоритма аналогичные характеристики — 0,25 и 632,5. Применение адаптивного алгоритма обеспечило 78% оправдываемости прогнозов, тогда как базовый алгоритм позволил спрогнозировать деkadный объем притока только с 61% оправдываемостью.

**6. Заключение.** Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об эффективности использования адаптивного алгоритма для прогнозирования гидрологических временных рядов. Адаптивный алгоритм обеспечивает более высокую точность прогнозирования по сравнению с базовым; уменьшается средняя относительная ошибка прогноза, уменьшается дисперсия прогнозной ошибки, повышается оправдываемость прогнозов.

В дальнейшем планируется использовать описанный адаптивный алгоритм прогнозирования на основе выбора периода-аналога в комплексе с другими методами, предложенными ранее [2-4] и разработать соответствующую методику прогнозирования. Исследования показали [2, 3], что комплексное использование для прогнозирования набора взаимодополняющих и уточняющих друг друга моделей позволяет повысить качество прогнозов, а именно повысить их точность, оправдываемость и увеличить заблаговременность.

## Литература

1. *Привальский В.Е., Панченко В.А., Асарина Е.Ю.* Модели временных рядов с приложениями в гидрологии // СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 226 с.
2. *Альсова О.К., Губарев В.В.* Решение задач управления Новосибирским водохранилищем на основе прогнозирования притока воды к створу ГЭС // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. 2014. С. 3148–3158.
3. *Губарев В.В., Альсова О.К.* Прогнозирование временных рядов в гидрологических задачах на основе вариативного моделирования // Автометрия. 2006. Вып. 42. № 6. С.45–52.
4. *Абалов Н.В., Губарев В.В., Альсова О.К.* Использование методов сингулярного спектрального анализа и моделетеки при идентификации временных рядов // Труды СПИИРАН. 2014. № 4(35). С. 49–63.
5. *Crochet P.* Probabilistic daily streamflow forecast using an analogue sorting method // Icelanding Meteorological Office. 2013. 39 p.
6. *Урбанова О.Н., Семанов Д.А.* Методика расчета наполнения прудов для прогнозирования безопасного пропуска весеннего половодья // География и природные ресурсы. 2010. С. 144–148.
7. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуски 1-3 // Л.: Гидрометеиздат, 1989. 254 с.

## References

1. *Privalsky V.E., Panchenko V.A., Asarin E.Y.* *Modeli vremennyh ryadov s prilozheniyami v gidrologii* [Time series models with applications in hydrology]. SPb.: Gidrometeoizdat. 1992. 226 p. (In Russ.).
2. *Alsova O.K., Gubarev V.V.* [Solution of control problems of Novosibirsk reservoir based on the prediction of water inflow to the alignment of HES] *XII Vserossiyskoe soveshhanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [XII All-Russian Conference on Control Problems VSPU-2014]. 2014. pp.3148–3158. (In Russ.).

3. Gubarev V.V., Alsova O.K. [Forecasting of time series of hydrological problems based on variant modeling]. *Avtometrija – Avtometriya*. 2006. no. 42. pp. 45–52. (In Russ.).
4. Abalov N.V., Gubarev V.V., Alsova O.K. [Use of Methods of Singular Spectral Analysis and Modeletka for the Identification of Time Series]. *Trudy SPPIRAN – SPPIRAS Proceedings*. 2014. no. 4(35). pp. 49–63. (In Russ.).
5. *Crochet P.* Probabilistic daily stream flow forecast using an analogue sorting method. *Icelanding Meteorological Office*. 2013. 39 p.
6. Urbanova O.N., Semanov D.A. [Methods of calculating the filling of ponds to predict the safe passage of spring flood] *Geografija i prirodnye resursy – Geography and Natural resources*. 2010. pp. 144–148. (In Russ.).
7. *Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam* [Guide to Hydrological]. Ussue 1-3. L.: Gidrometeoizdat. 1989. 254 p. (In Russ.).

**Альсова Ольга Константиновна** — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: исследование и разработка методов и средств прогнозирования временных рядов, компьютерное моделирование систем, интеллектуальный анализ данных. Число научных публикаций — 50. [alsowa@mail.ru](mailto:alsowa@mail.ru); пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073; п.т.: 89134627927.

**Alsova Olga Constantinovna** — Ph.D., associate professor, associate professor of computer sciences department, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Research interests: research and development of methods and means of time series forecasting, computer modeling of systems, intellectual data analysis. The number of publications — 50. [alsowa@mail.ru](mailto:alsowa@mail.ru); 20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia; office phone: 89134627927.

## РЕФЕРАТ

### *Альсова О.К.* **Адаптивный алгоритм прогнозирования гидрологических временных рядов на основе выбора периода-аналога.**

В гидрологии широко и эффективно используются методы, основанные на выборе периода-аналога для предсказания значений гидрологических характеристик рек (уровней воды, объемов притока в водохранилища).

Базовый алгоритм предполагает выбор одного периода-аналога с использованием заданной меры близости. Однако на практике не всегда можно однозначно выбрать единственный год-аналог вследствие большой изменчивости значений гидрологических характеристик, формирующихся под влиянием комплекса случайных факторов.

К тому же точность прогнозирования во многом определяется заданными параметрами работы алгоритма, выбор которых невозможно содержательно обосновать.

В статье предлагается адаптивный алгоритм, предполагающий выбор и взвешенный учет при прогнозировании нескольких периодов аналогов. Оптимальные параметры работы алгоритма настраиваются автоматически на основе использования обучающей выборки прогнозов.

Предложенный алгоритм применялся для прогнозирования гидрологических временных рядов притока. В качестве исходных данных использовался ВР декадного объема притока в Новосибирское водохранилище за период с 1985 по 2015 гг. Прогнозировался объем притока на декады 2015 года (36 декад) по базовому алгоритму и адаптивному алгоритмам.

Результаты исследования подтвердили эффективность использования адаптивного алгоритма для прогнозирования гидрологических временных рядов. Адаптивный алгоритм обеспечивает более высокую точность прогнозирования по сравнению с базовым алгоритмом, а именно уменьшается средняя относительная ошибка прогнозирования, уменьшается дисперсия прогнозной ошибки, повышается оправдываемость прогнозов.

## SUMMARY

### *Alsova O.C.* **An Adaptive Algorithm for Hydrological Time Series Forecasting Based on the Selection of an Analogue-Period.**

The methods based on the selection of analogue period are widely and effectively used in hydrology for forecasting the hydrological characteristics of rivers (water level, inflow to reservoir).

The basic algorithm assumes selection of one analogue period using a predetermined similarity measure. However, in practice it is not always possible to select uniquely a single year because of the large variability of the hydrological characteristic values formed under the influence of random factors.

In addition, forecast accuracy depends on the algorithm parameters, selection of which cannot be meaningfully substantiated.

In the paper, the adaptive algorithm for forecasting based on the selection and normalized account in prediction of some analogue periods is proposed. The optimal parameters of the algorithm are automatically defined based on the use of training sample of forecasts.

The proposed adaptive algorithm was employed for forecasting of hydrological time series of river inflow. The initial data are a decade inflow to Novosibirsk Reservoir for the period from 1985 to 2015. The inflow for the decades of 2015 year (36 decades) was predicted with use of basic and adaptive algorithms.

The results of the research confirmed the efficiency of the adaptive algorithm for forecasting of hydrological time series.

Adaptive algorithm provides higher prediction accuracy compared with the basic algorithm, i.e. it reduces a mean relative prediction error and a variance of forecast error as well as improves accuracy of forecasts.

А.С. ВЕРШИНИН  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ  
ДАННЫХ МАКЕТА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОДЕМА**

---

*Вершинин А.С. Экспериментальная оценка скорости передачи данных макета гидроакустического модема.*

**Аннотация.** В статье проведен сравнительный анализ существующих в настоящее время на рынке гидроакустических модемов. Приведены теоретические расчеты дальности действия разработанного гидроакустического модема. Представлены результаты экспериментальной проверки макета гидроакустического модема в бассейне.

**Ключевые слова:** гидроакустический модем, эксперимент, автономный обитаемый подводный аппарат, модуляция.

*Vershinin A.S. Experimental Estimation of the Data Transfer Rate of a Hydroacoustic Modem Model.*

**Abstract.** The paper deals with a comparative analysis of the hydroacoustic modems currently available on the market. Theoretical calculations of the operating range of the developed hydroacoustic modem are given. The results of the experimental verification of the hydroacoustic modem model in the pool are presented.

**Keywords:** hydroultrasonic modem experiment; autonomous underwater vehicle; modulation.

---

**1. Введение.** В настоящее время в подводной среде передача информации осуществляется с помощью акустических сигналов. Актуальность создания надежной системы передачи информации в подводной среде с помощью акустических волн обусловлена бурным развитием исследований глубин мирового океана с помощью автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА). Для управления подводными аппаратами необходимо организовать беспроводную линию связи под водой, например, между надводным судном и АНПА. Для оперативного управления АНПА [1] и передачи телеметрии требуется канал передачи информации не менее нескольких Кб/сек.

Цель статьи — сделать сравнительный анализ существующих модемов и представить результаты экспериментальной оценки скорости передачи данных в гидроакустическом канале.

В настоящее время на рынке представлены гидроакустические модемы фирм Aquatec [2, 3], Sonardyne [4, 5], LinkQuest [6-10], Концерн «Океан прибор» [11-12] и др.

Возможности современных модемов позволяют передавать данные со скоростями до 48 кбит/с на дистанциях до 1-2 км (модем S2CR 40/80 фирмы EvoLogics GmbH), либо до 7-10 км со скоростью 2,5 кбит/с (UWM10000) [13]. В указанных разработках используются фазовая манипуляция, технология модуляции S2C [14], частотная модуляция и др. Заявленные скорости передачи информации достигаются при определенных условиях в гидроакустическом канале. Однако ре-

альные условия разнообразны и такие явления, как рефракция, рассеяние, реверберация и др. [15-18] приводят к тому, что акустический сигнал на приемной стороне является искаженным. Искажения принимаемого сигнала значительно снижают скорость передачи данных по гидроакустическому каналу.

Одним из путей снижения влияния искажений принимаемого сигнала на качество демодуляции является разработка алгоритмического обеспечения для цифрового синтеза сигналов в передатчике и их цифровой обработки в приемнике [19]. Таким образом, разработка перспективных и модернизация существующих отечественных гидроакустических модемов для АНПА может быть основана на синтезе сложных сигналов в передатчике и алгоритмов их обработки в приемнике. В таблице 1 приведен сравнительный анализ гидроакустических модемов.

Таблица 1. Сравнительный анализ гидроакустических модемов

Название	Страна	Модуляция	Параметры	Скорость передачи информации
AQUAmodem (Aquatec)	США	MFSK	Глубина 3000 м дальность 3 км	300 бит/с
UCOM Dir LMF (Sonardyne)	Англия	QPSK	Глубина 3000 м дальность 3 км	10 кбит/с
EvoLogics S2C M Mini	Германия	S2C	Глубина 1000-2000 м Дальность 1000-3500 м	13,9-31,2 кбит/с
Modems S2C R 12/24			Глубина 6000 м Дальность 6000 м	до 9,2 кбит/с
Develogic Modular Hydro Acoustic Modem	Германия	OFDM-MDPSK	Глубина 1950 м 6000 м Дальность 30 000 м	7000 бит/с 3400 бит/с 145 бит/с
Модем Концерн «Океан прибор» НИИ «Штиль»	Россия	OFDM	Дальность 1300 м BER $10^{-3}$ - $10^{-9}$	13,95 кбит/с
Разрабатываемый гидроакустический модем	Россия	QAM	Глубина 6000 м дальность 30 км BER $10^{-6}$	до 25,5 кбит/с (но не менее 6,5 кбит/с, зависит от гидроакустического канала)

Основными техническими характеристиками гидроакустического модема являются: дальность действия, скорость передачи данных, полоса частот излучаемых сигналов, центральная частота.

**2. Расчет параметров.** Для оценки ожидаемой дальности действия модема использовались статистические модели зависимости ослабления акустического сигнала с увеличением дистанции между передатчиком и приемником, а также статистические модели помех, возникающих в подводной среде. Эти модели использовались для вычисления средней дальности действия модема по совокупности различных реализаций подводного канала. Расчетная средняя дальность действия модема представлена на рисунке 1.

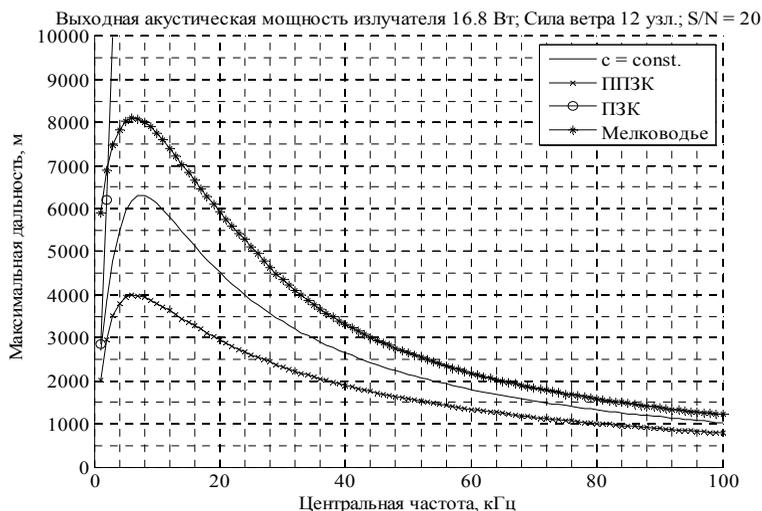


Рис. 1. Зависимость дальности от частоты

Предварительные оценки зависимости дальности действия от центральной частоты излучения сигналов показали, что для излучения акустических сигналов целесообразно использовать центральную частоту около  $f_0 = f_{\text{опт}} \sim 9-11$  кГц. На основании этих оценок можно показать, что ожидаемая в среднем дальность действия подводной связи (без учета зон тени) при акустической мощности излучателя 16,8 Вт составляет:

- около 150 км в подводном звуковом канале (ПЗК).
- от 4 км до 8 км — приповерхностный звуковой канал и мелководье (ППЗК).

Для оценки ожидаемой средней скорости передачи информации выполнялись расчеты на основе соотношений, связывающих скорость передачи информации, полосу частот и скорость кодирования. Для экспериментов в открытом водоеме был использован излучатель, с помощью которого можно достичь полосы частот 10 кГц, и разработан прямо-передатчик, обеспечивающий соотношение сигнал/шум, при

котором возможно использование модуляции QAM-16 [20] (4 бита в символе), тогда скорость передачи информации = 640 несущих \*4 бита \*16 символов =40960 бит/секунду = 40 Кб/сек при полосе 10 кГц. Если учитывать помехоустойчивое кодирование со скоростью кодера 2/3, то скорость снизится до 25,5 Кб/сек.

В таблице 2 приведены значения скоростей передачи информации для различной полосы частот в ППЗК.

Таблица 2. Параметры гидроакустического модема

Полоса, кГц	Модуляция, скорость кодирования	Скорость передачи информации
2	QPSK, 1/2	1,2 Кбит/сек
4	QPSK, 1/2	2,4 Кбит/сек
10	QPSK, 2/3	8,0 Кбит/сек
10	QAM-16, 2/3	25,5 Кбит/сек

**3. Экспериментальная оценка.** Экспериментальная оценка скорости передачи данных макета гидроакустического модема в бассейне проводилась для полосы 10 кГц. Существенным ограничением в скорости передачи данных макета гидроакустического модема является полоса пропускания излучателя.

Для экспериментальной оценки скорости передачи данных макета гидроакустического модема был разработан макет, с помощью которого проверялись используемые в модеме алгоритмы цифрового формирования и демодуляции сигналов. Для преобразования аналогового сигнала в акустические колебания использовался излучатель, основанный на пьезопленке. Схема эксперимента приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Схема эксперимента

Проверка разработанного макета осуществлялась в бассейне 25x8x2,5 метров. Расположение передатчика и приемника при экспериментальной проверке модема показано на рисунке 3.

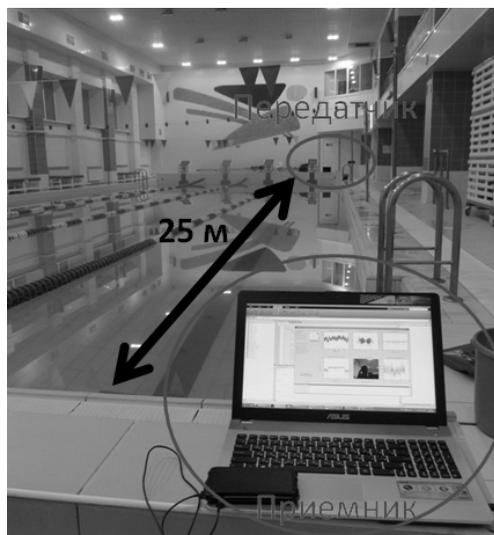


Рис. 3. Фотография эксперимента в бассейне 25 м

При проверке работоспособности модема в бассейне на дальности 25м получены технические характеристики, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3. Технические характеристики макета модема в бассейне на дальности 25м

Отношение сигнал/шум, дБ	20
Кол-во ошибок, %	0,5
Полоса сигнала, кГц	10
Модуляция	QAM-16
Скорость помехоустойчивого кодирования	2/3
Скорость передачи данных, Кбит/сек	25

Указанные в таблице 2 количественные характеристики отличаются не более чем на 5 % от результатов, полученных при моделировании работы алгоритмов гидроакустического модема. Вероятно, это обусловлено несовершенством модели гидроакустического канала, которое заключается, прежде всего, в различии значений реальных задержек и амплитуд отраженных сигналов от значений, генерируемых моделью гидроакустического канала.

**4. Заключение.** Испытания макета гидроакустического модема показали, что применяемые математические модели передатчика и приемника, а также гидроакустического канала позволяют с достаточной для

практики точно оценить ожидаемую скорость передачи данных и битовую вероятность ошибки.

Перспективными направлениями исследований в этой области являются: применение и синтез цифровых способов обработки сигналов, увеличение дальности связи, использование эффективных сигнально-кодовых конструкций, разработка новых принципов организации связи и т.д.

В результате проведенных исследований для разработки модема выбрана многочастотная модуляция, которая позволяет повысить скорость передачи информации в гидроакустическом канале и устранить искажения из-за многолучевого гидроакустического канала за счет цифровой обработки сигналов. Экспериментальная проверка работоспособности макета гидроакустического модема в бассейне подтвердила адекватность используемых при проектировании математических моделей.

### Литература

1. *Лантин С.В.* Гидроакустическая связь как средство управления силами военно-морского флота. Состояние, перспективы развития // Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: материалы конференции. 2005. URL: [http://shtil.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59](http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59) (дата обращения: 4.04.2016).
2. *Han S.* Evaluation of underwater optical-acoustic hybrid network // *China Communications*. 2014. vol. 11. no. 5. pp. 49–59.
3. *Pusey G., Duncan A.* An investigation of oceanographic parameters affecting acoustic modem performance for horizontal data transmission // *Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results*. Greece. 2009. pp. 1303–1308.
4. *Bowen A.D.* An un-tethered roV for routine access and intervention in the deep sea // *Oceans-San Diego*: IEEE. 2013. pp. 1–7.
5. *Khalighi M.A.* Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges // *Proceedings of IEEE 16<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2014. pp. 1–4.
6. *Yu X.* Wireline quality underwater wireless communication using high speed acoustic modems // *Proceedings of IEEE Conference and Exhibition*. 2000. vol. 1. pp. 417–422.
7. *Wills J., Ye W., Heidemann J.* Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks // *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*. 2006. pp. 79–85.
8. *Yan H.* A DSP implementation of OFDM acoustic modem // *Proceedings of the second workshop on Underwater networks*. 2007. pp. 89–92.
9. *Chitre M.* Underwater acoustic communications in warm shallow water channels. Ph.D. Thesis // *National University Of Singapore*. 2006. 149 p.
10. *Benson B.* Design of a low-cost underwater acoustic modem // *ESL*. 2010. vol. 2. no. 3. pp. 58–61.
11. *Кранц В.З., Сечин В.В.* О повышении скорости передачи системы связи со сложными сигналами в условиях многолучевого распространения // Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: материалы конференции. 2007. URL: [http://shtil.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59](http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59) (дата обращения: 4.04.2016).

12. *Ефимов С.Г.* Универсальный метод формирования дискретного шумоподобного сигнала с требуемыми параметрами // Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения: материалы конференции. 2003. URL: [http://shtil.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59](http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59) (дата обращения: 4.04.2016).
13. *Wang J.* Data collection with multiple mobile actors in underwater sensor networks // Proceedings of IEEE 28<sup>th</sup> International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS'08). 2008. pp. 216–221.
14. *Toso G.* Field experiments for dynamic source routing: S2C EvoLogics modems run the SUN protocol using the DESERT Underwater libraries // Proceedings of IEEE Conference on Oceans'12. 2012. pp. 1–10.
15. *Lynch J.F.* Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water // IEEE OES. 2010. vol. 35. no 1. pp. 12–27.
16. *Sato H., Fehler M.C., Maeda T.* Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth // Berlin: Springer. 2012. 496 p.
17. *Smirnov I.P., Gurbatov S.N., Khil'ko A.A.* Formation of high-frequency surface reverberation by excitation of directed acoustic pulses in oceanic waveguides // Radiophysics and quantum electronics. 2006. vol. 49. no 5. pp. 333–343.
18. *Abraham D.A., Lyons A.P.* Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar bandwidth and scattering patch size // IEEE OES. 2004. vol. 29. no. 1. pp. 126–137.
19. *Antoniu A.* Digital signal processing // Toronto: McGraw-Hill. 2006. 965 p.
20. *Sklyar B.* Digital communication. Theoretical Bases and Practical Application, 2nd ed. // Moscow: Williams. 2003. 1104 p.

## References

1. *Lapin S.V.* *Gidroakusticheskaja svjaz' kak sredstvo upravlenija silami voenno-morskogo flota. Sostojanie, perspektivy razvitiya Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznachenija: materialy konferencii. 2005.* [Hydroacoustic communication as a management tool forces the Navy. Condition, prospects of development communications and hydroacoustic sonar rescue purposes: conference materials. 2005]. Available at: [http://shtil.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59](http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59) (accessed: 4.04.2016). (In Russ.).
2. *Han S.* Evaluation of underwater optical-acoustic hybrid network. *China Communications*. 2014. vol. 11. no. 5. pp. 49–59.
3. *Pusey G., Duncan A.* An investigation of oceanographic parameters affecting acoustic modem performance for horizontal data transmission. Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results. Greece. 2009. pp. 1303–1308.
4. *Bowen A. D.* An un-tethered roV for routine access and intervention in the deep sea. Oceans-San Diego: IEEE. 2013. pp. 1–7.
5. *Khalighi M. A.* Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges. Proceedings of IEEE 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). 2014. pp. 1–4.
6. *Yu X.* Wireline quality underwater wireless communication using high speed acoustic modems. Proceedings of IEEE Conference and Exhibition. 2000. vol. 1. pp. 417–422.
7. *Wills J., Ye W., Heidemann J.* Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks. 2006. pp. 79–85.
8. *Yan H.* A DSP implementation of OFDM acoustic modem. Proceedings of the second workshop on Underwater networks. 2007. pp. 89–92.
9. *Chitre M.* Underwater acoustic communications in warm shallow water channels. Ph.D. Thesis. National University of Singapore. 2006. 149 p.

10. Benson B. Design of a low-cost underwater acoustic modem. *ESL*. 2010. vol. 2. no. 3. pp. 58–61.
11. Kranc V.Z., Sechin V.V. *O povyshenii skorosti peredachi sistemy svyazi so slozhnymi signalami v usloviyah mnogoluchevogo rasprostraneniya*. [On increasing the transmission rate of the communication system with complex signals in multipath conditions]. *Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznacheniya: materialy konferencii* [Hydroacoustic sonar communication and means of rescue purposes: Materials Conference]. 2007. Available at: [http://shtil.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59](http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59) (дата обращения: 4.04.2016).
12. Efimov S.G. *Universal'nyj metod formirovaniya diskretnogo shumopodobnogo signala s trebuemyimi parametrami* [Universal method of forming a discrete noise-like signal with the required parameters]. *Gidroakusticheskaja svjaz' i gidroakusticheskie sredstva avarijno-spasatel'nogo naznacheniya: materialy konferencii* [Hydroacoustic sonar communication means rescue purposes: Materials Conference]. 2003. Available at: [http://shtil.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59](http://shtil.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=59) (accessed: 4.04.2016). (In Russ.).
13. Wang J. Data collection with multiple mobile actors in underwater sensor networks. Proceedings of IEEE 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCS'08), 2008. pp. 216–221.
14. Toso G. Field experiments for dynamic source routing: S2C EvoLogics modems run the SUN protocol using the DESERT Underwater libraries. Proceedings of IEEE Conference on Oceans'12. 2012. pp. 1–10.
15. Lynch J.F. Acoustic ducting, reflection, refraction, and dispersion by curved nonlinear internal waves in shallow water. *IEEE OES*. 2010. vol. 35. no 1. pp. 12–27.
16. Sato H., Fehler M.C., Maeda T. Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Berlin: Springer. 2012. 496 p.
17. Smirnov I.P., Gurbatov S.N., Khil'ko A.A. Formation of high-frequency surface reverberation by excitation of directed acoustic pulses in oceanic waveguides. *Radiophysics and quantum electronics*. 2006. vol. 49. no 5. pp. 333–343.
18. Abraham D.A., Lyons A.P. Reverberation envelope statistics and their dependence on sonar bandwidth and scattering patch size. *IEEE OES*. 2004. vol. 29. no. 1. pp. 126–137.
19. Antoniou A. Digital signal processing. Toronto: McGraw-Hill, 2006. 965 p.
20. Sklyar B. Digital communication. Theoretical Bases and Practical Application, 2nd ed. Moscow: Williams. 2003. 1104 p.

**Вершинин Александр Сергеевич** — к-т техн. наук, младший научный сотрудник института неразрушающего контроля, Национальный исследовательский томский политехнический университет. Область научных интересов: радиолокация, радионавигация, цифровая обработка сигналов, антенно-фидерные устройства, адаптивные системы, системы синхронизации, системы связи. Число научных публикаций — 30. [as\\_vershinin@mail.ru](mailto:as_vershinin@mail.ru); пр. Ленина, 30, Томск, 634050; п.т.: +79138049464.

**Vershinin Alexander Sergeevich** — Ph.D., junior researcher of nondestructive testing institute, National Research Tomsk Polytechnic University. Research interests: radar, radio navigation, digital signal processing, antenna-feeder devices, adaptive systems, synchronization systems, communication systems. The number of publications — 30. [as\\_vershinin@mail.ru](mailto:as_vershinin@mail.ru); 30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation; office phone: +79138049464.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

**Acknowledgements.** The work is performed out of the grant funds in the framework of the Program for competitive growth of Tomsk Polytechnic University.

## РЕФЕРАТ

### *Вершинин А.С.* Экспериментальная оценка скорости передачи данных макета гидроакустического модема.

В настоящее время на рынке существует большое количество гидроакустических модемов, работающих на глубинах до 3000 метров и обеспечивающих скорость передачи данных достаточную для телеметрии, управления подводными аппаратами и передачи фотоснимков. Для исследования морского/океанического дна требуется погружать необитаемые подводные аппараты на глубину до 10000 метров, при этом необходимо обеспечить надежную связь с приемлемой скоростью передачи данных для управления подводным аппаратом. Добиться устойчивой связи на такой глубине довольно сложно.

Перспективными направлениями в этой области являются переход на цифровые способы обработки сигналов, увеличение дальности связи, использование эффективных сигнально-кодовых конструкций, разработка новых принципов организации связи и т.д. Проведенные проверки разработанного макета гидроакустического модема подтверждают его работоспособность.

В статье приведен сравнительный анализ существующих в настоящее время на рынке гидроакустических модемов. Приведены теоретические расчеты дальности действия разработанного гидроакустического модема. Представлены результаты экспериментальной проверки макета гидроакустического модема в бассейне.

## SUMMARY

### *Vershinin A.S.* Experimental Estimation of the Data Transfer Rate of a Hydroacoustic Modem Model.

Currently on the market there is a large number of hydroacoustic modems operating at depths of up to 3000 meters and providing a data rate sufficient for telemetry, underwater vehicles control and pictures transfer. To investigate the sea / ocean floor it is required to immerse the uninhabited underwater vehicles to a depth of 10,000 meters. Doing this, it is necessary to ensure reliable communication at reasonable data rates in order to control underwater vehicle. Achieving stable communication at such a depth is a difficult task.

The promising directions in this area include the transition to digital methods of signal processing; increasing the communication range; use of effective signal-code structures; development of new principles of organizing communication, etc. The conducted tests of the designed hydroacoustic modem model confirm its performance.

The paper presents a comparative analysis of the hydroacoustic modems currently available on the market. Theoretical calculations of the operating range of the developed modem are given. The results of the experimental verification of the hydroacoustic modem model in the pool are presented.

А.Д. ХОМОНЕНКО, Д.Ю. СТАРОБИНЕЦ, В.А. ЛОХВИЦКИЙ  
**МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОПЕРАТИВНОСТИ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА  
УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

---

*Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Лохвицкий В.А. Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли.*

**Аннотация.** Для оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли предлагается применение моделей разомкнутых сетей массового обслуживания. В моделях сетей узлы задаются многоканальными немарковскими системами массового обслуживания. Предложенная модель позволяет учесть затраты на сжатие графических изображений и их передачу при расчете распределения времени пребывания заявки в сетевой модели бортового комплекса управления.

**Ключевые слова:** сжатие графических изображений, сеть массового обслуживания, бортовые комплексы управления, оперативность функционирования бортовых комплексов управления.

*Khomonenko A.D., Starobinets D.Yu., Lokvitskii V.A. A Model of Estimating Quickness of Functioning of Onboard Control Systems of Spacecraft Remote Sensing of the Earth.*

**Abstract.** To assess the efficiency of functioning of the onboard control complex of spacecraft Earth remote sensing, it is proposed to use models of open queuing networks. For queuing networks, nodes are given by multi-channel non-Markov queuing systems. The proposed model allows one to take into account the costs for compressing and broadcasting the graphics in the calculation of the distribution of the residence time of the application in a network model.

**Keywords:** compression of graphic images; queuing network; on-board control systems; efficiency of functioning of onboard control complexes.

---

**1. Введение.** При проектировании и разработке бортовых комплексов управления (БКУ) космическими аппаратами (КА) весьма важным является решение задач обоснования производительности их аппаратно-программных комплексов и обеспечение требуемой оперативности функционирования БКУ с учетом состава решаемых задач, частот и характеристик трудоемкости. Принципы построения БКУ КА и общие подходы к их разработке рассмотрены в работах [1-2]. В работах [3-4] рассматриваются стандарты и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики КА.

В работе [5] дается систематическое изложение методов исследования эффективности ракетно-космической техники, в том числе здесь приводятся математические модели и алгоритмы для оценки производительности КА наблюдения на основе теории массового обслуживания. В частности, приведены основные этапы построения не-

которых частных моделей, необходимых для оценки производительности космической системы наблюдения. В работах [6, 7] рассматриваются вопросы оптимизации построения оптических спутниковых систем, в том числе в [7] затрагиваются вопросы оценивания производительности оптических спутников.

Для прогнозирования оперативности функционирования вычислительных комплексов и сетей различного целевого назначения и оценивания их производительности широко применяется математический аппарат теории массового обслуживания. Большое распространение получили модели многоканальных систем массового обслуживания (СМО). Например, в работах [8-9] рассматриваются модели многоканальных немарковских СМО с «разогревом», позволяющие учесть системные издержки при моделировании узлов вычислительных сетей. Для моделирования вычислительных сетей в целом применяются модели замкнутых и разомкнутых сетей массового обслуживания (СеМО) [10-12].

В настоящей статье предлагается подход к решению задачи оценивания оперативности функционирования БКУ КА дистанционно-зондирования Земли (ДЗЗ). Важной особенностью указанного типа КА является то, что к ним предъявляются высокие требования по своевременности предварительной обработки графической информации (с целью сжатия), передаваемой на Землю. В основе предлагаемого подхода положено использование вероятностной модели БКУ КА, задаваемой с помощью модели разомкнутой СеМО.

Предлагаемая модель предназначена для оценки оперативности функционирования БКУ КА ДЗЗ при условии дополнительного анализа изображений на борту КА с целью автоматизированного выбора коэффициента сжатия изображений, предложенного в работе [13]. Модель ориентирована на то, чтобы учесть затраты на сжатие графических изображений и их передачу при расчете распределения времени пребывания заявки в сетевой модели БКУ.

Основными решаемыми в настоящей статье задачами являются: определение параметров модели; задание исходных данных для моделирования с учетом современных тенденций, решений и характеристик бортовых вычислительных комплексов и информационных систем КА; расчет вероятностно-временных характеристик модели.

## **2. Характеристика бортовых комплексов управления КА.**

При разработке модели функционирования БКУ КА ДЗЗ, прежде всего целесообразно учитывать состав бортовых систем, перечень и характеристики решаемых ими задач. Состав бортовых систем КА приведен на рисунке 1[1].

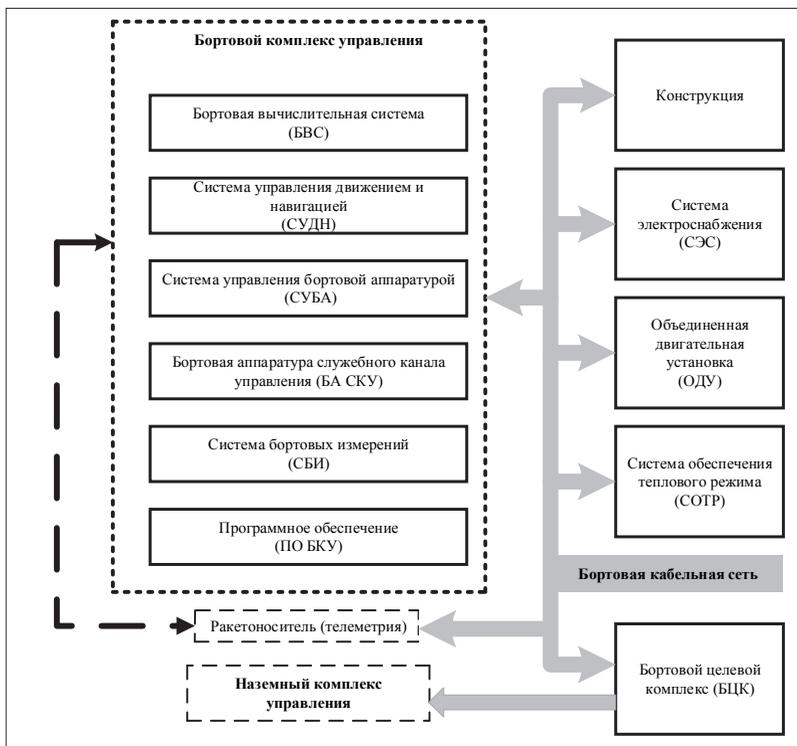


Рис. 1. Состав бортовых систем КА

Унифицированный бортовой вычислительный комплекс (БВК), учитывающий тенденции в современных зарубежных и отечественных проектах, представляет собой распределенную вычислительную систему, включающую системный контроллер, высокопроизводительную микроЭВМ MicroPC и специализированные контроллеры [2].

Перспективная структура бортового вычислительного комплекса КА приведена на рисунке 2, где использованы следующие сокращения: КИС — командно-измерительная система; АД — астродатчик; АСН — аппаратура спутниковой навигации; ССИ — система сбора измерений; РК — разовые команды.

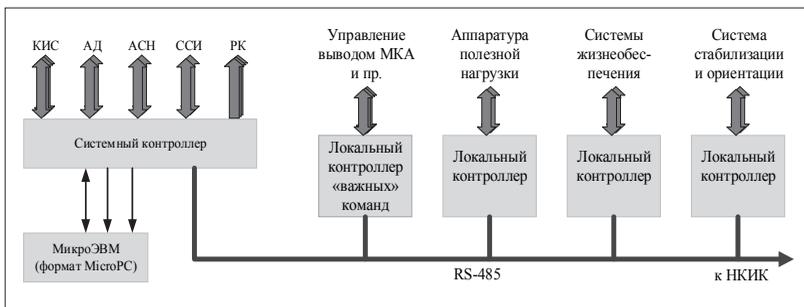


Рис. 2. Перспективная структура БВК КА

С учетом стандартов и современных тенденций в [3] предложена концепция построения архитектуры системы интеллектуальной поддержки космических систем, в том числе на основе использования методов высокопроизводительных вычислений.

Работа системы ориентирована на охват таких перспективных направлений как интеллектуальное управление, когнитивная графика, нейронные сети. Предполагается, что встраивание средств ИИ может быть реализовано путем установки специального программного обеспечения на управляющую ЭВМ.

На рисунке 3 приведена типовая архитектура системы обработки информации. Управление КА предполагает, что с ним поддерживается хорошо налаженная, устойчивая двусторонняя радиосвязь, которую обеспечивает антенная система.



Рис. 3. Типовая архитектура системы обработки информации

Необходимо обозначить исходные данные, выделить основные параметры, определяющие решение задачи управления, а также выбрать методы ее решения.

**3. Моделирование процесса функционирования БКУ КА ДЗЗ на основе не экспоненциальной разомкнутой СеМО.** На начальном этапе для оценивания оперативности функционирования БКУ (на основе анализа вычислительной структуры и информационных потоков) производится формирование исходных данных, создается структура СеМО и характеристики узлов сети.

При составлении матрицы переходов учитываются частоты и трудоемкость обрабатываемых задач. Телеметрическая и командно-программная информация занимает незначительный объем и передается несколько раз в сутки.

В свою очередь, периодичность получения специальной информации для систем оптико-электронного наблюдения может достигать до 25 раз в сутки. При этом поток исходной обзорной космической информации составляет около 120 Гб в сутки. Кроме того, для мониторинга последствий пожаров и оценки эмиссий вредных газов в атмосферу, используются данные среднего и высокого разрешения, объем которых может достигать ~ 100 Гб в сутки.

Суммарный объем потоков данных, получаемых при оперативном космическом мониторинге для обнаружения и оценки последствий пожаров на территории Российской Федерации, достигает ~ 220 Гб в сутки. Близкий объем космических данных (~ 280 Гб в сутки) формируется государственной территориально-распределенной системой космического мониторинга Росгидромета. Подобные объемы информации формируются и другими спутниковыми, а также воздушными системами мониторинга [14].

Исходя из состава бортовых систем КА (рисунок 1), структуры БВК (рисунок 2) и архитектуры систем обработки информации (рисунок 3), построим разомкнутую СеМО с 8 рабочими узлами (рисунок 4). В данной сети узел S1 — БВС, узел S2 — СУДН, узел S3 — СУБА, узел S4 — КИС, узел S5 — системный контроллер (СК), узел S6 — целевая аппаратура приема и обработки графической информации (ЦА), узел S7 — СБИ, S8 — БА СКУ (антенная система). Исходя из решаемых задач, устанавливается следующее число каналов в узлах (таблица 1):

Таблица 1. Число каналов обслуживания в узлах СеМО

Узел	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Количество каналов	8	2	3	4	8	6	2	4

Выбор средней интенсивности входящего потока определяется исходя из максимально оговоренной стандартом RS-485 скорости обмена 2400 кбит/с и максимальным объемом данных, который может быть передан протоколом Ethernet в одном пакете (одна заявка на обслуживание), MTU=1500 байт, что позволяет установить среднюю интенсивность входящего в сеть потока  $\Lambda=200$  запросов в секунду.

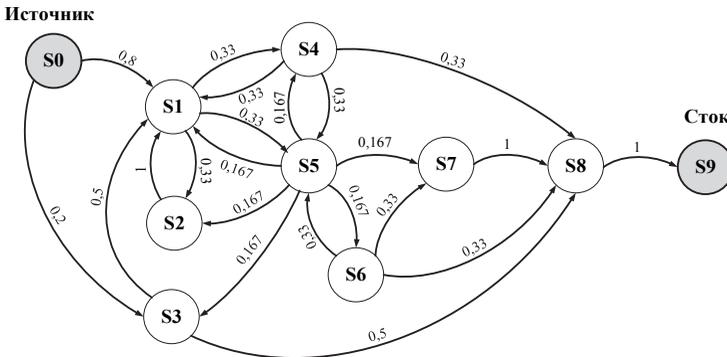


Рис. 4. Схема разомкнутой CeMO

Каждый рабочий узел рассматриваемой CeMO представлен в виде многоканальной немарковской СМО типа  $M/H_2/n$  (рисунок 5).

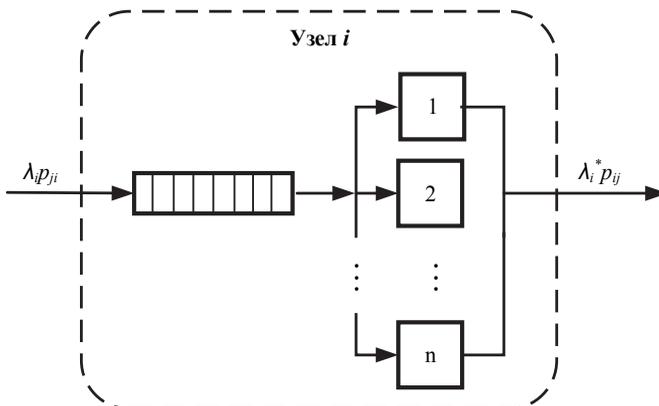


Рис. 5. Схема многоканального узла сети на основе СМО  $M/H_2/n$

Модель многоканального не экспоненциального узла G-сети на основе СМО  $M/H_2/n$  содержит следующие основные элементы:

$n$  — число каналов обслуживания в  $i$ -м узле;

$\lambda_i$  — средняя интенсивность входящего в  $i$ -й узел потока заявок;

$\lambda_i^*$  — средняя интенсивность потока обслуженных заявок в  $i$ -м узле;

$p_{ji}$  — вероятность перехода заявки из  $j$ -го в  $i$ -й узел сети.

**4. Расчет СеМО, моделирующей БКУ КА ДЗЗ.** Расчет разомкнутой немарковской СеМО осуществляется по следующей схеме [11]:

1. Рассчитываются средние интенсивности входящих в узлы потоков заявок на основе матрицы передач и средней интенсивности суммарного входящего потока заявок в сеть путем решения системы уравнений баланса потоков:

$$\lambda_i = A p_{0,i} + \sum_{j=1}^M \lambda_j p_{j,i}, \quad i = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где  $A$  — средняя интенсивность суммарного входящего потока заявок.

Так как потоки в СеМО простейшие, то после решения системы (1) можно рассчитать каждый узел СеМО как изолированную систему:

– рассчитать распределение числа заявок в узле;

– рассчитать характеристики узла.

2. Определяются агрегированные характеристики распределения времени пребывания заявок в сети.

Каждый узел представим в виде СМО  $M/H_2/n$  [9, 11]. В качестве исходных данных задаются множества микросостояний  $S_j$ , при которых на обслуживании находится ровно  $j$  заявок, количество элементов в  $S_j - \sigma_j$ , матрицы переходов:

1)  $A_j[\sigma_j \times \sigma_{j+1}]$  в  $S_{j+1}$  — прибытие заявки;

2)  $B_j[\sigma_j \times \sigma_{j-1}]$  в  $S_{j+1}$  — завершение обслуживания целевой заявки;

3)  $D_j[\sigma_j \times \sigma_j]$  — ухода из состояний яруса  $j$ , а также векторы-строки вероятностей нахождения СМО в состоянии  $(j, i)$ :

$$V_j = \{V_{j,1}, V_{j,2}, \dots, V_{j,\sigma_j}\}.$$

Расчет характеристик таких СМО подразумевает построение диаграмм и соответствующих матриц переходов [9, 11], составление

векторно-матричных уравнений баланса переходов между состояниями вида:

$$\begin{aligned} \gamma_0 D_0 &= \gamma_1 B_1, \\ \gamma_j D_j &= \gamma_{j-1} A_{j-1} + \gamma_{j+1} B_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Решение указанных уравнений основано на реализации расчетной схемы Гаусса-Зейделя и использовании итерационного алгоритма Такахаши-Таками [9, 11, 15, 16].

Характеристики узлов сети рассчитываются на основе метода пересчета, предложенного в [11]. Для расчета характеристик времени пребывания заявки в узле необходимо:

1. Вычислить факториальные моменты  $\{f_{[k]}\}$ ,  $k = \overline{1, 3}$ , распределения длины очереди:

$$f_{[k]} = \sum_{i=k}^{\infty} i(i-1)\dots(i-k+1)p_{i+n}. \quad (3)$$

2. По формулам Брюмелля [11] получить моменты распределения времени ожидания:

$$\omega_k = f_{[k]} / \lambda^k. \quad (4)$$

3. Сверткой в моментах распределений времени ожидания и обслуживания получить моменты распределений пребывания заявки в узле:

$$v^k = (\omega + b)^k. \quad (5)$$

На завершающем этапе с помощью свертки начальных моментов распределений времен ожидания и чистого обслуживания заявок производится расчет распределения времени пребывания заявки в сети [15, 16] и строится его дополнительная функция распределения (ДФР).

Для нахождения начальных моментов распределения пребывания заявки в сети из матрицы передач выделяются [11]:

– вектор-строка вероятностей перехода из источника в конкретные рабочие узлы  $P = \{r_{0,1}, r_{0,2}, \dots, r_{0,M}\}$ ;

– вектор-столбец вероятностей перехода из рабочих узлов в сток  $\Gamma = \{r_{1,M+1}, r_{2,M+1}, \dots, r_{M,M+1}\}^T$ ;

– матрица вероятностей переходов между рабочими узлами  $Q = \{r_{i,j}\}$ ,  $i, j = \overline{1, M}$ .

Кроме того, определяется диагональная матрица  $N(s)$  преобразований Лапласа  $\{v_i(s)\}$  распределений времени пребывания в рабочих узлах и формируется матрица:

$$\Gamma(s) = N(s)Q. \quad (6)$$

Преобразование Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) распределения длительности  $k$ -шаговых переходов в сток:

$$\gamma_k(s) = P\Gamma^{k-1}(s)N(s)T. \quad (7)$$

Полное ПЛС распределения времени пребывания заявки в сети вычисляется по формуле:

$$\gamma(s) = \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k(s) = P \left( \sum_{k=0}^{\infty} \Gamma^k(s) \right) N(s)T = P(I - \Gamma(s))^{-1}N(s)T. \quad (8)$$

Моменты  $\{v_{ij}\}$  распределения времени пребывания в сети вычисляются путем численного дифференцирования  $\gamma(s)$  в нуле. Для проведения численных расчетов искомым характеристикам (рисунок 4) использовался программный комплекс [17], позволяющий рассчитать начальные моменты распределения времени пребывания заявки в узлах в соответствии с (1)-(8), и в сети путем численного дифференцирования  $\gamma(s)$  в нуле.

В таблице 2 представлены начальные моменты распределения времени пребывания заявки в узлах.

Таблица 2. Начальные моменты распределения времени пребывания заявки в узлах

№ узла	$v_1$	$v_2$
1	0,87	3,62
2	17,87	767,07
3	8,56	177,39
4	8,33	206,78
5	2,43	26,00
6	0,76	2,83
7	6,92	140,48
8	2,06	10,26

Начальные моменты распределения времени пребывания заявки в сети составляют  $v_{c1} = 44,77$ ,  $v_{c2} = 4556,85$ .

При выборе параметров сжатия узел целевой аппаратуры S6 выполняет дополнительно функции анализа изображений. В результате уменьшения объема передаваемого изображения при увеличении коэффициента сжатия уменьшается поток заявок в узел S8. Также

уменьшается поток заявок в S6 от системного контроллера S5, поскольку загруженный дополнительно узел не успевает обработать тот же поток заявок, что был ранее.

Перераспределение потока заявок приводит к пропорциональному увеличению потоков из S6 в S5 и S7, а также из S5 в остальные смежные узлы. Как показывают численные расчеты характеристик СеМО, в результате увеличивается общее время пребывания заявки в сети.

Графики ДФР распределения времени пребывания заявки в узлах и в сети в целом приведены на рисунке 6.

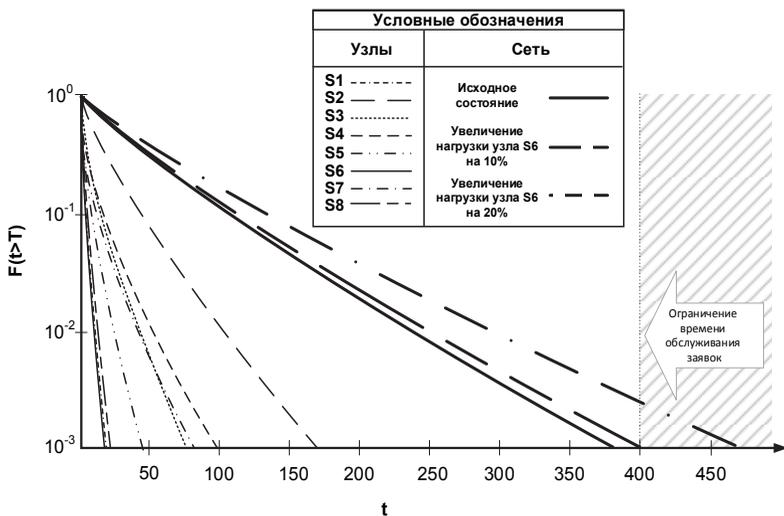


Рис. 6. ДФР распределения времени пребывания заявки в узлах и в сети

Из рисунка 6 видно, что любая заявка, приходящая в сеть, будет обслужена за время не больше 375 мс с вероятностью 0.999.

В соответствии с графиком (рисунок 2), при дополнительной загрузке узла S6 на 10% и 20% время пребывания заявки в сети увеличивается на 9% и 26%. Таким образом, в зависимости от характеристик аппаратуры и быстродействия алгоритмов анализа изображений с целью выбора коэффициента сжатия, можно установить предельные значения времени пребывания заявки в сети, при которых обеспечиваются требования по оперативности функционирования БКУ КА ДЗЗ.

**5. Заключение.** Предложенная модель оценивания оперативности функционирования БКУ позволяет оценить время, затрачиваемое на обработку и передачу информации в КА дистанционного зондирования Земли с учетом перераспределения нагрузки на элементы БКУ,

вызванного дополнительной обработкой изображений на борту КА в целях автоматического определения параметров сжатия.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в следующих направлениях: повышение точности обоснования автоматизированного выбора коэффициента сжатия изображений БКУ КА ДЗЗ на основе оценки инвариантных моментов [18-19]; оценивание влияния организации параллельной обработки информации [20] по сжатию изображений на оперативность функционирования БКУ КА ДЗЗ.

## Литература

1. *Гобчанский О.* Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. 2001. № 4. С. 28–34.
2. *Микрин Е.А. и др.* Принципы построения бортовых комплексов управления автоматических космических аппаратов // Проблемы управления. 2004. № 3. С. 62–66.
3. *Талалаев А.А., Фраленко В.П., Хачумов В.М.* Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2015. № 3(26). С. 21–43.
4. *Gao X., Zhang T., Liu H., Gong J.* Spacecraft Fault Diagnosis Based on Telemetry Data Mining and Fault Tree Analysis and Design of Expert System // Advanced Materials Research. 2013. pp. 1062–1066.
5. *Куренков В.И., Гоголев М.Ю.* Методы исследования эффективности ракетно-космической техники // Самара: Издательство СГАУ им. С.П. Королева. 2012. 285 с.
6. *Denisov A.V., Demin A.V., Letunovskiy A.V.* Optical Digital Systems and Complexes for Space Applications // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. № 4. pp. 16–22.
7. *Perret L., Boussarie E., Lachiver I.M., Damilano P.* The Pleiades System High Resolution optical satellite and its performance // Proceedings of 53rd IAC/World Space Congress. Houston. 2002. С. 1.
8. *Sun B., Dudin A.N.* The MAP/PH/N multi-server queuing system with broadcasting service discipline and server heating // Automatic Control and Computer Sciences. 2013. vol. 47. no. 4. pp. 173–182.
9. *Khomonenko A.D., Gindin S.I.* Stochastic models for cloud computing performance evaluation // Proceedings of the 10<sup>th</sup> Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. 2014. С. 20.
10. *Baskett F., Chandy K.M., Muntz R.R., Palacios F.* Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers // VJACM. 1975. vol. 22. no. 2. pp. 248–260.
11. *Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д.* Расчет разомкнутых немарковских сетей с преобразованием потоков // Автоматика и вычислительная техника. 1989. № 3. С. 15–24.
12. *Pujolle G., Ai W.* A solution for multiserver and multiclass open queueing network // INFOR. 1986. vol. 24. no. 3. pp. 221–230.
13. *Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Уваров В.А.* Выбор параметров сжатия изображений с потерями на основе их характеристических свойств // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 4(33). С. 78–85.
14. *Бондур В.Г., Резнев А.А.* О применении суперкомпьютеров для обработки потоков аэрокосмических изображений // Материалы 2-й Всероссийской научно-технической конференции. 2012. С. 338–345.

15. Рыжиков Ю.И., Лохвицкий В.А. Расчет узла сети с отрицательными заявками // Сборник трудов по материалам российской конференции «Информационные технологии в управлении». Спб. 2012. С. 354–359.
16. Рыжиков Ю.И., Лохвицкий В.А. Время решения задачи в сети с отрицательными заявками // Сборник трудов по материалам российской конференции «Информационные технологии в управлении». Спб. 2012. С. 360–365.
17. Рыжиков Ю.И., Лохвицкий В.А. Программный комплекс анализа немарковских систем и сетей массового обслуживания с положительными и отрицательными заявками // Патент РФ, № 2012616617. 2012
18. Жигалко Е. Ф. Особенность асимптотических свойств интегральных инвариантов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. № 4(4). С. 55–58.
19. Hu M. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants / M. Hu // IRE Trans. Inf. Theory. 1962. vol. 8. P. 179–187.
20. Басыров А.Г., Лебедев Д.М., Мастин А.Б. Планирование параллельной обработки информации в высокопроизводительных вычислительных системах бортовых комплексов управления космическими аппаратами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 74–77.

## References

1. Gobchanskij O. [The problem of creating on-board computing systems of small satellites]. *Sovremennye tehnologii avtomatizacii – Modern automation technology*. 2001. no. 4. pp. 28–34. (In Russ.).
2. Mikrin E.A. et. al. [The Principles of Board control of automatic space devices]. *Problemy upravlenija – Control sciences*. 2004. no. 3. pp. 62–66. (In Russ.).
3. Talalaev A.A., Fralenko V.P., Nachumov V.M. [A review of standards and the concept of building monitoring tools, monitoring and diagnostics spacecraft]. *Programmnye sistemy: teorija i prilozhenija – Program systems: theory and applications*. 2015. no. 3(26). pp. 21–43. (In Russ.).
4. Gao X., Zhang T., Liu H., Gong J. Spacecraft Fault Diagnosis Based on Telemetry Data Mining and Fault Tree Analysis and Design of Expert System. *Advanced Materials Research*. 2013. pp. 1062–1066.
5. Kurenkov V.I., Gogolev M.JU. *Metody issledovanija jeffektivnosti raketno-kosmicheskoy tehniki* [Methods for investigating the efficiency of rocket and space technology]. Samara: Publishing house of Korolev Samara State Aerospace University. 2012. 285 p. (In Russ.).
6. Denisov A. V., Demin A. V., Letunovskiy A. V. Optical Digital Systems and Complexes for Space Applications. *Intellektual'nye tehnologii na transporte – Intellectual Technologies on Transport*. 2015. no. 4. pp. 16–22.
7. Perret L., Boussarie E., Lachiver I.M., Damilano P. The Pleiades System High Resolution optical satellite and its performance. Proceedings of 53rd IAC/World Space Congress. Houston. 2002. C. 1.
8. Sun B., Dudin A.N. The MAP/PH/N multi-server queuing system with broadcasting service discipline and server heating. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2013. vol. 47. no. 4. pp. 173–182.
9. Khomonenko A.D., Gindin S.I. Stochastic models for cloud computing performance evaluation. Proceedings of the 10th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia. 2014. C. 20.
10. Baskett F., Chandy K.M., Muntz R.R., Palacios F. Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers. *IJACM*. 1975. vol. 22. no. 2. pp. 248–260.

11. Ryzhikov Y.I., Khomonenko A.D. [Calculation of open-loop non-Markovian networks with conversion flows]. *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika – Automation and computer engineering*. 1989. no. 3. pp. 15–24. (In Russ.).
12. Pujolle G., Ai W. A solution for multiserver and multiclass open queuing network. *INFOR*. 1986. vol. 24. no. 3. pp. 221–230. (In Russ.).
13. Komonenko A.D., Starobinets D.Y., Uvarov V.A. [Choice of parameters of image compression with losses on the basis of their characteristic properties]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija – Proceedings of St. Petersburg University of means of communication*. 2012. no. 4 (33). pp. 78–85. (In Russ.).
14. Bondur V.G., Reznev A.A. [On the use of supercomputers for processing of aerospace images]. *O primenении superkomp'yutеров dlja obrabotki potokov ајерокоsmических изображений. Материалы 2-ј Всероссийской научно-технической конференции*. [Materials of the 2nd all-Russian scientific-technical conference]. Spb. 2012. pp. 338–345. (In Russ.).
15. Ryzhikov Y.I., Lohvitskii V.A. [Calculation node of the network with negative customers]. *Raschet uzla seti s otricatel'nymi zajavkami. Sbornik trudov po materialam rossijskoј konferencii «Informacionnye tehnologii v upravlenii* [Collection of works on materials of the Russian conference "Information technologies in management"]. Spb. 2012. pp. 354–359. (In Russ.).
16. Ryzhikov Y.I., Lohvitskii V.A. [Time of solving the problem in a network with negative customers]. *Vremja reshenija zadachi v seti s otricatel'nymi zajavkami. Sbornik trudov po materialam rossijskoј konferencii «Informacionnye tehnologii v upravlenii»* [Collection of works on materials of the Russian conference "Information technologies in management"]. Spb. 2012. pp. 360–365. (In Russ.).
17. Ryzhikov Y.I., Lohvitskii V.A. *Programmnyj kompleks analiza nemarkovskih sistem i setej massovogo obsluzhivaniја s polozhitel'nymi i otricatel'nymi zajavkami* [Software for analysis of non-Markovian systems and Queuing networks with negative and positive applications]. Patent RF, no. 2012616617. 2012.
18. Zhigalko E.Th. [A Singularity of Integral Moment Invariants]. *Intellektual'nye tehnologii na transporte – Intellectual Technologies on Transport*. 2015. no. 4(4). pp. 55–58. (In Russ.).
19. Hu M. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. *IRE Trans. Inf. Theory*. 1962. vol. 8. pp. 179–187.
20. Basyrov A.G., Lebedev D.M., Mastin A.B. [Planning for the parallel processing of information in high-performance computer systems onboard spacecraft control systems]. *Mehatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*. 2011. no. 1. pp. 74–77. (In Russ.).

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и вычислительных систем, ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: численная теория массового обслуживания, программирование, операционные и информационные системы. Число научных публикаций — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; п.т.: 8(812)457-80-23, Факс: 8(812)310-75-25.

**Khomonenko Anatoly Dmitrievich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of information and computing systems department, Petersburg State Transport University. Research interests: queuing systems, artificial intelligence, databases. The number of publications — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: 8(812)457-80-23, Fax: 8(812)310-75-25.

**Старобинец Дмитрий Юрьевич** — преподаватель кафедры математического обеспечения ЭВМ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: обработка изображений, численная теория массового обслуживания, программирование, операционные и информационные системы. Число научных публикаций — 7. [norf12@rambler.ru](mailto:norf12@rambler.ru); ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-95-25.

**Starobinets Dmitriy Yurievich** — teacher of computer software department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: image processing, queuing systems, artificial intelligence, databases. The number of publications — 7. [norf12@rambler.ru](mailto:norf12@rambler.ru); 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-95-25.

**Лохвицкий Владимир Александрович** — к-т техн. наук, доцент кафедры математического и программного обеспечения, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: математическое моделирование, численные методы, технологии разработки программного обеспечения, качество программного обеспечения, методы машинного обучения. Число научных публикаций — 35. [vovan296@mail.ru](mailto:vovan296@mail.ru); ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-95-25.

**Lokvitskii Vladimir Aleksandrovich** — Ph.D., associate professor of mathematical and software department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: math modeling, numerical methods, software development technology, software quality, machine learning. The number of publications — 35. [vovan296@mail.ru](mailto:vovan296@mail.ru); 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-95-25.

## РЕФЕРАТ

### *Хомоненко А.Д., Старобинец Д.Ю., Лохвицкий В.А.* **Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли.**

В статье предлагается модель оценки функционирования БКУ КА ДЗЗ при условии дополнительного анализа изображений на борту КА с целью оптимизации выбора коэффициента сжатия изображений. Для оценивания оперативности функционирования БКУ КА ДЗЗ предлагается применение моделей разомкнутых сетей массового обслуживания (СеМО) с узлами, представленными многоканальными немарковскими системами массового обслуживания (СМО). Предложенная модель позволяет учесть затраты на сжатие графических изображений и их передачу при расчете распределения времени пребывания заявки в сетевой модели БКУ.

Исходные данные для моделирования информационных процессов в БКУ КА ДЗЗ получены на основе анализа унифицированного бортового вычислительного комплекса (БВК), учитывающего тенденции в современных зарубежных и отечественных проектах, который представляет собой распределенную вычислительную систему, включающую системный контроллер, высокопроизводительную микроЭВМ MicroPC и специализированные контроллеры.

Исходя из состава бортовых систем КА, структуры БВК и архитектуры систем обработки информации, строится разомкнутая СеМО, каждый рабочий узел которой представлен в виде многоканальной немарковской СМО типа M/H2/n.

Расчет СеМО осуществляется путем решения системы уравнений баланса потоков с использованием расчетной схемы Гаусса-Зейделя и итерационного алгоритма Такахаши-Таками, в результате которого рассчитываются характеристики узла и определяются агрегированные характеристики распределения времени пребывания заявок в сети.

На завершительном этапе с помощью свертки начальных моментов распределений времен ожидания и чистого обслуживания заявок производится расчет распределения времени пребывания заявки в сети и строится его дополнительная функция распределения.

Предложенная модель позволяет учесть перераспределение потока заявок СеМО при увеличении нагрузки на целевую аппаратуру обработки изображений и оценить оперативность БКУ КА ДЗЗ с учетом затрат на анализ и сжатие изображений.

## SUMMARY

### *Khomonenko A.D., Starobinets D.Yu., Lokvitskii V.A.* **A Model of Estimating Quickness of Functioning of Onboard Control Systems of Spacecraft Remote Sensing of the Earth.**

The article discusses the evaluation model of the functioning of the onboard control systems of spacecraft remote sensing of the Earth (CSSRS) providing an additional image analysis on-board the spacecraft to optimize the choice of the compression ratio of the images. For estimating the efficiency of functioning CSSRS, it is proposed to use models of open queueing networks (QN) with the nodes represented by non-Markovian multichannel queueing systems (QS). The proposed model allows one to take into account the cost for compression of graphic images and their transfer in the calculation of the distribution of the residence time of the application in the net-work model of CSSRS.

The source data for modeling of information processes in CSSRS is obtained based on the analysis of a standardized onboard computer system (CS), taking into account the trends in modern foreign and domestic projects, which is a distributed computing system that includes a system controller, high-performance microcomputers and specialized MicroPC controllers.

Based on the composition of the onboard systems of the spacecraft, CS structure and architecture of information processing systems, an open QN is constructed, every worker node of which is presented in the form of non-Markovian multichannel queueing systems QS type M/H2/n.

The QN calculation is realized by solving the system of equations of stream balance using the calculated scheme of the Gauss-Seidel iterative algorithm of Takahashi-Takami, in which the characteristics of the node are calculated, and the aggregated characteristics of the residence time distribution of requests in the network are determined.

At the finishing stage, by means of a convolution of the initial moments of the distributions of waiting times and clean service of applications, the calculation of the residence time distribution of the application in the network is carried out, and its complementary distribution function is built.

The proposed model allows one to take into account the redistribution of the flow of applications of QN with the increasing workload on the target hardware image processing and to assess the efficiency of CSSRS including the costs for analysis and image compression.

С.В. ВАСЬКОВ, А.Н. ЖУКОВ, А.Ю. КОВАЛЕНКО  
**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ НАВИГАЦИОННО-  
БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННЫХ  
ДАННЫХ**

---

*Васьков С.В., Жуков А.Н., Коваленко А.Ю. Актуальные проблемы использования в технологических циклах навигационно-баллистического обеспечения космических систем прецизионных эфемеридно-временных данных.*

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы сложившихся противоречий требований к тактико-техническим характеристикам перспективных космических систем и традиционных технологий навигационно-баллистического обеспечения. Проведена формализация задачи системного анализа состояния и путей модернизации навигационно-баллистического обеспечения космических систем на основе использования в контуре управления прецизионных данных системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок, необходимости их применения на этапах создания, испытаний и эксплуатации как космических систем, так и перспективных средств вооружений, использующих в системах управления аппаратуру радионавигации. Обоснована необходимость использования математического прецизионного эталона при организации технологических циклов навигационно-баллистического обеспечения перспективных космических систем.

**Ключевые слова:** системный анализ, обработка измерительной информации, фазовые измерения, эталонная орбита, априорная и апостериорная информации, состоятельная оценка, прецизионные данные.

*Vaskov S.V., Zhukov A.N., Kovalenko A.Y. Current Problems of Using Precision Ephemeris and Time Data in Technological Cycles of Navigation-Ballistic Support of Space Systems.*

**Abstract.** This paper questions the existing contradictions between the requirements for the performance characteristics of advanced space systems and traditional technologies of navigation-ballistic support. We have carried out the formalization of the task of systematic analysis of the status and ways of modernizing navigation-ballistic support of space systems on the basis of using in the control loop precision data from systems for high-accuracy determination of ephemeris and time corrections. We have shown the need to apply these data during the stages of creation, testing and operation of not only space systems but also promising means of weapons that use radio navigation equipment in control systems. The necessity for a standard of mathematical precision in the organization of technological cycles of navigation-ballistic support of advanced space systems is substantiated.

**Keywords:** system analysis; processing of measuring data; phase measurements; the perturbations of the reference orbit; a priori and a posteriori information; consistent assessment; data precision.

---

**1. Введение.** В настоящее время наземный автоматизированный комплекс управления (НАКУ) космическими аппаратами (КА) представляет собой организационно-техническую систему, предназначенную для управления орбитальными группировками (ОГ) КА различного целевого назначения: военного, двойного, а также частью автомати-

ческих КА научного и социально-экономического назначения. Однако эффективность этого управления невелика, особенно по сравнению с зарубежными аналогами [1].

Как показывают результаты анализа требований по управлению целевым применением КА военного и двойного назначения, к 2020–2025 гг. [2] уровень основных тактико-технических характеристик НАКУ должен существенно возрасти и составить по различным показателям:

- пропускная способность — 90–100 КА к 2020 году и до 120–130 КА к 2025 году;

- оперативность управления низкоорбитальными КА — не более 30 мин. к 2020 году и в масштабе времени, близком к реальному к 2025 году;

- оперативность управления высокоорбитальными КА — в масштабе времени, близком к реальному;

- вероятность выполнения сеанса управления КА — 0,99 к 2020 году и 0,999 к 2025 году.

Системообразующим звеном управления является навигационно-баллистическое обеспечение, ключевым показателем которого служит точность определения и прогнозирования параметров движения центра масс КА. Точностные требования для различных космических систем (КС) и космических комплексов (КК) могут существенно отличаться (от нескольких сотен метров до дециметров) как для апостериорного, так и оперативного режимов [3].

Гарантированное достижение предъявляемых к НАКУ требований возможно только при внедрении новых технологий управления КА, иначе создаваемые КС и КК в части управления целевым применением принципиально не превзойдут по своим характеристикам существующие образцы [4].

К новым ресурсосберегающим технологиям управления КА в части навигационно-баллистического обеспечения следует отнести наряду с прочими применение систем автономной спутниковой навигации (навигационной аппаратуры), использующих в технологическом контуре сигналы космических навигационных систем ГЛОНАСС/GPS и данные систем функциональных дополнений [5].

Ожидаемый эффект применения новых технологий управления КА заключается в том, что все они в том или ином виде приводят к снижению объемов и интенсивности обмена командно-программной и измерительной информацией между наземными средствами НАКУ и бортовым комплексом управления КА. Это, в свою очередь, ведет к сокращению необходимого количества и длительности проводимых сеансов

управления КА, тем самым обеспечивая реализацию технологического цикла управления меньшим количеством технических средств, меньшей численностью личного состава дежурных смен и расчетов, меньшим объемом материально-технического обеспечения НАКУ, меньшим объемом финансирования и т.д.

Однако это входит в противоречие с возложенным на НАКУ КА функционалом в связи со снижением объема исходных данных.

Следует также отметить возросшие требования к точности координатно-временного навигационного обеспечения (КВНО) перспективных космических систем. Для некоторых классов низкоорбитальных КА точность КВНО в оперативном режиме должна обеспечивать дециметровый уровень.

## **2. Анализ состояния и путей модернизации навигационно-баллистического обеспечения космических систем.**

Указанное сокращение количества технических средств не должно привести к снижению общей эффективности управления ОГ КА до 2020 года, так как будет в основном компенсировано [2]:

– оснащением к 2020 году всех низкоорбитальных КА наблюдения, а затем и высокоорбитальных КА связи и ретрансляции бортовыми средствами автономной спутниковой навигации (АСН), работающих по навигационному полю системы ГЛОНАСС/GPS. Это приведет к кардинальному сокращению объемов траекторной информации (сеансов измерений, которые составляют до 70% общего количества сеансов связи с КА) и соответствующему снижению как числа задействуемых измерительных средств, так и территориальных объектов НАКУ, где они размещены;

– использованием режимов информационного обмена с КА (прежде всего низкоорбитальными) командно-программной и измерительной информацией через спутники-ретрансляторы. Это позволит значительно уменьшить (в перспективе — полностью сократить) число сеансов управления КА, осуществляемых в режиме непосредственного информационного обмена, возможности которого существенно ограничены границами зон прямой радиовидимости КА с наземными командно-измерительными станциями (КИС);

– выводом из состава НАКУ объектов, технические средства которых полностью ориентированы на управление ГЛОНАСС.

Как показывают предварительные расчеты, переход на ретрансляционные режимы информационного обмена с КА в сочетании с оснащением КА системами автономной спутниковой навигации и выводом из состава НАКУ объектов, технические средства которых полностью ориентированы на управление ГЛОНАСС, теоретически позво-

ляют ограничить состав НАКУ 3-4 отдельными командно-измерительными комплексами (ОКИК) [2]. Однако, исходя из практических соображений и опыта управления КС, к 2020 году представляется целесообразным ориентироваться на цифру в 6-8 ОКИК.

Основу развития наземного комплекса управления глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС как ключевого средства высокоточного КВНО спецпотребителей в период до 2020 года и на дальнейшую перспективу должно составлять его поэтапное выделение в самостоятельную организационно-техническую структуру (единицу) в составе НАКУ с собственной номенклатурой технических средств.

Тем самым, в прогнозируемый период система ГЛОНАСС станет играть иерархически главенствующую (эталонирующую) роль по отношению к космическим системам наблюдения, связи и ретрансляции.

Однако детальный анализ возможности достижения требований по точности КВНО системы ГЛОНАСС показал невозможность экстенсивными (расширением состава средств наземного контура управления и повышением их тактико-технических характеристик) методами достичь требуемых характеристик, определенных Федеральной целевой программой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» [4]. Необходима существенная технологическая модернизация.

Для потребителей, к которым предъявлены требования дециметровой точности навигации в абсолютном режиме, необходимо использовать ассистирующие данные систем функциональных дополнений системы ГЛОАСС — прежде всего, системы прецизионной навигации МО РФ (СПН МО), создаваемой к 2019 году путем модернизации системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП).

СПН МО предназначена для [6]:

- обеспечения специальных потребителей, имеющих контролируемый доступ к навигационной информации функциональных дополнений системы ГЛОНАСС, ассистирующей информацией в реальном масштабе времени для оперативного координатно-временного и навигационного обеспечения с повышенной точностью и надежностью;

- обеспечения специальных потребителей прецизионной навигационной информацией для решения задач высокоточного координатно-временного и навигационного обеспечения в режиме постобработки;

- оперативной оценки тактико-технических характеристик зарубежных навигационных систем и сравнения их с тактико-техническими характеристиками системы ГЛОНАСС в заданных районах РФ;

- обеспечения оперативного эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) системы ГЛОНАСС исходными данными для достижения заданных точностных характеристик системы ГЛОНАСС;
- резервирования оперативного ЭВО системы ГЛОНАСС;
- обеспечения специальных потребителей систематизированной оперативной и апостериорной навигационно-временной информацией по развернутым системам, а также гелиогеофизической информацией для решения прикладных и фундаментальных координатно-временных задач в апостериорном режиме.

В этой связи необходимо отметить необходимость использования в контуре управления КА системы прецизионной навигации МО РФ в качестве нового высокоточного инструментария по реализации требований к точностным характеристикам системы ГЛОНАСС и навигационной аппаратуры потребителя систем управления перспективных КС [7].

Математические модели и методы уточнения и прогнозирования движения навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС, реализованные в СВОЭВП, позволили достигнуть прецизионного класса точности орбитальных параметров [8]. В настоящее время это дециметровый уровень точности по беззапросной и лазерной измерительной информации глобальной сети. Наиболее наглядно данный уровень точности можно оценить относительно лазерных измерений квантово-оптических систем (КОС), точность которых находится на уровне 1-2 см. Результаты интервального оценивания апостериорных эфемерид СВОЭВП навигационных КА, проведенные в первой половине апреля 2015 года относительно проведенных измерений лазерной дальности, представлены на рисунке 1.

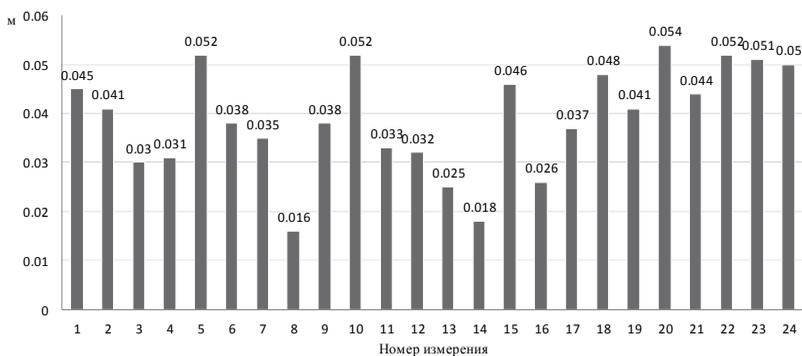


Рис. 1. Оценка отклонений апостериорного эталона относительно лазерных измерений КОС

Как видно из результатов оценок отклонения не превышают 6 см, в среднем — 3 см, что сопоставимо с погрешностью измерений лазерной дальности самих КОС.

Одной из наиболее показательных величин для анализа достижимости точностных характеристик является эквивалентная погрешность псевдодальности ОГ КА. При известном геометрическом факторе ОГ точность местоопределения потребителя на поверхности Земли прямо пропорциональна эквивалентной погрешности псевдодальности. Анализ эквивалентной погрешности псевдодальности системы ГЛОНАСС на месячном интервале оценки по данным СВОЭВП не превышает 35 см, в среднем — 20 см, что на порядок лучше оперативных данных (за 2014 г. 2,8-3,5 м).

**3. Прикладные аспекты использования прецизионных эталонных данных.** Оценивание точностных характеристик системы управления КА осуществлялось в ходе эксперимента по одновременному проведению и оценке измерений разнотипных средств и оценке точности определения параметров движения КА «Гарпун» на пассивном участке полета КА (без проведения динамических операций) в период с 26.03.2012 по 28.03.2012 [6]. На указанном интервале проводились одновременно (с учетом возможностей и ограничений на работу средств) измерения бортовой АСН, оптических средств и средств наземного комплекса управления КА.

Оценка точности определения параметров движения КА и точности измерительной информации осуществлялась по методикам, основанным на сопоставлениях результатов решения целевой задачи по разнотипным измерениям, при этом определение параметров движения по измерительной информации АСН производилось с использованием апостериорной эфемеридно-временной информации (точность эфемерид — 30-40 см) на интервале проведения эксперимента [9]. Точностные характеристики параметров движения КА в виде отклонений по положению ( $\Delta R$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta D$ ) бортовых векторов состояния (БВС) (07h00m30s 26.03.12) относительно орбиты, определенной по измерениям АСН с использованием данных СВОЭВП представлены на рисунке 2.

Анализ представленных данных показывает, что отклонения БВС относительно орбиты, определённой по измерениям АСН, составляют:

- по расстоянию не более 107 м;
- по скорости не более 1 см/с.

В результате комплексного анализа проведенных оценок были получены статистические результаты, позволившие сделать вывод, что потенциальная точность определения параметров орбиты по измерениям АСН находится на уровне (предельная погрешность):

- вдоль орбиты 700 м;
- в боковом направлении 100 м.

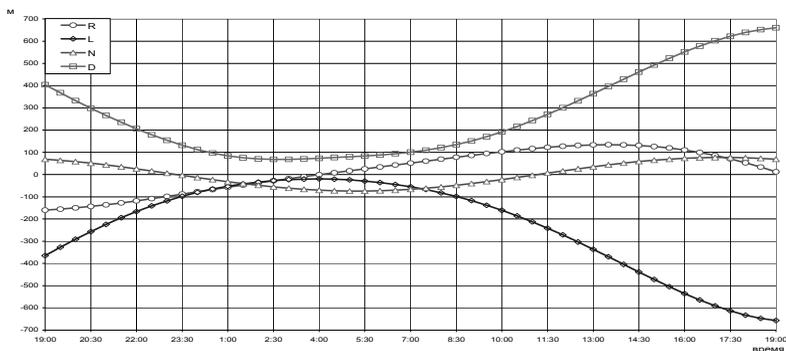


Рис. 2. Отклонения по положению ( $\Delta R$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta D$ ) БВС относительно эталона.

Внедрение в циклы управления КА с автономными системами навигации рассмотренной выше технологии по предварительным оценкам способно в 2-3 раза повысить точность координатных методов определения и, как следствие, методов управления существующих и перспективных КС [10].

Особое значение данная технология имеет для геостационарных КА [6]. Решение целевой задачи по АСН в этом случае проводится в разрывном навигационном поле по классической схеме избыточной измерительной информации. Развивая это направление, появляется возможность оценивания не только точностных характеристик АСН, но и эффективности построения бортовых алгоритмов систем управления.

В итоге появляется возможность через улучшение точностных характеристик системы управления КА минимизировать энергетические затраты на маневры удержания (приведения) КА и, как следствие, увеличивать сроки активного существования КС.

Особо следует отметить другой важный эффект от формируемых расчетных данных СВОЭВП — возможность реализации прецизионного геодезического обеспечения любого класса потребителей, оснащенных АСН, на основе использования апостериорных методов уточнения расширенного состава исходных геодезических данных. Точность геодезической привязки при использовании данных СВОЭВП достигает миллиметрового уровня на месячном интервале оценивания и сантиметрового — на недельном.

Наряду с оценкой точностных характеристик работы бортовых систем и прецизионным топогеодезическим обеспечением использование прецизионных эфемеридно-временных данных позволяет реализовать дистанционную калибровку бортовых АСН, что в перспективе позволит увеличить точность координатно-временного обеспечения.

Одним из основных источников погрешностей частотно-временного обеспечения космических навигационных систем, контро-

ля их навигационного поля, а также решения навигационных задач потребителями являются погрешности, обусловленные погрешностями частотных и канальных калибровок, а также трактов формирования навигационных сигналов [11].

Наличие таких погрешностей объясняется не только проблемами с эталонной базой проведения калибровок бортовой аппаратуры навигационных КА и АСН, но и является неизбежным из-за невозможности обеспечения идентичности реальных условий работы навигационной аппаратуры и условий ее работы при проведении стендовых калибровок.

Следует отметить, что отсутствие эталонного навигационного приемника не позволяет обеспечить определение абсолютных величин погрешностей калибровок бортовых АСН [3].

Расчетные калибровочные данные формируются на интервале (не менее 10 суток) с использованием данных АСН и прецизионных эфемеридно-временных данных СВОЭВП. На основании измерений псевдодальности определяются калибровочные поправки, которые могут предоставляться спецпотребителям и разработчикам навигационной аппаратуры. Стендовые испытания показывают, что учет данных калибровочных поправок в бортовом комплексе управления КА может обеспечить точность навигации КА в реальном масштабе времени, сопоставимую с точностью навигации наземного потребителя.

**4. Заключение.** На основе представленного анализа можно сделать вывод об эффективности применения технологий высокоточного НБО в системах управления объектами на основе АСН и в высокоточном оружии большой дальности как в апостериорном, так и оперативном режимах.

Использование прецизионных эфемеридно-временных данных позволит обеспечить достижение требуемых точностных характеристик перспективных космических средств и средств высокоточного вооружения, а также повысить эффективность проведения испытаний и эксплуатации этих средств.

### Литература

1. Брагинец В.Ф., Жуков А.Н. Перспективы развития функциональных дополнений системы ГЛОНАСС для обеспечения высокоточного определения положения в реальном времени и апостериорном режиме // Труды института прикладной астрономии РАН. 2013. № 27. С. 119–125.
2. Жуков А.Н., Титов Е.В. Основные направления повышения точности эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС // Труды института прикладной астрономии РАН. 2013. № 27. С. 190–196.
3. Жуков А.Н., Зотов С.М.И., Пасынков В.В., Суслов А.Ю., Федотов А.А., Шаргородский В.Д. Предварительные результаты мониторинга навигационных систем с использованием системы контроля целевых характеристик ГНС ГЛОНАСС // Труды института прикладной астрономии РАН. 2012. № 23. С. 189–195.
4. Новая федеральная целевая программа по поддержке развития системы ГЛОНАСС // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. 2011. № S1. С. 47.
5. Былинин К.Е., Горбачёв О.А., Иванов В.Б., Хазанов Д.В. Сравнительная оценка точности позиционирования одночастотной аппаратуры систем ГЛОНАСС и

GPS // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2011. № 171. С.78–83.

6. Официальный сайт ОАО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения». URL: <http://npk-spp.ru>. (дата обращения: 18.03.2016).
7. Данилюк А.Ю., Пасынков В.В., Жуков А.Н. Направления развития фундаментального обеспечения в интересах системы ГЛОНАСС // Труды института прикладной астрономии РАН. 2012. № 23. С. 41–46.
8. Жуков А.Н., Зотов С.М., Шаргородский В.Д. Принципы действия и использования беззапросных квантово-оптических систем для калибровки беззапросных радиотехнических измерительных средств // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2013. № 27. С.26–33.
9. Толстиков А.С., Тиссен В.М. Параметры вращения земли в задачах эфемеридно-временного обеспечения ГЛОНАСС и результаты, достигнутые в их прогнозировании // Мир измерений. 2012. № 6. С. 43–49.
10. Дворкин В.В., Карутин С.Н., Куришин В.В. Методика мониторинга глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС с помощью системы дифференциальной коррекции и мониторинга // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 32-37.
11. Алексеев В.Е., Крыльников Н.О., Соловьев А.Н. Сравнение эффективности применения многоантенных навигационных систем GPS и совмещенной ГЛОНАСС/GPS // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 2(94). С.71–76.

## References

1. Braginec V.F., Zhukov A.N. [Prospects of development of the functional additions of the GLONASS system to achieve high precision position determination in real time and a posteriori mode]. *Trudy Instituta prikladnoj astronomii RAN – Proceedings of Institute of applied astronomy of the Russian Academy of Sciences*. 2013. no. 27. pp. 119–125. (In Russ.).
2. Zhukov A.N., Titov E.V. [The main directions of improving the accuracy of ephemeris support of GLONASS]. *Trudy Instituta prikladnoj astronomii RAN – Proceedings of Institute of applied astronomy of the Russian Academy of Sciences*. 2013. no. 27. pp. 190–196. (In Russ.).
3. Zhukov A.N., Zotov S.M., Pasyнков V.V., Suslov A.Yu., Fedotov A.A., Shargorodskij V.D. [Preliminary results of the monitoring of navigation systems used the use of the control target characteristics of GLONASS]. *Trudy Instituta prikladnoj astronomii RAN – Proceedings of Institute of applied astronomy of the Russian Academy of Sciences*. 2012. no. 23. pp. 189–195. (In Russ.).
4. [New federal target program to support the development of the GLONASS system]. *T-Comm: telecommunications and transport*. 2011. no. S1. p. 47. (In Russ.).
5. Bylinin K.E., Gorbachev O.A., Ivanov V.B., Khazanov D.B. [Comparative evaluation of the positioning accuracy of single frequency equipment of GLONASS and GPS]. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviacii – Scientific Bulletin of Moscow state technical University of civil aviation*. 2011. no. 171. pp. 78–83. (In Russ.).
6. Oficial'nyj sajt Nauchno-proizvodstvennoj korporacii «Sistemy precizionnogo priborostroeniya» [Official web site of research and production Corporation «Precision Systems and instruments»]. Available at: <http://npk-spp.ru>. (accessed 18.03.2016). (In Russ.).
7. Daniljuk A.Ju., Pasyнков V.V., Zhukov A.N. [Directions of development of the fundamental security interests of the GLONASS system]. *Trudy Instituta prikladnoj astronomii RAN – Proceedings of Institute of applied astronomy of the Russian Academy of Sciences*. 2012. no. 23. pp. 41–46. (In Russ.).
8. Zhukov A.N., Zotov S.M., Shargorodskij V.D. [Principles of operation and use of no-request quantum-optical systems for calibration of radio no-request measuring means].

*Trudy Instituta prikladnoj astronomii RAN – Proceedings of Institute of applied astronomy of the Russian Academy of Sciences.* 2013. no. 27. pp. 26–33. (In Russ.).

9. Tolstikov A.S., Tissen V.M. [Parameters of the earth's rotation in the problems of ephemeris and time support GLONASS and the results achieved in their forecasting]. *Mir izmerenij – The world of measurement.* 2012. no. 6. pp. 43–49. (In Russ.).
10. Dvorkin V.V., Karutin S.N., Kurshin V.V. [Method of monitoring global navigation satellite system GLONASS system of differential correction and monitoring]. *Izmeritel'naja tehnika – The measuring technique.* 2012. no. 3. pp. 32–37. (In Russ.).
11. Alekseev V.E., Krylikov N.O., Soloviev A.N. [The comparison of efficiency many antenna navigation systems GPS and combined GPS/GLONASS]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektronika – News of higher educational institutions. Electronics.* 2012. no. 2(94). pp. 71–76. (In Russ.).

**Васьков Сергей Владимирович** — начальник управления, управление навигационно-баллистического обеспечения управления КА и РБ, оценки эффективности применения космических средств. Область научных интересов: экспериментальная баллистика, теория полета космических аппаратов, применение методов статистического оценивания при навигационно-баллистическом обеспечении перспективных космических систем, математическое моделирование. Число научных публикаций — 24. [sergvasserg@yandex.ru](mailto:sergvasserg@yandex.ru); Октябрьская ул. 3, Краснознаменск, Московская область, 143090; р.т.: +7(812) 237-19-60.

**Vaskov Sergey Vladimirovich** — head of department, navigation and ballistic support, evaluating the effectiveness of space assets department. Research interests: experimental ballistics, the theory of flight of space vehicles, the use of statistical estimation methods in navigation and ballistic software for advanced space systems, mathematical modeling. The number of publications — 24. [sergvasserg@yandex.ru](mailto:sergvasserg@yandex.ru); 3, October str., Krasnoznamenck, Moscow region, 143090, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

**Жуков Александр Николаевич** — к-т техн. наук, главный конструктор, филиал «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» Акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (филиал «ПНБО» ОАО «НПК» СПП)), Область научных интересов: экспериментальная баллистика, теория полета космических аппаратов, априорные методы статистического оценивания, математическое моделирование. Число научных публикаций — 47. [www.mail@nprk-spp.ru](mailto:www.mail@nprk-spp.ru); Авиамоторная ул. 53, Москва, 111024.

**Zhukov Alexander Nikolaevich** — Ph.D., chief designer, branch of high-precision navigation and ballistic support of research and production Corporation «Precision Systems and instruments». Research interests: experimental ballistics, the theory of flight spacecraft, a posteriori methods of statistical estimation, mathematical modeling. The number of publications — 47. [www.mail@nprk-spp.ru](mailto:www.mail@nprk-spp.ru); 53, Aviamotornaya str., Moscow, 111024, Russia.

**Коваленко Алексей Юрьевич** — к-т техн. наук, старший преподаватель кафедры навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полета летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: экспериментальная баллистика, теория полета космических аппаратов, математическое моделирование. Число научных публикаций — 32. [al\\_nex\\_239@mail.ru](mailto:al_nex_239@mail.ru); ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 237-19-60.

**Kovalenko Aleksey Yuryevich** — Ph.D., senior lecturer of navigation and ballistic support of the use of space assets and the theory of the flight of aircraft department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: experimental ballistics, theory of flight spacecraft, mathematical modeling. The number of publications — 32. [al\\_nex\\_239@mail.ru](mailto:al_nex_239@mail.ru); 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

## РЕФЕРАТ

*Васьков С.В., Жуков А.Н., Коваленко А.Ю.* **Актуальные проблемы использования в технологических циклах навигационно-баллистического обеспечения космических систем прецизионных эфемеридно-временных данных.**

В данной статье рассматриваются проблемные вопросы использования в технологических циклах навигационно-баллистического обеспечения космических систем прецизионных эфемеридно-временных данных. Проанализированы сложившиеся противоречия между требованиями к тактико-техническим характеристикам перспективных космических систем и традиционных технологий навигационно-баллистического обеспечения.

Проведена формализация задачи системного анализа состояния и путей модернизации навигационно-баллистического обеспечения космических систем на основе использования в контуре управления прецизионных данных системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок, необходимости их применения. На основании экспериментальных данных осуществлено оценивание точности определения параметров движения КА и точности измерительной информации. В результате системного анализа проведенных оценок были получены статистические результаты, позволившие сделать вывод о необходимости и целесообразности использования математического прецизионного эталона при организации технологических циклов навигационно-баллистического обеспечения перспективных космических систем.

## SUMMARY

*Vaskov S.V., Zhukov A.N., Kovalenko A.Y.* **Current Problems of Using Precision Ephemeris and Time Data in Technological Cycles of Navigation-Ballistic Support of Space Systems.**

This article discusses the problematic issues of using precision ephemeris and time data in technological cycles of navigation-ballistic support of space systems.

Existing contradictions between the requirements to performance characteristics of advanced space systems and traditional technologies of navigation-ballistic support are analyzed.

The formalization of the task of systematic analysis of the status and ways of modernizing navigation-ballistic support of space systems on the basis of using in the control loop precision data from systems for high-accuracy determination of ephemeris and time corrections is carried out. Based on experimental data we have estimated the accuracy of definition of spacecraft motion parameters as well as the accuracy of measurement data. During the integrated analysis of the estimations we have obtained statistical results which show the necessity and feasibility of mathematical precision standard in the organization of technological cycles of navigation-ballistic support of advanced space systems.

Р.Ю. БУДКО, И.Б. СТАРЧЕНКО  
**СОЗДАНИЕ КЛАССИФИКАТОРА МИМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМИОГРАММЫ**

---

*Будко Р.Ю., Старченко И.Б. Создание классификатора мимических движений на основе анализа электромиограммы.*

**Аннотация.** В статье описаны результаты обработки электромиограммы (ЭМГ) и результаты распознавания мимических движений алгоритмом радиальной базисной функции нейронной сети (НС). В качестве входного вектора признаков использовались девять признаков-функций ЭМГ во временной области. Наиболее высокая точность распознавания и скорость обучения получены для признака «Максимальные значения», наихудший результат получен для признака «Среднее арифметическое». На основе полученных данных предложен алгоритм распознавания движений. Классификатор может применяться для создания интерфейсов вида «человек-машина».

**Ключевые слова:** электромиограмма, мимические движения, распознавание, обработка сигнала, искусственные нейронные сети, извлечение признаков, радиальная базисная функция нейронной сети.

*Budko R.Yu., Starchenko I.B. Creation of the Facial Gestures Classifier Based on the Electromyogram Analysis.*

**Abstract.** The article presents the results of an experiment on the facial muscles electromyographic signal processing (EMG) based on the algorithm of radial basis function neural networks (NN). We have studied the efficiency of using as input for training NN nine signs of EMG learned as a function of time. The best result was obtained for the criterion Maximum Picked Value. The worst result was obtained for the criterion Mean Value. We have proposed a gesture recognition algorithm. The resulting algorithm and the neural network based on it can be used in the construction of a human-machine interface.

**Keywords:** electromyography; facial movements; recognition; signal processing; artificial neural networks; feature extraction; radial basis function of neural network.

---

**1. Введение.** Распознавание мимики человека может играть важную роль в клинико-диагностических исследованиях (в т.ч. в неврологии); в оценке результатов, достигнутых при использовании терапевтических методов, нейрохирургических операций; Также может использоваться для бесконтактного управления различными устройствами, в т.ч. инвалидными колясками, протезами конечностей и пр. Несмотря на то, что по данной тематике имеется ряд публикаций [1-3], некоторые направления остаются раскрытыми недостаточно полно. Поэтому целью данной работы являлся анализ одного из таких направлений: оценки возможностей распознавания мимики на основе исследования характеристик лицевого электромиографического (ЭМГ) сигнала.

**2. Методология.** Для того чтобы различать различные мышечные движения, должны быть извлечены наиболее значимые

части ЭМГ (признаки), которые представляют собой характеристики с достаточной для классификации информацией. По данным предыдущих исследований, для классификации ЭМГ-сигналов верхних конечностей применялись различные типы функций в частотной области, такие как коэффициенты авторегрессии, коэффициенты косинусного преобразования Фурье и вейвлет-коэффициенты [4]. В различных приложениях были использованы другие типы признаков ЭМГ [5-6].

В соответствии с предыдущими исследованиями лицевых ЭМГ сигналов, имеются существенные ограничения при анализе по спектральным характеристикам из-за сходства их частотных составляющих [7].

Более подходящими для анализа являются признаки во временной области на основе амплитуд сигналов. Такие признаки могут быть легко вычислены, обладают высокой стабильностью для распознавания образов с помощью ЭМГ [7-8]. Для достижения лучших результатов, функция (признак) должна содержать достаточное количество информации, чтобы представлять существенные свойства сигнала, и должна быть достаточно простой для быстрой обработки и классификации [6].

Авторами предлагается использование в качестве признаков девяти величин (параметров) во временной области, измеренных как функции времени: (1) интегральная ЭМГ; (2) среднее арифметическое; (3) среднее значение модуля; (4) конечные разности; (5) сумма элементарных площадей; (6) дисперсия; (7) среднеквадратичное отклонение; (8) длина сигнала; (9) максимальное значение ЭМГ.

Формулы для расчета этих величин сведены в таблицу 1, подробное описание и критерии выбора рассмотрены в [9].

Приведенная совокупность признаков, с точки зрения авторов, обладает свойствами «необходимости и достаточности» в отношении задачи распознавания мимических жестов в контексте данного исследования.

Признаки 1-9 вычисляются на основе амплитуды сигнала лицевой поверхностной электромиограммы (т.е. регистрируемой не инвазивно, а с поверхности кожи). Очевидно, что некоторые из них сходны между собой. В процессе обработки экспериментальных данных будет произведена оценка эффективности каждой из них и выбор наиболее надежных признаков из представленных в этой группе.

Таблица 1. Временные функции для выделения признаков

Название функции (признака)	Математическое выражение
Интегральная (или комплексная) ЭМГ ( <i>IEMG, ИЭМГ</i> ) где $N$ — число отсчетов в сегменте, $x_i$ — отображает мгновенную амплитуду ЭМГ-сигнала в $k$ -том сегменте $i$ -ой точки отсчета	$IEMG_k = \sum_{i=1}^N  x_i $
Среднее арифметическое ( <i>MV</i> )	$MV_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$
Среднее значение модуля ( <i>MAV</i> )	$MAV_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  x_i $
Среднее абсолютное значение наклона кривой (вычисление конечных разностей) ( <i>MAVS</i> )	$MAVS_k = MAV_{k+1} - MAV_k$
Суммирование элементарных площадей ( <i>SSI</i> )	$SSI_k = \sum_{i=1}^N  x_i^2 $
Дисперсия сигнала ( <i>VAR</i> )	$VAR_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( x_i - \bar{x} \right)^2$
Среднеквадратичное отклонение ( <i>STD</i> )	$STD_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$
Длина сигнала ( <i>WL</i> )	$WL_k = \sum_{i=1}^{N-1}  x_{i+1} - x_i $
Максимальное значение ( <i>MAX</i> )	$x_k = \max  x_i $

По данным предыдущих исследований известно об удачных реализациях классификаторов на основе нейронных сетей для классификации мимики по миоэлектрическим признакам [6-10]. В данной статье предполагается использование нейронной сети на основе радиальных базисных функций для классификации мимической ЭМГ. Основным преимуществом такой сети является то, что она может обучаться с помощью наборов данных в течение нескольких эпох, что делает ее мощным инструментом в отношении обучения на поступающих образцах в режиме реального времени. Эта процедура подготовки очень быстрая по сравнению с традиционными нейронными сетями (такими как сети прямого распространения), и для нее требуется сравнительно небольшое количество памяти [11-12].

Данный алгоритм также нацелен на оценку степени влияния каждого признака на производительность системы.

Структура этой сети, изображенная на рисунке 1, состоит из трех слоев.

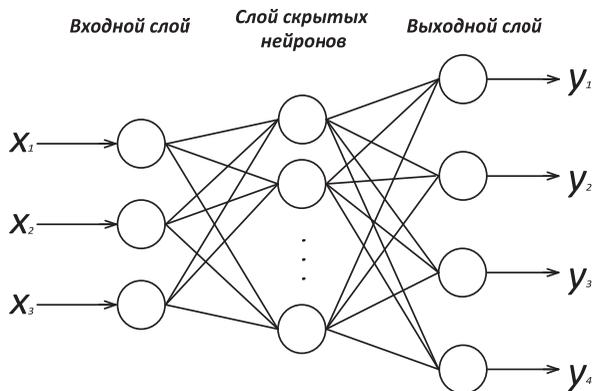


Рис. 1. Структура нейронной сети на основе радиальной базисной функции

Во входном слое количество нейронов равно размерности вектора признаков, который был равен трем в данном исследовании:  $x_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Скрытый слой, где число нейронов не было определено заранее, так как они были сформированы в ходе процедуры обучения, был разделен на четыре суб-скрытых слоя (по количеству классов в «учебных данных»). В выходном слое число нейронов было равно количеству классов в наборе обучающих данных (четыре нейрона). Этот метод был предложен Сайконом Джаеном, и его робастность была проверена и подтверждена на различных наборах данных [8].

### 3. Экспериментальная часть и препроцессирование.

Экспериментальная часть исследования была реализована при помощи следующего оборудования и программного обеспечения:

1. Система БОС "Кинезис", разработчик НМФ «Нейротех», регистрационное удостоверение № ФСР 2010/07176 от 29 марта 2010;
2. Программное обеспечение электронейромиографической системы «Синапсис», разработчик НМФ Нейротех;

Последующая обработка и распознавание сигнала проводились при помощи следующего программного обеспечения:

1. Программный пакет MATLAB, разработчик The MathWorks.
2. Программный пакет STATISTICA, разработчик Dell, компания StatSoft.
3. Программа Microsoft Office Excel, разработчик Microsoft.

Для съема электромиографического сигнала в данной работе использовались поверхностные одноразовые электроды диаметром 1 см, расположенные на расстоянии 2 см. Сигнал снимался биполярно, для уменьшения влияния шумовой составляющей [13].

В исследовании принимали участие десять психически и физически здоровых добровольцев в возрасте от 19 до 26 лет (5

мужчин и 5 женщин). Все участники были обучены следующим мимическим движениям:

- Сжатие челюстей.
- Улыбка «до ушей».
- Поднятие бровей.
- Сведение бровей.

Первый и второй жесты активируют височные мышцы, третий и четвертый — лобную мышцу.

Для обезжиривания и удаления следов пота кожа была очищена с помощью спиртовых салфеток. Чтобы получить сигнал с более высокой амплитудой, электроды размещались на активно сокращающейся части — брюшке мышцы [13-16].

Участники выполняли каждое мимическое движение 5 раз по 2 секунды (активный сигнал), с 5-секундным отдыхом между мышечным сокращением для устранения эффекта мышечной усталости.

Запись и предварительная фильтрация сигнала были произведены с помощью программного обеспечения электронейромиографической системы «Синапис». По результатам записи проб была получена база данных по участникам.

Процедуры препроцессирования и извлечения признаков описаны авторами в [9]. Выполнена предварительная обработка сигнала: процедуры по снижению уровня шума, фильтрации, сглаживанию, сегментации, понижению размерности, выделению признаков. Изучена и произведена оценка эффективности использования в качестве входных признаков для обучения нейронной сети девяти признаков ЭМГ, извлеченных как функция времени. Для данного исследования были выбраны: интегральная ЭМГ, среднее арифметическое, среднее значение модуля, вычисление конечных разностей, сумма элементарных площадей, дисперсия, среднееквадратичное отклонение, длина сигнала, максимальное значение. Оценка эффективности признаков проводилась по двум главным параметрам — производительность нейронной сети и время обучения — как наиболее важным для использования в приложениях реального времени [9].

**4. Классификация и точность распознавания.** В таблице 2 представлены классификация и точность распознавания, полученные нейронной сетью на основе радиальной базисной функции для всех признаков и участников, а также средние результаты с указанием стандартного отклонения и погрешности.

Сеть обучалась различными признаками, в итоге средняя точность классификации на этапе обучения по всем признакам для каждого участника была в пределах 63-94%. Максимальная степень точности была достигнута по признаку «Максимальное значение» (93.6%). По результатам, полученным на этапе тестирования и

обучения, видно, что способность нейронной сети к распознаванию мимики варьируется в зависимости от типа используемых функций. Например, несмотря на то, что по признаку «Среднее арифметическое» сеть обучалась с производительностью 63,3%, средняя точность распознавания для него всего 53,6%. В графах «Максимум (Тест)» и «Минимум (Тест)» указаны лучшие и худшие результаты каждого участника на основе всех проведенных тестов. Испытуемые 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10 достигли максимальной производительности распознавания за счет использования признака «Максимальное значение»; испытуемые 6, 7 — за счет использования «Суммирование элементарных площадей»; испытуемый 1 получил лучшие результаты при использовании признака «Интегральная ЭМГ».

Таблица 2. Классификация и точность распознавания для каждого участника; Среднее значение, стандартное отклонение, и средняя абсолютная ошибка(%)

Испыту- емый	Признак	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ср.±Ст.о.	Погр.,%
		ИЕМГ	Обучение	98,4	95,2	90,7	94,0	94,7	91,5	85,5	78,3	86,3	92,8
	Тест	<b>97,9</b>	<b>92,0</b>	<b>91,5</b>	<b>92,5</b>	<b>92,0</b>	<b>85,0</b>	<b>84,0</b>	<b>80,0</b>	<b>77,5</b>	<b>90,0</b>	<b>88,3±6,4</b>	<b>11,7</b>
MV	Обучение	59,0	76,0	64,0	63,0	66,0	60,0	61,0	57,5	61,3	65,3	63,3±5,2	36,7
	Тест	<b>54,5</b>	<b>66,5</b>	<b>51,0</b>	<b>53,5</b>	<b>59,0</b>	<b>59,0</b>	<b>44,5</b>	<b>42,0</b>	<b>48,0</b>	<b>58,0</b>	<b>53,6±7,5</b>	<b>46,4</b>
MAV	Обучение	97,4	96,3	93,0	92,5	97,8	94,5	88,2	79,0	85,0	93,3	91,7±6,0	8,3
	Тест	<b>98,5</b>	<b>96,5</b>	<b>94,0</b>	<b>92,0</b>	<b>96,5</b>	<b>94,0</b>	<b>82,0</b>	<b>74,5</b>	<b>81,5</b>	<b>91,0</b>	<b>90,1±8,0</b>	<b>9,9</b>
MAV S	Обучение	60,6	66,0	60,0	61,4	65,1	65,3	67,3	60,6	63,3	60,6	63,0±2,7	37
	Тест	<b>59,0</b>	<b>59,0</b>	<b>59,0</b>	<b>58,8</b>	<b>59,2</b>	<b>58,0</b>	<b>56,3</b>	<b>51,8</b>	<b>54,8</b>	<b>40,7</b>	<b>55,7±5,9</b>	<b>44,3</b>
SSI	Обучение	95,0	97,8	94,0	93,3	97,0	94,5	88,5	82,3	85,5	94,2	92,2±5,1	7,8
	Тест	<b>93,9</b>	<b>96,0</b>	<b>90,5</b>	<b>90,0</b>	<b>98,5</b>	<b>93,0</b>	<b>83,0</b>	<b>78,0</b>	<b>82,5</b>	<b>88,5</b>	<b>89,4±6,5</b>	10,6
VAR	Обучение	95,3	95,5	89,8	92,5	97,5	95,0	88,0	80,8	86,0	91,5	91,2±5,2	8,8
	Тест	<b>96,0</b>	<b>94,0</b>	<b>88,5</b>	<b>90,5</b>	<b>96,0</b>	<b>92,0</b>	<b>83,5</b>	<b>74,5</b>	<b>81,5</b>	<b>89,0</b>	<b>88,6±6,9</b>	<b>11,4</b>
STD	Обучение	98,4	94,5	89,3	89,3	98,0	93,3	87,0	82,0	82,5	90,8	90,5±5,7	9,5
	Тест	<b>97,5</b>	<b>96,5</b>	<b>88,5</b>	<b>88,0</b>	<b>93,5</b>	<b>94,5</b>	<b>87,5</b>	<b>74,0</b>	<b>83,5</b>	<b>89,0</b>	<b>89,3±7,0</b>	<b>10,7</b>
WL	Обучение	77,0	75,1	75,8	72,1	78,6	65,1	70,9	62,8	67,1	74,6	71,9±5,3	28,1
	Тест	<b>77,2</b>	<b>76,8</b>	<b>73,3</b>	<b>70,8</b>	<b>79,3</b>	<b>66,8</b>	<b>63,8</b>	<b>53,3</b>	<b>66,8</b>	<b>67,3</b>	<b>69,4±7,7</b>	<b>30,6</b>
MAX	Обучение	98,5	98,0	97,0	92,3	98,0	93,7	98,0	81,2	86,0	93,3	93,6±5,8	6,4
	Тест	<b>98,5</b>	<b>98,0</b>	<b>95,0</b>	<b>93,5</b>	<b>97,0</b>	<b>94,5</b>	<b>95,0</b>	<b>86,5</b>	<b>84,0</b>	<b>92,0</b>	<b>93,4±4,8</b>	<b>6,6</b>
Максимум (Тест)		3,9	9	9	9	5	7,9	7	1	9	9	9	2
Минимум (Тест)		2	2	2	2	2	4	2	2	2	4	2	9

Анализируя данные таблицы 2, важно подчеркнуть надежность признака «Максимальное значение» и слабую пригодность признака

«Среднее арифметическое»: по данным признакам погрешность распознавания по всем участникам составила 8,6% и 46,4% соответственно; поэтому они были признаны наиболее и наименее точными признаками. Распределение этих двух функций в пространстве признаков показано на рисунке 2.

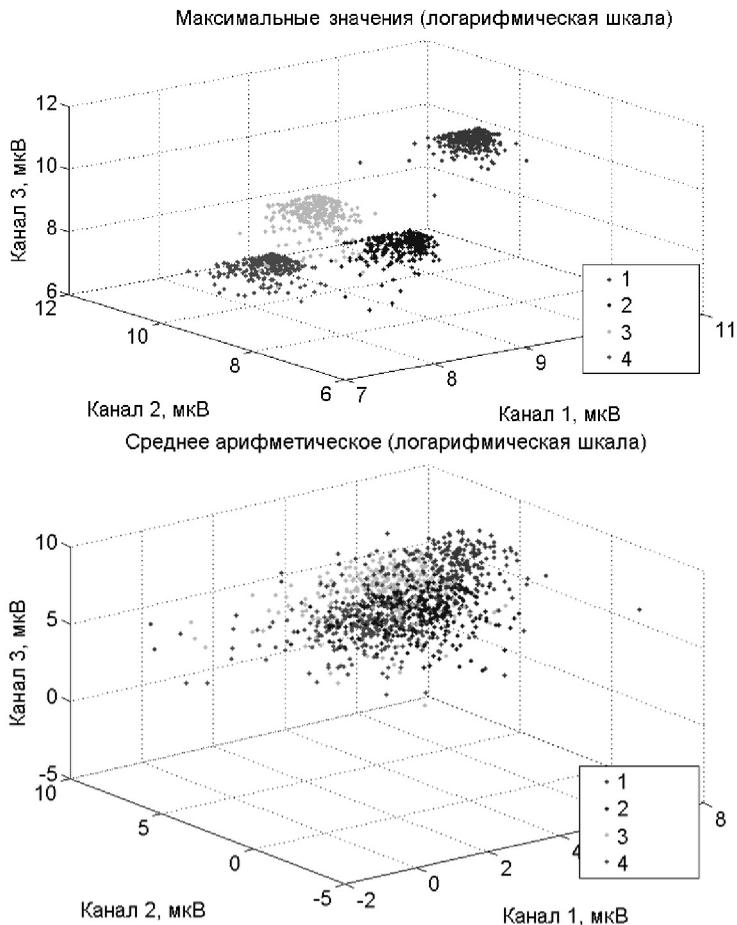


Рис. 2. Распределение функций Максимальных значений и Среднего арифметического в пространстве признаков

Классифицируемые жесты хорошо различимы по признаку «Максимальное значение». Напротив, по признаку «Среднее арифметическое» значения по каналам перекрываются между собой,

что затрудняет классификацию. Значения 1-4 легенды представляют собой: сжатие челюсти, улыбку, поднятие бровей и сведение бровей.

Диаграмма на рисунке 3 демонстрирует точность классификации для всех признаков в среднем по всем участникам. На ней показано, как признаки влияют на производительность распознавания. Видно, что при использовании первых трех признаков производительность как обучения, так и тестирования была более низкой, чем в остальных случаях. Другими словами, эффективность этих функций по подготовке нейронной сети оказалась весьма низкой.

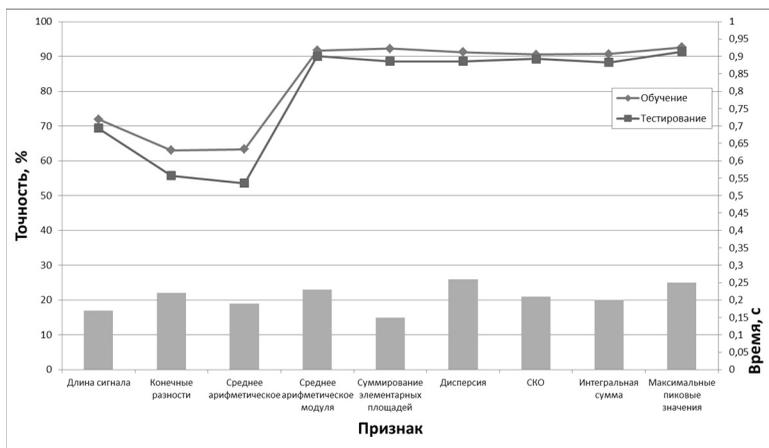


Рис. 3. Диаграмма времени обучения и график точности распознавания по признакам по усредненным значениям для всех испытуемых

На диаграмме видно, что *MAV*, *SSI*, *VAR*, *STD*, *IEMG*, и *Max* при обучении и тестировании показали себя как релевантные и надежные функции, содержащие важную информацию для классификации мимических жестов. Среди них, *Max* показал лучший результат по точности распознавания в тестовой выборке (93,4%) по всем участникам, тогда как при использовании признака *MV* получен самый низкий результат с точностью распознавания 53,6%.

**5. Алгоритм классификации мимических движений.** Сравнивая данную работу с [2], в которой исследовались аналогичные мимические движения, следует отметить, что использовавшийся там классификатор обладает меньшей скоростью обучения и большей размерностью вектора входных признаков.

На основе проведенных исследований были выявлены наиболее информативные признаки электромиограммы, и наиболее подходящая

архитектура нейронной сети. На рисунке 4 графически представлен предлагаемый авторами алгоритм обработки и классификации данных.

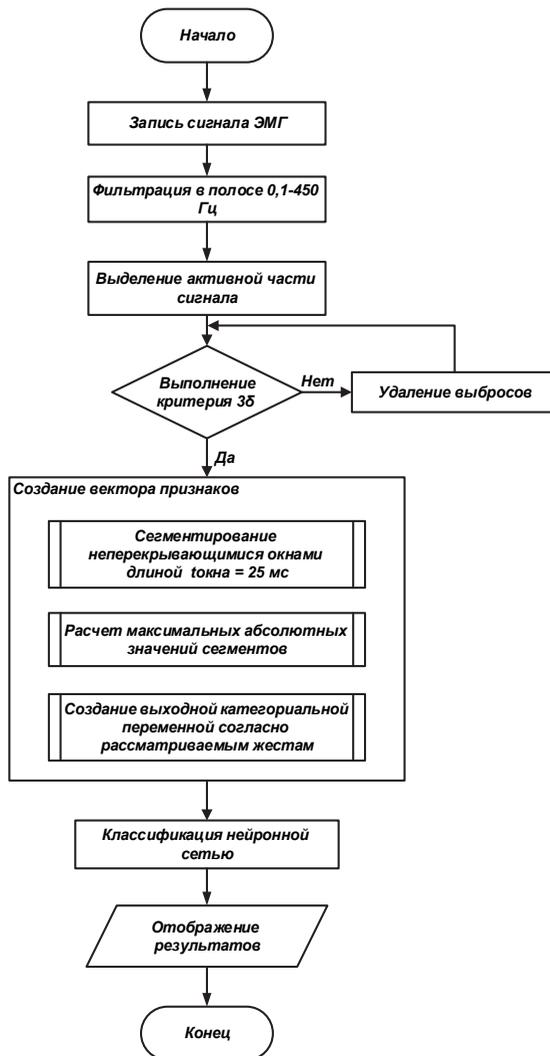


Рис. 4. Обобщенный алгоритм классификации

Алгоритм описывает основные этапы распознавания жестов на основе критерия «Максимальные значения» и классификатора на основе радиальных базисных функций.

**6. Заключение.** Подводя итог, стоит отметить, что в связи с тем, что в режиме реального времени миоэлектрический контроль требует высокого уровня точности и скорости, следует рассматривать компромисс между этими двумя ключевыми факторами. Основное преимущество сети на основе радиальной базисной функции — обучение происходит в течение одной эпохи, в результате чего получаем очень быструю процедуру обучения сети (меньше секунды). Кроме того, в целях максимальной производительности распознавания были оценены различные функции (признаки), извлеченные из мимической ЭМГ, среди которых МАХ показал наибольшую точность и скорость обучения.

Результаты этого исследования могут быть использованы для обработки электромиографического сигнала и распознавания мимических движений для разработки интерфейсов «человек-машина». Также они могут быть применены в областях, требующих анализа и классификации ЭМГ для других целей. Это может быть управление протезом или вспомогательными устройствами для повышения качества жизни людей с ограниченными возможностями. Для проектирования надежных интерфейсов требуется высокоэффективные методы с точки зрения точности и вычислительной нагрузки.

Развитием данного направления исследований может стать проведение исследований на большей выборке испытуемых изучения возможности создания универсального классификатора, которому не будет требоваться процедура обучения для каждого нового человека.

### Литература

1. *Clancy E.A., Morin E.L., Merletti R.* Sampling, Noise-reduction and Amplitude Estimation Issues in Surface Electromyography // *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2002. no. 12. pp. 11–16.
2. *Englehart K., Hudgins B.* A robust, real-time control scheme for multifunction myoelectric control // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2003. vol. 50. pp. 848–854.
3. *Mitsuhiro H., David G.* Voluntary EMG-to-force estimation with a multi-scale physiological muscle model // *BioMedical Engineering OnLine*. URL: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/12/1/86>. (Дата обращения: 11.09.2015).
4. *Huihui L. et al.* Relationship of EMG/SMG features and muscle strength level: an exploratory study on tibialis anterior muscles during plantar-flexion among hemiplegia patients // *BioMedical Engineering OnLine*. URL: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/13/1/5>. (Дата обращения: 31.01.16).
5. *Marcel T., Marcus V., Francisco O.* S-EMG signal compression based on domain transformation and spectral shape dynamic bit allocation // *BioMedical Engineering OnLine*. URL: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/13/1/22>. (Дата обращения: 11.09.2015).

6. *Maria C, Sridhar P., Dinesh K.* Selection of suitable hand gestures for reliable myoelectric human computer interface // BioMedical Engineering OnLine. URL: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/14/1/30>. (Дата обращения: 11.09.2015).
7. *Peng H.C., Long F, Ding C.* Feature selection based on mutual information: criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy // IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence. 2005. vol. 27. pp. 1226–1238.
8. *Sawarkar K.G.* Analysis and Inference of EMG Using FFT // Proceeding of SPIT-IEEE Colloquium and International Conference. 2007. no. 1. p. 107.
9. *Будко Р.Ю.* Электромиография в исследовании челюстно-лицевых мышц // Тезисы трудов IV Всероссийской молодежной школы-семинара «Инновации и перспективы медицинских информационных систем». 2014. С. 70–73.
10. *Hamed M., Sheikh H.S., Tan T.S., Kamarul A.* SEMG based Facial Expression Recognition in Bipolar configuration // Journal Computer Science. 2011. no. 7(9). pp. 1407–1415.
11. *Зунг Н. Т., Щербатов И. А.* Распознавание объектов в системе технического зрения мобильного робота: использование библиотеки FLANN и алгоритма SURF // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 4. С. 65–76.
12. *Saichon J, Chidchanok L., Suphakant P.* A very fast neural learning for classification using only new incoming datum // IEEE Trans Neural Netw. 2010. no. 21(3). pp. 381–392.
13. *Лучинин А.В., Старченко И.Б., Резниченко А.А.* Анализ и выявление медленно-волновых компонент фотоплетизмограммы и построение функции регрессии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 10. С. 114–120.
14. *Chathura L., Brian J Lithgow, Zahra M.* Development of an ultra low noise, miniature signal conditioning device for vestibular evoked response recordings // BioMedical Engineering OnLine. URL: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/13/1/6>. (Дата обращения: 26.11.15).
15. *Реброва О.Ю.* Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA // МедиаСфера. 2006. С. 167–195.
16. *Коуэн Х.Л., Брумлик Дж.* Руководство по электромиографии и электродиагностик: пер с англ. // Москва: Медицина. 2005. 341 С.

## References

1. Clancy E.A., Morin E.L. Merletti R. Sampling, Noise-reduction and Amplitude Estimation Issues in Surface Electromyography. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2002. no. 12. pp. 11–16.
2. Englehart K, Hudgins B. A robust, real-time control scheme for multifunction myoelectric control. *IEEE Translocation Biomedical Engineering*. 2003. vol. 50. pp. 848–854.
3. Mitsuhiro H., David G. Voluntary EMG-to-force estimation with a multi-scale physiological muscle model. BioMedical Engineering OnLine. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/12/1/86>. (accessed 11.09.2015).
4. Huihui L. et al. Relationship of EMG/SMG features and muscle strength level: an exploratory study on tibialis anterior muscles during plantar-flexion among hemiplegia patients. BioMedical Engineering OnLine. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/13/1/5>. (accessed 11.09.2015).
5. Marcel T., Marcus V., Francisco O. S-EMG signal compression based on domain transformation and spectral shape dynamic bit allocation. BioMedical Engineering OnLine. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/13/1/22>. (accessed 11.09.2015).

6. Maria C., Sridhar P. A., Dinesh K. K. Selection of suitable hand gestures for reliable myoelectric human computer interface. *BioMedical Engineering OnLine*. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/14/1/30>. (accessed 11.09.2015).
7. Peng H.C., Long F., Ding C. Feature selection based on mutual information: criteria of max-dependency, max-relevance, and min-redundancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*. 2005. vol. 27. pp. 1226–1238.
8. Sawarkar K.G. Analysis and Inference of EMG Using FFT. Proceeding of SPIT-IEEE Colloquium and International Conference. 2007. no. 1. p. 107.
9. Budko R. Yu. [Electromyography study maxillo-facial muscles]. *Tezisy trudov IV Vserossiyskoj molodezhnoi shkoly-seminara «Innovations and perspectives of medical information systems»*. [Proceedings of IV National Youth Training seminar "Innovations and prospects of medical information systems"]. 2014. pp. 70–73. (In Russ.).
10. Hamed M., Sheikh H.S., Tan T.S., Kamarul A. SEMG based Facial Expression Recognition in Bipolar configuration. *Journal Computer Science*. 2011. vol. 7. pp. 1407–1415.
11. Zung N.T., Shcherbatov I.A. [Object recognition n machine vision system of mobile robot: the using of library “FLANN” and algorithm “SURF”]. *Prikaspijskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii – Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2014. no. 4. pp. 65–76. (In Russ.).
12. Saichon J., Chidchanok L., Suphakant P. A very fast neural learning for classification using only new incoming datum. *IEEE Trans Neural Netw*. 2010. no 21(3). pp. 381–392.
13. Luchinin A.V., Starchenko I.B., Reznichenko A.A. [Analysis and identification slow and wave component photoplethysmogram and creation of function of regression]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014. no. 10. pp. 114–120. (In Russ.).
14. Chathura L., Brian J.L., Zahra M. Development of an ultra low noise, miniature signal conditioning device for vestibular evoked response recordings. *BioMedical Engineering OnLine*. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/13/1/6>. (accessed 26.11.2015).
15. Rebrova O. Yu. [Statistical analysis of medical data. The use of STATISTICA software package]. *MediaSfera – MediaSphere*. 2006. pp. 167–195. (In Russ.).
16. Kouen X.L., Brumlik Dzh. *Guide to electromyography and electrodiagnostics*. Health, 1999. 341 p. (Russ. ed.: Kouen X. L., Brumlik Dzh. *Rukovodstvo po elektromiografii i elektrodiagnostike*. Moscow: Meditsina. Publ. 2005. 341 p.). (In Russ.).

**Будко Раиса Юрьевна** — аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники (ЭГА и МТ), Южный федеральный университет (ЮФУ). Область научных интересов: электромиография, распознавание образов, нейронные сети, интерфейс человек-машина. Число научных публикаций — 8. [raisa-budko@yandex.ru](mailto:raisa-budko@yandex.ru); пер. Некрасовский, 44, ГСП-17а, Таганрог, 347928; р.т.: +79381107067.

**Budko Raisa Yur'evna** — Ph.D. student of hydroacoustics and medical engineering department (DH&ME), Southern Federal University (SFedU). Research interests: electromyography, pattern recognition, neural networks, human-machine interface. The number of publications — 8. [raisa-budko@yandex.ru](mailto:raisa-budko@yandex.ru); 44, Nekrasovsky st., GSP-17A, Taganrog, 347928, Russia; office phone: +79381107067.

**Старченко Ирина Борисовна** — д-р техн. наук, профессор, И.О. директора, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного Федерального Университета (ЮФУ), директор, особое конструкторское бюро "Ритм" ЮФУ, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники (ЭГА и МТ), Институт

нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного Федерального Университета (ЮФУ). Область научных интересов: нелинейная гидроакустика, динамический хаос, живые системы. Число научных публикаций — 128. [star@sfedu.ru](mailto:star@sfedu.ru); пер. Некрасовский, 44, ГСП-17а, Таганрог, 347928; п.т.: +7 8634 371795.

**Starchenko Irina Borisovna** — Ph.D., Dr. Sci., professor, acting head, College of electronics and electronic equipment engineering (CEEEE) of Southern Federal University (SFedU), director, SFedU Specialized Design Bureau “RITM”, professor of hydroacoustics and medical engineering department (DH&ME), Southern Federal University (SFedU). Research interests: elaboration of nonlinear hydroacoustics methods and systems for medium with statistically heterogeneous structure controlling. The number of publications — 128. [star@sfedu.ru](mailto:star@sfedu.ru); 44, Nekrasovsky st., GSP-17A, Taganrog, 347928, Russia; office phone: +7 8634 371795.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке ИНЭП ЮФУ.

**Acknowledgements.** This research is supported by CEEEEE.

## РЕФЕРАТ

### *Будко Р.Ю., Старченко И.Б. Создание классификатора мимических движений на основе анализа электромиограммы.*

В статье описаны результаты обработки электромиограммы (ЭМГ) и результаты распознавания мимических движений алгоритмом радиальной базисной функции нейронной сети (НС). В качестве входного вектора признаков использовались девять признаков-функций ЭМГ во временной области. В ходе препроцессирования использованы процедуры, обеспечившие снижение уровня шума, фильтрацию, сглаживание, сегментацию, понижение размерности, выделение признаков. Изучена и сравнена эффективность использования в качестве входной информации для обучения НС девяти признаков ЭМГ, извлеченных как функции времени: максимальное значение, интегральная ЭМГ; среднее арифметическое; среднее значение модуля; конечные разности; сумма элементарных площадей; дисперсия; среднеквадратичное отклонение; длина сигнала. Наиболее высокая точность распознавания и скорость обучения получены для признака «Максимальные значения», наихудший результат получен для признака «Среднее арифметическое». На основе проведенных исследований были выявлены наиболее информативные признаки электромиограммы, и наиболее подходящая архитектура нейронной сети. В результате предложен алгоритм распознавания мимики на основе радиальной базисной функции. Данный классификатор может применяться для создания человеко-машинных интерфейсов.

## SUMMARY

### *Budko R.Yu., Starchenko I.B. Creation of the Facial Gestures Classifier Based on the Electromyogram Analysis.*

The article describes the results of the processing of the electromyogram (EMG) and the results of facial gestures recognition based on the algorithm of radial basis function neural network (NN). During preprocessing procedures were used which provided noise reduction, filtering, smoothing, segmentation, lowering dimension, feature extraction. We studied and compared the efficiency of using as input for training NN nine signs of EMG learned as a function of time: Integrated EMG; Mean Value; Mean Absolute Value; Mean Absolute Value Slope; Simple Square Integral; Dispersion; Standard Deviation; Waveform length and the Maximum Peak Value. The highest recognition accuracy and speed of learning were obtained for the characteristic "Maximum Peak Value", the worst result was obtained for the characteristic "Mean Value." Based on these studies we revealed the most informative features of EMG as well as the most suitable architecture of the neural network. As a result, a gesture recognition algorithm based on a radial basis function was proposed. This classifier can be used to create a human-machine interface.

А.А. ПРОНОЗА, А.А. ЧЕЧУЛИН, И.В. КОТЕНКО  
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
В SIEM-СИСТЕМАХ**

---

*Проноза А.А., Чечулин А.А., Котенко И.В. Математические модели визуализации в SIEM-системах.*

**Аннотация.** В статье предложены математические модели визуализации данных в SIEM-системах. Модели визуализации служат для формализации трех основных этапов процесса визуализации. На первом этапе предлагаются модели, с помощью которых происходит унификация сведений об объектах компьютерной сети, имеющих разнородные структуры и различные источники. На втором этапе на базе построенных моделей формируется многомерная матрица связей. На третьем этапе предлагается унифицированный подход к визуализации различных аспектов безопасности компьютерной сети на основе построенной матрицы.

**Ключевые слова:** визуализация данных безопасности, системы управления событиями и информацией безопасности (SIEM), математические модели визуализации.

*Pronoza A.A., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Mathematical Models of Visualization in SIEM Systems.*

**Abstract.** The paper suggests the mathematical models of data visualization in SIEM-systems. The visualization models formalize three main stages of the visualization process. At the first stage the models are being suggested which fulfill the unification of data on the computer network objects having heterogeneous structures and different sources. At the second stage, on the basis of the suggested models, a multidimensional matrix of relations is generated. At the third stage a uniform approach to the visualization of various security aspects of the computer network on the basis of constructed matrix is proposed.

**Keywords:** security data visualization; security information and event management (SIEM) systems; mathematical models of visualization.

---

**1. Введение.** В настоящее время в распределенных компьютерных сетях происходит стремительный рост количества хостов сети и связей между ними. Каждый хост или их связь генерирует множество сообщений, связанных с безопасностью. Автоматизированный анализ и визуализация указанных сообщений критически важны для предотвращения угроз компьютерной безопасности.

Комплексная обработка сообщений безопасности, поступающих от всех узлов компьютерной сети, происходит в рамках систем управления событиями и информацией безопасности (Security Information and Event Management — SIEM). Подобные системы способны не только эффективно выявлять угрозы безопасности, но и моделировать возможные сценарии компьютерных атак [1]. Важным компонентом SIEM-систем является компонент визуализации. Этот компонент позволяет оператору оперативно и в понятном для него виде получать информацию о состоянии безопасности компьютерной сети, ее уязви-

мых участках и возможных действиях нарушителя [2–5]. Значимость подсистемы визуализации сложно переоценить, поскольку на основе отображаемых данных пользователь системы оценивает текущую обстановку и выбирает соответствующие контрмеры. Неудачная визуализация может привести к снижению качества выбираемых контрмер и, как следствие, к понижению уровня защищенности компьютерной сети.

К основным графическим моделям, используемым при визуализации информации, можно отнести графики, графы и их вариации, матрицы, а также карты [8]. При использовании классических моделей для наглядного представления данных применяются некоторые визуальные приемы, такие как расположение объекта в пространстве, кодирование информации при помощи его формы, размера и цвета [7]. Формируемое изображение должно быть понятным и информативным и не должно выходить за рамки возможностей когнитивного аппарата человека [8].

Визуализация может быть дополнена рядом инструментов, таких как «рыбий глаз» [8], «семантическое масштабирование» [10], «небольшие различия» [11] и другими. Важно также предоставить пользователю возможность получить исчерпывающую информацию о выбранном объекте при помощи визуального средства поиска [12].

Классическим представлением модели компьютерной сети является граф, в котором под узлами понимаются хосты сети, а дугами обозначаются связи между хостами. В работах [16, 17] рассмотрен подход, в котором для изображения узлов графа предлагается отображать метрики защищенности соответствующих хостов. Указанный подход расширен в работе [18], в результате чего у пользователя появляется возможность видеть как текущие, так и предыдущие значения метрик безопасности.

При исследовании вопросов визуализации больших компьютерных сетей основное внимание уделяется вопросам, связанным с отображением информации в условиях ограниченной поверхности. Например, в работе [13] предлагается способ визуализации сложной сети, состоящей из реальных объектов и связей между ними, но понятия «объект» и «связь» не раскрываются в объеме, необходимом для их графического представления. В работе [14] представлены модели визуализации маршрутов атак в виде графов и плоских карт деревьев, однако отсутствует описание связи между компьютерной инфраструктурой и ее графическим представлением. В работах, посвященных визуализации, предполагается, что сведения об объектах компьютерной инфраструктуры и ее структуре заранее известны и подготовлены для отображения.

Однако сам способ представления данных может существенно повлиять на результат визуализации. Например, в [15] описывается

процесс построения графов атак и расчет метрик защищенности, основанный на формировании для каждого хоста трехмерной матрицы по следующим данным: (1) класс атак; (2) необходимый тип доступа; (3) уровень знаний нарушителя. Такой подход позволяет строить многоуровневые модели сценариев атак с их последующей визуализацией при помощи классических моделей, таких как графы.

Особенности представления и интерпретации одних и тех же данных могут быть использованы для взаимодействия с пользователем в рамках одной модели визуализации, не исключая использование стандартных инструментов. Такое представление данных можно назвать интерактивным, поскольку оно позволяет пользователю посмотреть на одну и ту же систему под разными углами.

С точки зрения авторов, подсистема визуализации SIEM-системы не только обеспечивает визуализацию сообщений безопасности, но и является аналитической системой обработки информации. Каждый запрос пользователя на визуализацию каких-либо параметров компьютерной сети заставляет подсистему визуализации проводить соответствующую выборку из огромного массива разнородных данных, сохраняемых SIEM-системой.

Процессу отображения информации должен предшествовать процесс ее обработки и приведение к виду, удобному для отображения, при этом достигается его интерактивность. Таким образом, представляется необходимым с теоретической точки зрения рассмотреть структуры данных, используемые при визуализации компьютерной инфраструктуры, и способ их организации для единообразного получения различных представлений компьютерной сети.

Целью настоящей работы является построение математических моделей представления разнородных данных о компьютерной сети и демонстрация того, как построенные модели могут быть визуализированы при помощи древовидных и графовых структур.

Как будет показано ниже, организация данных, собираемых SIEM-системой, носит многомерный характер. На рисунке 1 представлена предлагаемая схема функционирования подсистемы визуализации, основанная на предложенном в [19] общем подходе к анализу многомерных данных.

В качестве исходных данных мы рассматриваем поступающую в SIEM-систему информацию о компьютерной сети, которая используется для заполнения атрибутов моделей информационных объектов — компьютерной сети, хостов, и связей между хостами. В силу разнородности этой информации возникает необходимость в ее формализа-

ции и унификации, чтобы в дальнейшем получить визуализацию состояния безопасности всей сети.



Рис. 1. Общая схема анализа данных большой размерности

Предложенные в настоящей статье математические модели информационных объектов описывают наиболее важные компоненты компьютерной инфраструктуры с учетом как их формальных признаков (например, установленное на хостах программное обеспечение и наличие в нем уязвимостей), так и логических (например, метрики безопасности). В рамках общего подхода к визуализации компьютерной сети указанные модели объединяются в многомерную матрицу связей, в которой наличие связи между двумя моделями определяется типом отношения, в котором состоят исходные информационные объекты. После чего на базе этой матрицы строятся универсальные модели ее графического представления.

Особенностью предложенных в статье моделей представления данных является единообразный подход к их организации, при котором учитываются имеющиеся различия в их природе и структуре. Указанный подход позволяет использовать единую модель визуализации компьютерной сети, которая, в зависимости от параметра, способна отображать разные аспекты безопасности этой сети.

**2. Математические модели информационных объектов.** Рассмотрим компьютерную сеть  $N$ , состоящую из множества хостов  $H$  и связей между ними  $C$ :

$$N = (H, C). \quad (1)$$

Под информационным объектом  $o \in O$  будем подразумевать хост  $h \in H$ , связь  $c \in C$  или подсеть  $N' \subseteq N$ .

Модель хоста  $h$  может включать в себя огромное количество различных атрибутов, от значения которых зависит состояние безопасности хоста. В настоящей статье приводится набор атрибутов, наиболее важных с точки зрения авторов, без которых невозможно определить, каким образом характеристики хоста влияют на безопасность всей сети.

Построим модель хоста следующим образом.

$$h = (ID, P_{hard}, P_{soft}, V, t^h, I_{cr}, Sc), \quad (2)$$

где  $ID$  — идентификационная информация,  $P_{hard} \subset P$  — установленное аппаратное обеспечение,  $P_{soft} \subset P$  — установленное программное обеспечение,  $V$  — множество уязвимостей,  $t^h \in T^h$  — тип сетевого объекта,  $I_{cr}$  — важность обрабатываемой информации,  $Sc$  — совокупность характеристик, которые можно собрать о хосте в результате внешнего сканирования.

Множество  $P$  содержит сведения о программном и аппаратном обеспечении, такие как фирма-производитель, название программного продукта и его версия; множество  $T^h$  содержит все возможные типы хостов (автоматизированное рабочее место, сервер, маршрутизатор и т.п.).

Атрибуты модели могут задаваться как в автоматическом режиме (например, множество уязвимостей может быть получено в результате работы сканера уязвимостей), так и в ручном режиме (например, администратор безопасности самостоятельно определяет важность обрабатываемой на хосте информации).

Модель связи между хостами должна включать в себя непосредственно хосты  $h_i$  и  $h_j$ , физические каналы передачи данных  $T'$ , существующие между хостами, а также аппаратные и программные средства  $U'$ , установленные на хостах и способные вести информационный обмен. Таким образом, модель связи  $c$  примет вид:

$$c = (h_i, h_j, T', U'), h_i, h_j \in H, T' \subset T, U' \subset U. \quad (3)$$

Модели каналов передачи данных включают в себя такие обязательные атрибуты, как тип канала, протокол передачи, а также ха-

рактеристики источника и приемника, без которых невозможна передача данных.

Приведенные в (1), (2) и (3) модели описывают основные объекты компьютерной инфраструктуры, информацию о которых должна собирать и обрабатывать SIEM-система.

Состояние информационных объектов определяется различными источниками информации, такими как программно-аппаратные комплексы мониторинга безопасности, средства анализа сети, коммутационное оборудование, серверы обновлений программного обеспечения и т.п.

Источники информации можно разделить на физические и логические.

Под физическим источником информации следует понимать произвольный узел сети  $N$ , в том числе и внешний по отношению к этой сети, на котором установлено программное обеспечение, способное отслеживать и протоколировать события безопасности. В общем случае математическая модель формализованного события безопасности будет иметь вид:

$$a = \{(type, source, severity, timestamp, msg)\}, a \in A, \quad (4)$$

где  $type$  — тип сообщения,  $source$  — источник, сгенерировавший сообщение,  $severity$  — важность сообщения,  $timestamp$  — временная метка. Тело сообщения  $msg$  представляет собой структуру, поля которой содержат специфические для информационного объекта или его компонента характеристики.

Под логическим источником будем понимать компонент системы оценки защищенности информационного объекта, т.е. узел сети  $N$ , способный вычислять количественные показатели безопасности информационных объектов, такие как уровень критичности, степень уязвимости, вероятность успешной атаки и т.п. [18]. Для набора совокупностей информационных объектов  $O = \{O_1, \dots, O_k\}$  математическая модель метрики безопасности  $f$  примет вид:

$$f(O) \rightarrow \mathbb{R}. \quad (5)$$

Таким образом, на основании введенной классификации источников информации, математическая модель сбора информации со всех физических источников  $L_p$  и всех логических источников  $L_l$  описывается следующим образом:

$$\mathcal{M} = (Q, W), \quad (6)$$

где образ отображения  $Q: L_p \rightarrow A$  представляет собой набор формализованных сообщений безопасности, а образ отображения  $W: L_l \rightarrow B$

является набором числовых показателей защищенности информационных объектов.

Полученная таким образом информация должна быть передана модулю сбора данных подсистемы визуализации для последующей обработки, анализа и визуализации. Способ передачи зависит от источника информации, однако, как правило, внутренние источники самостоятельно иницируют передачу данных, внешние источники опрашиваются с заданным временным интервалом.

### 3. Многомерная матрица связей информационных объектов.

Существующие в компьютерной инфраструктуре информационные объекты, такие как хосты и связи между ними, могут быть объединены в единую модель, представленную в виде многомерной матрицы связей. Как будет показано ниже, в результате применения операций среза к указанной матрице могут быть получены различные представления компьютерной сети, акцентирующие внимание администратора безопасности на конкретных проблемных моментах сети.

Для построения многомерной матрицы связи введем следующую классификацию отношений  $T^c$  между хостами:

- отношение физической доступности, при котором между двумя хостами существует физический канал связи;
- отношение доступности, при котором имеется возможность установить канал передачи данных с помощью сетевого протокола;
- отношение посредством виртуальных каналов связи, при котором между хостами существуют логические каналы связи, обладающие специфическими с точки зрения безопасности характеристиками, например, шифрованием трафика;
- отношение функциональной зависимости, при котором для связи с главным хостом необходимо наличие связи с зависимым хостом.
- отношение доверия, при котором существующий между хостами канал связи не контролируется политиками безопасности;
- отношения уязвимости, при котором эксплуатация уязвимости на одном хосте ведет к компрометации другого хоста.

Введем многомерную матрицу связей, как:

$$M^c = \| \| m_{ijk} \| \|, i, j = 1..|H|, k = 1..|T^c|, \quad (7)$$

ее элементы получают в результате отображения:

$$F^c: (\mathbb{N}, \mathbb{N}, \mathbb{N}) \rightarrow H \times H \times T^c, \quad (8)$$

$$m_{ijk} = F^c(i, j, k) = \begin{cases} (h_i, h_j, t_k, msg), & \text{если } h_i, h_j \text{ в отношении } t_k \\ (h_i, h_j, 0), & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Таким образом, элементами матрицы  $M^c$  являются наборы  $(h_i, h_j, t_k, msg)$ , представляющие собой упорядоченную пару хостов и тип связи (отсутствие связи) между ними. Значение атрибута  $msg$  может содержать дополнительную информацию по конкретному типу связи.

Введем процедуру формирования среза матрицы  $M^c$  через фиксацию индекса  $k = \tilde{k}$ :

$$\pi(\tilde{k}) = \|m_{ij\tilde{k}}\|, i, j = 1..|H|. \quad (9)$$

Отметим, что каждый срез  $\pi(\tilde{k})$  представляет собой матрицу смежности графа, вершинами которого являются хосты, а наличие ребра определяет наличие между хостами соответствующей связи. Интерпретация каждого среза приведена в таблице 1.

Таблица 1. Результаты функции  $\pi(k)$  и их интерпретация

$\pi(k)$	Интерпретация
$\pi(1)$	Топология сети
$\pi(2)$	Граф доступности
$\pi(3)$	Граф защищенных каналов
$\pi(4)$	Граф зависимостей
$\pi(5)$	Граф доверия
$\pi(6)$	Граф атак

При визуализации многомерной матрицы процедура формирования среза матрицы  $\pi(k)$  решает проблему восприятия пользователем многомерных данных, заключающуюся в том, что человек способен воспринимать изображения размерностью  $n \leq 3$ .

**4. Математическая модель визуализации многомерной матрицы связей.** Для визуализации компьютерных сетей в целом, и характеристик их безопасности в частности, обычно используются древовидные и графовые структуры. Однако построение математических моделей визуализации указанных структур обладает рядом особенностей, возникающих в силу ограниченного размера поверхности, на которую происходит их отображение.

Кроме исходных данных, таких как срез многомерной матрицы связей  $\pi(\tilde{k})$ , следует также учитывать необходимость масштабирования получаемого изображения и его укрупнения, т.е. агрегацию отдельных узлов сети с целью отобразить наиболее общую картину (семантическое масштабирование [10]). С другой стороны, для уменьшения числа связей зачастую вместо графа целесообразнее отображать соответствующее остовное дерево.

В общем случае срез матрицы  $\pi(\tilde{k})$  отображается в виде неориентированного графа  $G = (V, E)$ , где  $V$  — вершины графа, представляющие собой хосты,  $E$  — ребра графа, задающие связи между хостами.

Определим математическую модель визуализации указанного графа следующим образом:

$$\chi_k(\pi(k), V_{scale}, G_{type}) = \mathcal{G}(G'_k), k = 1..|T^c|, \quad (10)$$

$$G'_k = (V_{scale}, E'), V_{scale} \subseteq V, E' \subseteq E,$$

где  $\pi(k)$  — соответствующий срез матрицы  $M^c$ ,  $G'_k$  — подграф  $G_i$ , содержащий вершины из множества  $V_{scale}$ ,  $\mathcal{G}$  — процедура визуализации графа. Множества  $V_{scale}$  и  $G_{type}$  задаются пользователем и обеспечивают геометрическое масштабирование и компоновку визуального представления соответственно. Процедура визуализации графа  $\mathcal{G}$  обеспечивает вывод графа на экран способом, указанным в  $G_{type}$ .

Выделение маршрутов в графе может быть представлено при помощи изменения цветовой схемы ребер из соответствующего набора  $H'$ :

$$\eta^e(H') = color(\{e_{ij} | e_{ij} = (v_i, v_j), v_i, v_j \in H'\}). \quad (11)$$

Процесс агрегации узлов сети стоит в том, чтобы объединять узлы графа по определенному критерию, например, по их принадлежности к одной подсети или домену. Результатом агрегации узлов будет набор подграфов  $G_i$ , соединенных между собой хотя бы одним ребром  $e \in E$ :

$$G = \{G_i | G_i \subset G, i = 1..p\}. \quad (12)$$

Уменьшение числа связей заключается в построении остовного дерева графа  $G$ . Например, при отображении топологии сети «звезда» вершина с максимальной степенью является основным связующим звеном сети. На практике такой вершиной может быть сетевой коммутатор или точка доступа Wi-Fi.

Рассмотрим функцию  $\theta$ , формирующую остовное дерево для графа  $G$ :

$$T = \theta(G) = (V, E'), E' \subseteq E. \quad (13)$$

Построим для каждого подграфа  $G_i$  его остовное дерево:

$$T_i = \theta(G_i) = (V_i, E'_i), E'_i \subseteq E_i. \quad (14)$$

Совокупность всех остовных деревьев  $\{T_i\}_{i=1}^p$ , соединенных между собой, является иерархической структурой сети, узлы которой представляют собой подсети.

Рассмотренный подход предполагает двухуровневую кластеризацию сетей, однако может быть расширен для подсетей любого уровня.

Комбинированное применение описанных выше подходов обеспечивает читаемое представление графа на ограниченной поверхности с настраиваемым количеством отображаемых деталей.

Рассмотрим два подхода к визуализации отдельного хоста — узла графа  $G$ . Выбор конкретного подхода зависит от решаемых задач и осуществляется пользователем.

Первый подход заключается в сопоставлении каждому хосту его пиктограммы, содержащей информацию, например, о типе узла. В этом случае модель визуализации хоста представляется функцией:

$$D^h(t^h) = image^h, \quad (15)$$

где  $t^h$  — тип хоста,  $image^h$  — соответствующая типу хоста пиктограмма.

Второй подход заключается в сопоставлении каждому хосту глифа, т.е. изображения, на котором отображены метрики безопасности, подсчитанные для данного хоста. Глиф представляет собой масштабируемое изображение, разделенное на секции. Каждая секция соответствует определенной метрике безопасности и, в зависимости от критичности значения этой метрики, может выделяться соответствующим цветом.

Для того чтобы сделать модель глифа более информативной, в нее следует включить историю изменений значений метрик безопасности, располагающуюся по контуру соответствующей секции и обозначенной цветом, соответствующим предыдущему значению этой метрики [18].

Базой глифа  $B_t^h$  для хоста  $h$  в момент времени  $t$  назовем множество вида:

$$B_t^h = \{f_i | f_i(O_i^h) = x_i\}, i = 1..n, x_i \in \mathbb{R}, \quad (16)$$

где  $O_i^h \subseteq O$  — набор совокупностей информационных объектов, содержащий сведения о хосте  $h$ , на котором имеет смысл отображение соответствующей метрики безопасности  $f_i \in F$ . В частности, такой набор может состоять из одного единственного хоста  $h$ .

Математическая модель глифа имеет вид:

$$G_k^h = \{B_{t_1}^h, \dots, B_{t_k}^h\}, k \geq 1. \quad (17)$$

Построенная таким образом модель глифа позволит администратору проводить анализ защищенности объектов сетевой инфраструктуры во времени и наблюдать изменения состояния безопасности хоста в зависимости от принятых мер по администрированию сети.

**5. Пример применения моделей.** Рассмотрим применение предлагаемых моделей для визуализации топологии сети и графа атак на этапах сбора и обработки информации, получаемой от физических и логических источников, построения многомерной матрицы связей и ее визуализации. Отметим, что количество сведений о компьютерной инфраструктуре, собираемое подсистемой визуализации, для отдельного вида отношений многомерной матрицы связей будет избыточно.

Для визуализации топологии сети на этапе сбора информации наиболее важные сведения поступают из сообщений физических источников. Из всего множества сообщений  $A$  необходимо выделить только те из них, которые содержат информацию о хостах и физическом канале связи между ними:

$$A_p = \{a | a \in I(h_i, h_j, T'), a \in A\}. \quad (18)$$

Множество сообщений  $A_p$  позволяет заполнить атрибуты модели связи (3), при этом можно принять  $U' = \emptyset$ . Сформированные модели, в свою очередь, используются для формирования многомерной матрицы связей (8) при  $k = 1$  (отношение физической доступности). Результатом среза матрицы  $\pi(1)$  будет матрица смежности, задающая неориентированный граф, вершинами которого являются хосты, а ребрами — физические каналы связи. Следует отметить, что в случае сетевой топологии «звезда» при визуализации (10) полученного графа можно разбить компьютерную сеть на сегменты, принимая вершины с максимальной степенью за коммутаторы, как показано на рисунке 2.

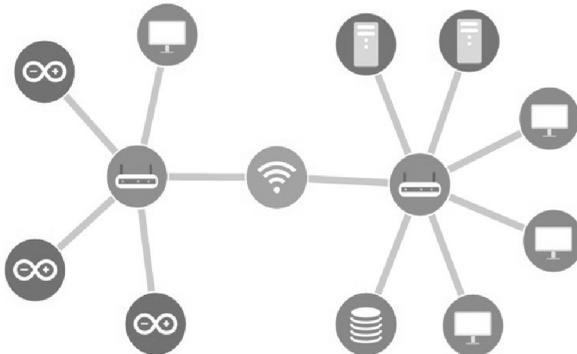


Рис. 2. Пример визуализации сети, состоящей из двух сегментов

Модель формирования и визуализации графа атак отличается от описанной выше модели топологии сети, однако может быть построена по тому же алгоритму.

Источниками сообщений для формирования графа атак являются как физические, так и логические источники. Из множества сообщений  $A$  от физических источников необходимо выделить только те из них, которые содержат информацию о хостах, их уязвимостях и установленном программно-аппаратном обеспечении. При этом из указанного множества следует исключить хосты без уязвимостей, а для оставшихся хостов выбрать наиболее критичную уязвимость:

$$A_a = \{a | a \in I(h_i, v) \vee a \in I(h_i, p), severity(v) \geq \max\{severity(V_{h_i})\}, h_i \in v, v \in V, p \in P, a \in A\}. \quad (19)$$

Из множества сообщений  $B$  от логических источников следует выбрать сообщения, позволяющие оценить степень уязвимости  $V_{level}$  хоста:

$$B_a = \{f(0) | f(0) \in V_{level}\}. \quad (20)$$

В общем случае граф атак является подграфом графа доступности, описываемого при помощи среза  $\pi(5)$  многомерной матрицы связей. Граф атак, также как и граф доступности, является ориентированным, и направление его ребер задается исходя из атрибутов моделей связи между хостами (3).

В некоторых случаях, например, при рассмотрении DoS-атак, граф атак будет являться подграфом графа зависимостей.

Также следует отметить, что в результате обработки входных данных может получиться несколько графов атак, каждый из которых будет подграфом графа доступности. В этом случае их следует рассматривать по отдельности.

Особенностью визуализации графа атак является, с одной стороны, выделение на графе доступности возможных направлений атак, исходя из анализа уязвимостей, расположенных на связанных хостах (направления возможных атак представлено в виде стрелок); с другой стороны — использование глифов вместо пиктограмм хостов. Использование глифов позволяет визуализировать 4 характеристики хоста (каждая имеет три возможных варианта значения, отображаемых синим, желтым и зеленым цветами) и их изменение со временем (цвет внутреннего сектора и внешней линии). В качестве отображаемой характеристики может выступать важность информации ( $I_{cr}$ ), наличие уязвимостей разного уровня критичности ( $V$ ) и т.д. Пример графа атак приведен на рисунке 3.

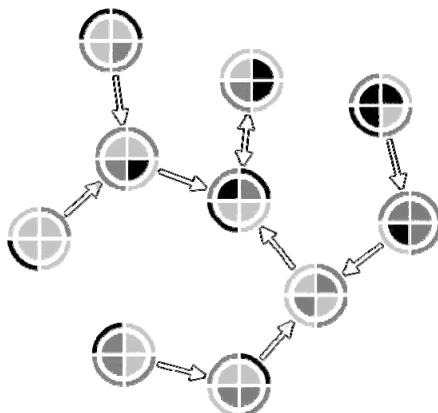


Рис. 3. Пример графа атак с использованием глифов

Таким образом, построенные модели описывают процесс визуализации состояния компьютерной инфраструктуры в SIEM-системах с целью акцентировать внимание пользователя на различных аспектах безопасности сети при помощи единой системы сбора, обработки, представления и отображения информации.

**6. Заключение.** Предлагаемый в настоящей статье подход призван компенсировать недостаток информации о процессе сбора и структурирования данных разнородной структуры о компьютерной сети для SIEM-систем. Данный процесс проходит внутри подсистемы визуализации и во многом предшествует процессу отображения информации. Для его описания предлагаются математические модели визуализации компьютерной сети с использованием графовых и древовидных структур.

В статье введено понятие информационного объекта как обязательной составляющей компьютерной инфраструктуры, и представлены математические объекты, содержащие необходимые для анализа безопасности компьютерной сети атрибуты.

На основании классификации типов отношений между информационными объектами построена многомерная матрица связей информационных объектов между собой и показано, как срезы указанной матрицы могут представлять компьютерную инфраструктуру под разными углами и акцентировать внимание оператора SIEM-системы на конкретных проблемных участках сети.

Далее представлены математические модели визуализации срезов многомерной матрицы связей в виде графа, в которых учтены вопросы сематического масштабирования (агрегирования узлов) и

уменьшения количества связей между узлами. Описывается возможность использования глифов для отображения метрик безопасности как отдельных хостов сети, так и ее сегментов (узлов графа) [20]. Также в статье представлены элементы интерфейса разрабатываемого в настоящее время программного прототипа компонента визуализации информации безопасности на основе веб-интерфейса. Предполагается, что в дальнейшем этот компонент может быть использован в существующих SIEM-системах.

Построение математических моделей для визуализации позволяет выделить наиболее значимые аспекты исследуемой области, описать их структуру в виде набора необходимых для исследования атрибутов, скомпоновать разнородные массивы данных в единую многомерную структуру и представить процесс визуализации как отображение ее основных срезов с использованием различных графических моделей. Эта задача очень важна для SIEM-систем, так как эффективность принятия решений оператором напрямую зависит от оперативности и адекватности восприятия им информации, выдаваемой SIEM-системой.

В дальнейших исследованиях планируется разработать математические модели для визуализации различных данных, хранящихся в реляционных и онтологических хранилищах SIEM-систем [21] на основе таких моделей визуализации, как графы, глифы, карты деревьев и диаграмма Вороного. Также планируется разработать отдельный компонент визуализации, основанный на веб-формах, который мог бы быть включен в большинство существующих SIEM-систем.

## Литература

1. *Miller D., Harris S., Harper S., VanDyke C.* Security Information and Event Management (SIEM) Implementation // McGraw Hill Professional. 2010. 464 p.
2. Официальный сайт системы Arcsight SIEM. URL: <http://www.ndm.net/siem/main/arcsight-siem> (дата обращения 15.02.16).
3. Официальный сайт системы NetIQ Sentinel SIEM. URL: <https://www.netiq.com/products/sentinel/> (дата обращения 15.02.16).
4. Официальный сайт системы QRadar SIEM. URL: <http://q1labs.com/products/qradar-siem.aspx> (дата обращения 15.02.16).
5. Официальный сайт системы OSSIM SIEM. URL: <http://communities.alienvault.com/> (дата обращения 15.02.16).
6. *Колومهц М.В., Чечулин А.А., Котенко И.В.* Обзор методологических примитивов для поэтапного построения модели визуализации данных // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 42. С. 232–257.
7. *Клышинский Э.С., Рысаков С.В., Шихов А.И.* Обзор методов визуализации многомерных данных // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2014. С. 519–530.
8. *Goldstein B.* Cognitive Psychology // Wadsworth, Cengage Learning. 2011. 472 p.
9. *Sarkar M., Brown M.* Graphical fisheye views // Communications of the ACM. 1994. vol. 37. no. 12. pp. 73–83.

10. *Watson G.* Lecture 15 – Visualisation of Abstract Information // Edinburgh Virtual Environment Centre. 2004.
11. *Wroblewski L.* Small Multiples within a User Interface // Web Form Design. 2005.
12. *Ferebee D., Dasgupta D.* Security Visualization Survey // Proceedings of the 12<sup>th</sup> Colloquium for Information Systems Security Education University of Texas. 2008. 124 p.
13. *Пунырев С.Н.* Модели, алгоритмы и программный комплекс визуализации сложных сетей // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Екатеринбург. 2010. 21 с.
14. *Котенко И.В., Новикова Е.С.* Визуальный анализ для оценки защищенности компьютерных сетей // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С. 55–61.
15. *Kotenko I.V., Doynikova E.V., Chechulin A.A.* Security metrics based on attack graphs for the Olympic Games scenario // IEEE Computer Society. 2014. pp. 561–568.
16. *Erbacher R.* Visualization Design for Immediate High-Level Situational Assessment // Proceedings of International Symposium on Visualization for Cyber Security (VizSec'12). 2012. pp.17–24.
17. *Matuszak W.J., DiPippo L., Lindsay Y.* Sun CyberSAVE – Situational Awareness Visualization for Cyber Security of Smart Grid Systems // Proceedings of International Symposium on Visualization for Cyber Security (VisSec'13). 2013. pp. 25–32.
18. *Kotenko I.V., Novikova E.S.* Visualization of Security Metrics for Cyber Situation Awareness // IEEE Computer Society. 2014. pp. 506–513.
19. *Бондарев А.Е., Галактионов В.А.* Анализ многомерных данных в задачах многопараметрической оптимизации с применением методов визуализации // Научная визуализация. 2012. Вып. 4. № 2. С. 1–13.
20. *Котенко И.В., Степашкин М.В., Дойникова Е.В.* Анализ защищенности автоматизированных систем с учетом социо-инженерных атак // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2011. № 3. С. 40–57.
21. *Kotenko I., Polubelova O., Saenko I.* The Ontological Approach for SIEM Data Repository Implementation // IEEE Computer Society. 2012. pp. 761–766.

## References

1. Miller D., Harris S., Harper S., VanDyke C. Security Information and Event Management (SIEM) Implementation. McGraw Hill Professional. 2010. 464 p.
2. Official'nyj sajt sistemi Arcsight SIEM [Official web site of Arcsight SIEM]. Available at: <http://www.ndm.net/siem/main/arcsight-siem> (accessed 15.02.16).
3. Official'nyj sajt sistemi NetIQ Sentinel SIEM [Official web site of NetIQ Sentinel SIEM]. Available at: <https://www.netiq.com/products/sentinel/> (accessed 15.02.16).
4. Official'nyj sajt sistemi QRadar SIEM [Official web site of QRadar SIEM]. Available at: <http://q1labs.com/products/qradar-siem.aspx> (accessed 15.02.16).
5. Official'nyj sajt sistemi OSSIM SIEM [Official web site of OSSIM SIEM]. Available at: <http://communities.alienvault.com/> (accessed 15.02.16).
6. Kolomeec M.V., Chechulin A.A., Kotenko I.V. [Review of methodological primitives for the phased construction of data visualization model]. *Trudy SPIIRAS – SPIIRAS proceedings*. 2015. vol. 42. pp. 232–257. (In Russ.).
7. Klyshinskij E.S., Rysakov S.V., Shihov A.I. [Review of the methods of multidimensional data visualization]. *Novye Informacionnoe Tehnologii v Avtomatizirovannyh Sistemah – New information technologies in automated systems*. 2014. pp. 519–530. (In Russ.).
8. Goldstein B. Cognitive Psychology. Wadsworth, Cengage Learning. 2011. 472 p.
9. Sarkar M., Brown M. Graphical fisheye views. *Communications of the ACM*. 1994. vol. 37. no. 12. pp. 73–83.

10. Watson G. Lecture 15 – Visualisation of Abstract Information. Edin-burgh Virtual Environment Centre. 2004.
11. Wroblewski L. Small Multiples within a User Interface. Web Form Design. 2005.
12. Ferebee D., Dasgupta D. Security Visualization Survey. Proceedings of the 12th Colloquium for Information Systems Security Education University of Texas. 2008. 124 p.
13. Pupyrev S.N. *Modeli algoritmy i programnyj kompleks vizualizacii slozhnyh setej* [Models, algorithms and software complex for visualization of complex networks. PhD thesis]. Ekaterinburg. 2010. 21 p. (In Russ.).
14. Kotenko I.V., Novikova E.S. [Visual analysis for evaluation of security of computer networks.]. *Informacionno-upravlyayushie systemy – Information and Control Systems*. 2013. vol. 3. pp. 55–61. (In Russ.).
15. Kotenko I.V., Doynikova E.V., Chechulin A.A. Security metrics based on attack graphs for the Olympic Games scenario. IEEE Computer Society. 2014. pp. 561–568.
16. Erbacher R. Visualization Design for Immediate High-Level Situational Assessment. Proceedings of International Symposium on Visualization for Cyber Security (VizSec'12). 2012. pp. 17–24.
17. Matuszak W.J., DiPippo L., Lindsay Y. Sun CyberSAVE – Situational Awareness Visualization for Cyber Security of Smart Grid Systems. Proceedings of International Symposium on Visualization for Cyber Security (VisSec'13). 2013. pp. 25–32.
18. Kotenko I.V., Novikova E.S. Visualization of Security Metrics for Cyber Situation Awareness. IEEE Computer Society. 2014. pp. 506–513.
19. Bondarev A.E., Galaktionov V.A. [Investigation of multidimensional data in multi-parameter optimization with visualization techniques usage]. *Nauchnaia vizualizatsia – Scientific visualization*. 2012. vol. 4. no. 2. pp. 1–13. (In Russ.).
20. Kotenko I.V., Stepashkin M.V., Dojnikova E.V. Security analysis of information systems taking into account social engineering attacks]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti Kompyuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems*. 2011. vol. 3. pp. 40–57. (In Russ.).
21. Kotenko I., Polubelova O., Saenko I. The Ontological Approach for SIEM Data Repository Implementation. IEEE Computer Society. 2012. pp. 761–766.

**Прозоза Антон Александрович** — аспирант лаборатории проблем компьютерной безопасности, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: безопасность распределенных систем, визуализация данных. Число научных публикаций — 4. [pronoza@gmail.com](mailto:pronoza@gmail.com), <http://pronoza.ru>; 14-я линия В.О., д. 39, ком. 205, Санкт-Петербург, 199178; п.т.: 89500394868.

**Pronoza Anton Aleksandrovich** — PhD student of computer security problems laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: distributed system security, security visualization. The number of publications — 4. [pronoza@gmail.com](mailto:pronoza@gmail.com), <http://pronoza.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: 89500394868.

**Чечулин Андрей Алексеевич** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: безопасность компьютерных сетей, обнаружение вторжений, анализ сетевого трафика, анализ уязвимостей. Число научных публикаций — 150. [andreych@bk.ru](mailto:andreych@bk.ru), <http://comsec.spb.ru/ru/staff/chechulin>; 14-я линия В.О., д. 39, ком. 205, Санкт-Петербург, 199178; п.т.: +78123287181.

**Chechulin Andrey Alexeevich** — Ph.D., senior researcher of computer security problems laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Science (SPIIRAS). Research interests: computer network security, intrusion detection, analysis of the network traffic, vulnerability analysis. The number of publications — 150. andreych@bk.ru, <http://comsec.spb.ru/ru/staff/chechulin>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +78123287181.

**Котенко Игорь Витальевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией проблем компьютерной безопасности, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: безопасность компьютерных сетей, в том числе управление политиками безопасности, разграничение доступа, аутентификация, анализ защищенности, обнаружение компьютерных атак, межсетевые экраны, защита от вирусов и сетевых червей, анализ и верификация протоколов безопасности и систем защиты информации, защита программного обеспечения от взлома и управление цифровыми правами, технологии моделирования и визуализации для противодействия кибер-терроризму. Число научных публикаций — 450. ivkote@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; p.t.: +7(812)328–2642, Факс: +7(812)328–4450.

**Kotenko Igor Vitalievich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of computer security problems Laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: computer network security, including security policy management, access control, authentication, network security analysis, intrusion detection, firewalls, deception systems, malware protection, verification of security systems, digital right management, modeling, simulation and visualization technologies for counteraction to cyber terrorism. The number of publications — 450. ivkote@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328–2642, Fax: +7(812)328–4450.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №14-07-00697, 14-07-00417, 15-07-07451, 16-37-00338, 16-29-09482 офи\_м), при частичной поддержке бюджетных тем № 0073-2015-0004 и 0073-2015-0007, а также гранта РНФ 15-11-30029 в СПИИРАН.

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (projects No. 14-07-00697, 14-07-00417, 15-07-07451, 16-37-00338, 16-29-09482), in part by the budget (projects No. 0073-2015-0004 and 0073-2015-0007) and by the grant of RSF 15-11-30029 in SPIIRAS.

## РЕФЕРАТ

### *Проноза А.А., Чечулин А.А., Котенко И.В.* **Математические модели визуализации в SIEM-системах.**

В условиях постоянного роста количества разнородных данных, которые должны быть проанализированы оператором системы безопасности, весьма актуальна проблема разработки формальных математических моделей визуализации. Это необходимо как для построения новых подходов к визуализации, так и для повышения эффективности существующих.

В статье предложены математические модели визуализации данных в SIEM-системах. Модели визуализации служат для формализации трех основных этапов процесса визуализации. На первом этапе предлагаются модели, с помощью которых происходит унификация сведений об объектах компьютерной сети, имеющих разнородные структуры и различные источники. На втором этапе на базе построенных моделей формируется многомерная матрица связей. На третьем этапе предлагается унифицированный подход к визуализации различных аспектов безопасности компьютерной сети на основе построенной матрицы.

## SUMMARY

### *Pronoza A.A., Chechulin A.A., Kotenko I.V.* **Mathematical Models of Visualization in SIEM Systems.**

Development of new formal mathematical visualization models is an important task, especially when the amount of data, which should be analyzed by the operator, is constantly increasing. This is important both for developing new visualization approaches and enhancing existing ones.

The paper suggests the mathematical models of data visualization in SIEM-systems. The visualization models formalize three main stages of the visualization process. At the first stage the models are being suggested which fulfill the unification of data on the computer network objects having heterogeneous structures and different sources. At the second stage, on the basis of the suggested models, a multi-dimensional matrix of relations is generated. At the third stage a uniform approach to the visualization of various security aspects of the computer network on the basis of constructed matrix is proposed.

А.В. БУРДЕЛЕВ, В.Г. НИКОНОВ, И.И. ЛАПИКОВ  
**РАСПОЗНАВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЗЛА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, РЕАЛИЗОВАННОГО ПОРОГОВОЙ К-ЗНАЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ**

---

*Бурделев А.В., Никонов В.Г., Лапиков И.И. Распознавание параметров узла защиты информации, реализованного пороговой к-значной функцией.*

**Аннотация.** В статье рассматриваются некоторые подходы к распознаванию параметров пороговых  $k$ -значных функций, которые могут быть использованы для построения узлов обработки и защиты информации. Основное внимание сосредоточено на проблеме доказательства принадлежности некоторой  $k$ -значной функции к классу пороговых. Для решения этого вопроса предлагается использовать вводимые коэффициенты роста и возрастания, с помощью которых процедурно аппроксимируются коэффициенты линейной формы  $k$ -значной пороговой функции. На ряду с предложенным аналитическим подходом в статье рассматривается алгоритмический метод, основанный на сведении задачи нахождения порогового представления  $k$ -значной функции к системе линейных неравенств, для решения которой применяется модифицированный метод эллипсоидов Хачияна. На основании экспериментов проводится сравнительный анализ предложенных методов.

**Ключевые слова:** пороговая  $k$ -значная функция, пороговая логика, метод эллипсоидов, характеристика пороговой функции.

*Burdel'ov A.V., Nikonov V.G., Lapikov I.I. Recognizing Parameters of the Information Security Unit Implemented by the Threshold K-Valued Function.*

**Abstract.** This article discusses some approaches to the recognition of the parameters of the threshold  $k$ -valued functions, which can be used for building information processing and security units. The main focus is put on the issue of proving  $k$ -valued function belonging to the threshold class. For solving this problem it is proposed to use the input coefficients of expansion and increase. With the help of the latter, the coefficients of linear forms of the  $k$ -valued threshold function are procedurally approximated. Along with the proposed analytical approach, the article discusses an algorithmic method based on reducing the problem of finding a threshold representation of  $k$ -valued functions to the system of linear inequalities, for the solution of which the ellipsoid method, modified by Khachiyan, is applied. The comparative analysis of the proposed methods is carried out based on experiments.

**Keywords:** threshold  $k$ -valued function; threshold logic; ellipsoid method; the characterization of threshold functions.

---

**1. Введение.** В настоящее время наблюдается постоянное расширение круга задач, относящихся к сфере информационной безопасности. Прежде всего, это связано с увеличением объемов перерабатываемой информации и ростом быстродействия передающих каналов связи. Поэтому особый интерес представляет переход от битовых преобразований к преобразованиям в  $k$ -значной логике. Соответственно, возникает потребность построения узлов защиты информации в  $k$ -значной логике. С другой стороны, актуальным направлением развития современных вычислительных технологий является использование

бионических принципов моделирования нейронных сетей живых организмов, что привело к построению так называемых нейрокомпьютеров. Базовыми элементами нейрокомпьютера являются формальные нейроны, функционирование которых описывается пороговыми функциями – булевыми или, как показали последующие исследования,  $k$ -значными [6]. Переработка информации в нейросетях делает актуальным построение непосредственно в нейробазисе систем защиты информации, для которых основным узлом усложнения является пороговая функция. Определение параметров таких систем информационной безопасности составляет важнейшую задачу их анализа. Это же относится и к нахождению аналитического задания функции, реализующих преобразования в этих системах. Рассматриваемая в статье задача распознавания параметров пороговой функции относится к этому классу. Здесь необходимо подчеркнуть, что нахождение параметрического задания пороговой функции выходит за рамки исключительно прикладной задачи информационной безопасности. Эта задача является одной из важнейших и актуальных в целом в пороговой логике и ей в разных постановках посвящено большое число известных работ [1, 3, 12, 15, 16]. В тоже время подходы к ее постановке и решению, рассмотренные в данной статье, являются новыми. Во-первых, в большинстве известных работ внимание авторов было сосредоточено на построении одной плоскости, разделяющей рассматриваемое множество на два подмножества, как в булевом, так и в  $k$ -значном случаях, здесь же изучается представление в целом  $k$ -значной пороговой функции с помощью системы параллельных плоскостей. Во-вторых, в статье предложено два принципиально отличающихся приема решения поставленной задачи: параметрический, основанный на использовании коэффициентов роста и возрастания и алгоритмический, при котором задача сводится к системе линейных неравенств в действительной области, для решения которой применяется метод эллипсоидов Хачияна.

**2. Задача характеристики пороговой функции.** Важной задачей пороговой логики является задача распознавания принадлежности функции к классу пороговых. В случае ее положительного решения, возникает необходимость нахождения коэффициентов линейной формы и порога. Обе эти задачи взаимосвязаны, но, несмотря на простоту формулировки, являются достаточно сложными и рассматривались многими авторами [4, 5, 8, 17, 18]. В то же время подходы, предлагаемые в статье, представляются новыми и могут вызвать интерес у специалистов в данной научной области.

*Определение 1.* Функция  $k$ -значной логики  $f^k(x_1, \dots, x_n)$ , для которой существует линейная форма  $L(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$  с вещественными коэффициентами и набор вещественных порогов  $b_i$  такие, что для всех  $i \in \overline{0, k-1}$  выполняется условие:

$$f^k(x_1, \dots, x_n) = i \Leftrightarrow b_i \leq L(x_1, \dots, x_n) < b_{i+1},$$

называется пороговой  $k$ -значной функцией.

Одним из подходов к решению задачи нахождения коэффициентов линейной формы и порога в булевом случае является использование коэффициентов характеристического вектора функции в качестве модели первого приближения для коэффициентов  $a_1, \dots, a_n$  искомого порогового задания

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \geq b$$

булевой функции  $f(x_1, \dots, x_n)$ .

*Определение 2.* Пусть функция  $f(x)$ , представлена в базе  $\{-1, 1\}$ . Упорядоченный набор весов  $c_0, c_1, \dots, c_n$ , где

$$c_i = \sum_{x \in V_2^n} x_i f(x), \quad i = \overline{1, n},$$

$$c_0 = \sum_{x \in V_2^n} f(x)$$

называется характеристическим вектором  $c$  функции  $f(x)$ .

Коэффициенты характеристического вектора  $c_i, i = \overline{1, n}$  можно трактовать как параметры близости функции  $f(x)$  к функциям  $x_i$ .

*Определение 3.* Будем говорить, что линейная форма  $L(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$  дает точное разделение областей значений функции  $f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ , если для любого  $i \in \overline{0, k-2}$  выполняется строгое неравенство:

$$\max_{f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = i} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\} < \min_{f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = i+1} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\}.$$

В случае если построенная с помощью коэффициентов  $(a_1, \dots, a_n)$  линейная форма дает точное разделение областей зна-

чений функции  $f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ , границы  $b_0, b_1, \dots, b_k$  можно определить, например, следующим способом:

$$b_i = \min_{f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)=i} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\}, i = \overline{0, k-1}, \quad (1)$$

$$b_k = \max_{f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)=k} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\} + 1. \quad (2)$$

Подчеркнем, что коэффициенты характеристического вектора используются для первого приближения коэффициентов  $a_1, a_2, \dots, a_n$  искомого порогового задания:

$$a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \geq b.$$

В работе [2] изложены итеративные алгоритмы вычисления коэффициентов  $a_1, a_2, \dots, a_n$  с помощью коэффициентов  $c_1, \dots, c_n$  характеристического вектора функции: метод минимизации функционала [2, глава 3] и итеративный метод синтеза порогового элемента [2, глава 4]. Можно сделать вывод, что задача нахождения параметров пороговой булевой функции является объективно более сложной математической задачей, чем задача определение принадлежности функции классу пороговых функций, и сводится к итеративной процедуре.

**3. Параметры близости и отличия  $k$ -значных функций.** При рассмотрении вопроса построения порогового представления  $k$ -значной пороговой функции первой проблемой является выбор меры близости исходной функции к функциям  $x_i$ . Таких мер близости двух  $k$ -значных функций может быть предложено несколько.

*Определение 4.* Для функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  мультипликативным коэффициентом переменной  $x_i$  называется величина:

$$\xi_{x_i} = \sum_{(x_1, \dots, x_n)} (x_i f^k(x_1, \dots, x_n)).$$

*Определение 5.* Для функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  разностным коэффициентом переменной  $x_i$  называется величина:

$$\eta_{x_i} = \sum_{(x_1, \dots, x_n)} |x_i - f^k(x_1, \dots, x_n)|.$$

*Определение 6.* Для функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  квадратичным коэффициентом переменной  $x_i$  называется величина:

$$\delta_{x_i} = \sum_{(x_1, \dots, x_n)} (x_i - f^k(x_1, \dots, x_n))^2.$$

*Определение 7.* Для функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  коэффициентом роста по переменной  $x_i$  называется величина:

$$\Delta_{x_i} = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \sum_{\varepsilon=0}^{k-2} (f^k(x_1, \dots, x_{i-1}, \varepsilon+1, x_{i+1}, \dots, x_n) - f^k(x_1, \dots, x_{i-1}, \varepsilon, x_{i+1}, \dots, x_n)).$$

*Определение 8.* Для функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  коэффициентом возрастания по переменной  $x_i$  называется величина:

$$\lambda_{x_i} = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \sum_{\varepsilon=0}^{k-2} \sum_{l=\varepsilon+1}^{k-1} (f^k(x_1, \dots, x_{i-1}, \varepsilon+1, x_{i+1}, \dots, x_n) - f^k(x_1, \dots, x_{i-1}, l, x_{i+1}, \dots, x_n)).$$

Все введенные выше коэффициенты характеризуют меру близости функций  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  и  $x_i$ , однако для задачи нахождения аналитического представления  $k$ -значной пороговой функции они подходят с разной эффективностью. Так, для некоторых пороговых  $k$ -значных функций коэффициенты роста и возрастания приводят к прямому нахождению коэффициентов  $a_1, \dots, a_n$ , в то время как мультипликативные, разностные и квадратичные коэффициенты не дают построения разделяющей плоскости. Рассмотрим пример.

*Пример 1.* Рассмотрим функцию  $f^3(x_1, x_2, x_3) : \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_3 \rightarrow \mathbb{Z}_3$ , графически представленную на рисунке 1, которая задается линейной формой  $L(x_1, x_2, x_3) = 3x_1 + 2x_2 + x_3$  и системой порогов следующим образом:

$$f^3(x_1, x_2, x_3) = 0 \Leftrightarrow 0 \leq L(x_1, x_2, x_3) < 5,$$

$$f^3(x_1, x_2, x_3) = 1 \Leftrightarrow 5 \leq L(x_1, x_2, x_3) < 8,$$

$$f^3(x_1, x_2, x_3) = 2 \Leftrightarrow 8 \leq L(x_1, x_2, x_3) < 13.$$

Для данной функции введенные выше коэффициенты равны:

1. Мультипликативные коэффициенты:  $\xi_{x_1} = 41$ ,  $\xi_{x_2} = 35$ ,

$$\xi_{x_3} = 31.$$

2. Разностные коэффициенты:  $\eta_{x_1} = 8$ ,  $\eta_{x_2} = 16$ ,  $\eta_{x_3} = 20$ .

3. Квадратичные коэффициенты:  $\delta_{x_1} = 8$ ,  $\delta_{x_2} = 20$ ,  $\delta_{x_3} = 28$ .

4. Коэффициенты роста:  $\Delta_{x_1} = 14$ ,  $\Delta_{x_2} = 8$ ,  $\Delta_{x_3} = 4$ .
5. Коэффициенты возрастания:  $\lambda_{x_1} = 28$ ,  $\lambda_{x_2} = 16$ ,  $\lambda_{x_3} = 8$ .

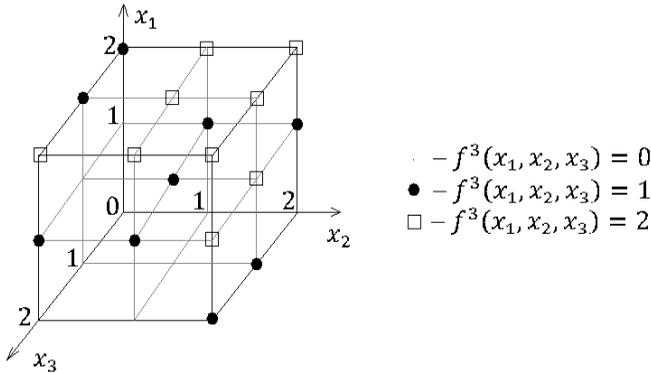


Рис. 1. Графическое представление функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$

Коэффициенты роста и коэффициенты возрастания сразу дают разделяющую плоскость.

Действительно, составив из коэффициентов роста функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$  линейную форму  $L'(x_1, x_2) = 14x_1 + 8x_2 + 4x_3$ , получаем точное разделение областей значений функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$ . После вычисления границ по формулам (1), (2)  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 20$ ,  $b_2 = 34$ ,  $b_3 = 53$ , приведенным выше способом, получим реализацию функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$ :

$$\begin{aligned}
 f^3(x_1, x_2, x_3) = 0 &\Leftrightarrow 0 \leq L'(x_1, x_2, x_3) < 20, \\
 f^3(x_1, x_2, x_3) = 1 &\Leftrightarrow 20 \leq L'(x_1, x_2, x_3) < 34, \\
 f^3(x_1, x_2, x_3) = 2 &\Leftrightarrow 34 \leq L'(x_1, x_2, x_3) < 53.
 \end{aligned}$$

Составив из коэффициентов возрастания функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$  линейную форму  $L''(x_1, x_2) = 28x_1 + 16x_2 + 8x_3$ , также получаем точное разделение областей значений функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$ . После вычисления границ  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 40$ ,  $b_2 = 68$ ,  $b_3 = 103$ , приведенным выше способом, получаем реализацию функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$ :

$$f^3(x_1, x_2, x_3) = 0 \Leftrightarrow 0 \leq L''(x_1, x_2, x_3) < 40,$$

$$f^3(x_1, x_2, x_3) = 1 \Leftrightarrow 40 \leq L''(x_1, x_2, x_3) < 68,$$

$$f^3(x_1, x_2, x_3) = 2 \Leftrightarrow 68 \leq L''(x_1, x_2, x_3) < 103.$$

Таким образом, вычисление коэффициентов роста и возрастания функции  $f^3(x_1, x_2, x_3)$  сразу решает задачу характеристики. При этом мультипликативные, разностные и квадратичные коэффициенты не дают построения разделяющей плоскости. Таким образом, пример 1 показывает, что в дальнейшем целесообразно рассматривать только коэффициенты роста и возрастания.

**4. Нахождение порогового представления  $k$ -значной функции с помощью коэффициентов роста и возрастания.** Оставшиеся в рассмотрении коэффициенты роста и возрастания не одинаково эффективно характеризуют пороговые  $k$ -значные функции. Так, использование коэффициентов роста не всегда приводит к непосредственному нахождению коэффициентов  $a_1, \dots, a_n$ .

*Пример 2.* Рассмотрим функцию  $f^4(x_1, x_2): \mathbb{Z}_4 \times \mathbb{Z}_4 \rightarrow \mathbb{Z}_4$ , графически представленную на рисунке 2, которая задается линейной формой  $L(x_1, x_2) = 2x_1 + 5x_2$  и системой порогов следующим образом:

$$f^4(x_1, x_2) = 0 \Leftrightarrow 0 \leq L(x_1, x_2) < 6,$$

$$f^4(x_1, x_2) = 1 \Leftrightarrow 6 \leq L(x_1, x_2) < 11,$$

$$f^4(x_1, x_2) = 2 \Leftrightarrow 11 \leq L(x_1, x_2) < 17,$$

$$f^4(x_1, x_2) = 3 \Leftrightarrow 17 \leq L(x_1, x_2).$$

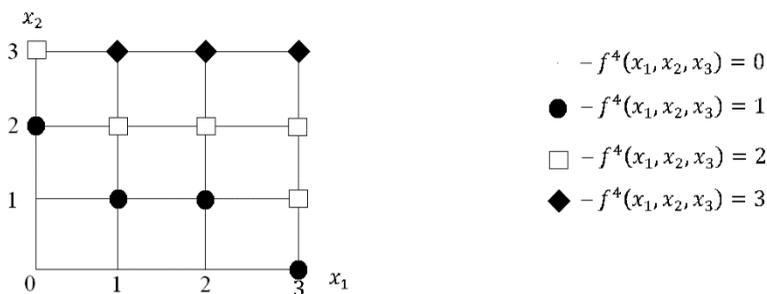


Рис. 2. Графическое представление функции  $f^4(x_1, x_2)$

Для данной функции коэффициенты роста и возрастания равны:

1. Коэффициенты роста:  $\Delta_{x_1} = 5$ ,  $\Delta_{x_2} = 10$ .

2. Коэффициенты возрастания:  $\lambda_{x_1} = 15$ ,  $\lambda_{x_2} = 33$ .

Построенная с помощью коэффициентов роста  $\Delta_{x_1} = 5$ ,

$\Delta_{x_2} = 10$  линейная форма  $L'(x_1, x_2) = 5x_1 + 10x_2$  не дает точное разделение областей значений функции  $f^4(x_1, x_2)$ :

$$\max_{f^4(x_1, x_2)=2} \{5x_1 + 10x_2\} = L'(3, 2) = 35 = L'(1, 3) = \min_{f^4(x_1, x_2)=3} \{5x_1 + 10x_2\}.$$

Построенная с помощью коэффициентов возрастания  $\lambda_{x_1} = 15$  и  $\lambda_{x_2} = 33$  линейная форма  $L''(x_1, x_2) = 15x_1 + 33x_2$  дает точное разделение областей значений функции  $f^3(x_1, x_2)$ : вычислив границы  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 45$ ,  $b_2 = 78$ ,  $b_3 = 114$ ,  $b_4 = 145$ , получаем реализацию функции  $f^3(x_1, x_2)$ :

$$f^4(x_1, x_2) = 0 \Leftrightarrow 0 \leq L''(x_1, x_2) < 45,$$

$$f^4(x_1, x_2) = 1 \Leftrightarrow 45 \leq L''(x_1, x_2) < 78,$$

$$f^4(x_1, x_2) = 2 \Leftrightarrow 78 \leq L''(x_1, x_2) < 114,$$

$$f^4(x_1, x_2) = 3 \Leftrightarrow 114 \leq L''(x_1, x_2) < 145.$$

Из примера 2 видно, что линейная форма, построенная с помощью коэффициентов роста, не всегда дает точное разделение областей значений функции. На основании примера можно заключить, что при нахождении линейной формы предпочтение стоит отдать использованию коэффициентов возрастания, которые дают более точное приближение коэффициентов линейной формы.

Так как в булевом случае подобная задача решается итеративно [см. 2], то следует ожидать, что и коэффициенты возрастания также не всегда дадут точное разделение областей значений функции. Это подтверждает следующий пример.

*Пример 3.* Рассмотрим функцию  $f^4(x_1, x_2): \mathbb{Z}_4 \times \mathbb{Z}_4 \rightarrow \mathbb{Z}_4$ , графически представленную на рисунке 3, которая задается линейной формой  $L(x_1, x_2) = 5x_1 + x_2$  и системой порогов следующим образом:

$$\begin{aligned}
 f^4(x_1, x_2) = 0 &\Leftrightarrow 0 \leq L(x_1, x_2) < 15,5, \\
 f^4(x_1, x_2) = 1 &\Leftrightarrow 15,5 \leq L(x_1, x_2) < 16,5, \\
 f^4(x_1, x_2) = 2 &\Leftrightarrow 16,5 \leq L(x_1, x_2) < 17,5, \\
 f^4(x_1, x_2) = 3 &\Leftrightarrow 17,5 \leq L(x_1, x_2).
 \end{aligned}$$

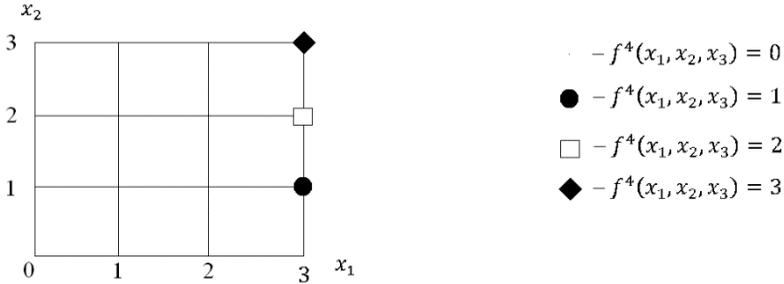


Рис. 3. Графическое представление функции  $f^4(x_1, x_2)$ .

Коэффициенты роста и возрастания данной функции равны:

1. Коэффициенты роста:  $\Delta_{x_1} = 6$ ,  $\Delta_{x_2} = 3$ .
2. Коэффициенты возрастания:  $\lambda_{x_1} = 18$ ,  $\lambda_{x_2} = 10$ .

Линейная форма  $L'(x_1, x_2) = 6x_1 + 3x_2$ , полученная с помощью коэффициентов роста, не дает точное разделение областей значений функции  $f^4(x_1, x_2)$ :

$$\min_{f^4(x_1, x_2)=1} \{6x_1 + 3x_2\} = L'(3,1) = 21 = L'(2,3) = \max_{f^4(x_1, x_2)=0} \{6x_1 + 3x_2\}.$$

Линейная форма  $L''(x_1, x_2) = 18x_1 + 10x_2$ , полученная с помощью коэффициентов возрастания, также не дает точное разделение областей значений функции  $f^4(x_1, x_2)$ :

$$\min_{f^4(x_1, x_2)=1} \{18x_1 + 10x_2\} = L''(3,1) = 64 < 66 = L''(2,3) = \max_{f^4(x_1, x_2)=0} \{18x_1 + 10x_2\}.$$

Таким образом, ни один из предложенных вариантов трактовки близости или отличия двух  $k$ -значных функций для характеристики пороговых функций не дает точное разделение областей значений функции. При этом в роли первичного приближения коэффициентов линейной формы целесообразно использовать коэффициенты возрастания

тания. В дальнейшем аналогично булевому случаю необходимо введение итеративной процедуры.

**5. Применение итеративной процедуры для нахождения коэффициентов линейной формы.** Для характеристики  $k$ -значных пороговых функций целесообразно вычислять первичное приближение коэффициентов линейной формы с помощью коэффициентов возрастания. Далее необходимо введение итеративной процедуры для нахождения коэффициентов линейной формы, дающей точное разделение. На идейном уровне можно предложить следующую процедуру.

Пусть построенная с помощью коэффициентов роста линейная форма  $L(x_1, \dots, x_n)$  не дает точное разделение областей значений функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$ , то есть существует  $i \in \overline{0, k-2}$  такое, что выполняется неравенство:

$$\max_{f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)=i} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\} \geq \min_{f^k(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)=i+1} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\}.$$

Рассмотрим точки:

$$A = (u_1, \dots, u_n) \in M_i = \{x: f(x) = i\} \text{ и} \\ B = (v_1, \dots, v_n) \in M_{i+1} = \{x: f(x) = i+1\},$$

такие, что линейная форма  $L(x_1, \dots, x_n)$  принимает на них максимальное значение из множества  $M_i$  и минимальное значение из множества  $M_{i+1}$  соответственно. Таких точек может быть несколько. Для них выполняется неравенство:

$$L(A) \geq L(B).$$

Уравнение:

$$L(x_1, \dots, x_n) = b, \quad b \in \mathbb{R}$$

задает гиперплоскость, пересекающую  $n$ -мерный куб (рисунок 4).

Предлагаемая процедура корректировки должна наклонить множество гиперплоскостей, задающихся линейной формой  $L(x_1, \dots, x_n)$  так, чтобы после смещения гиперплоскость отсекала точки А и В в ином порядке, чем до корректировки.

Наклон «в нужную сторону» можно задать прибавлением к линейной форме  $L(x_1, \dots, x_n)$  двух линейных форм, соответствующих двум рассматриваемым точкам А и В. Эти две линейные формы со-

ставляются по координатам точек А и В, и берутся с разными знаками: в первую линейную форму подставляются координаты точки В, во вторую – координаты точки А с отрицательными знаками:

$$L'(x_1, \dots, x_n) = L(x_1, \dots, x_n) + v_1x_1 + \dots + v_nx_n - u_1x_1 - \dots - u_nx_n.$$

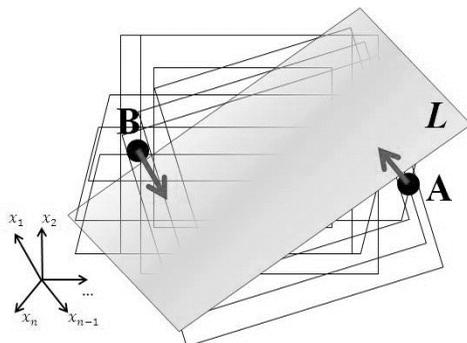


Рис. 4. Графическое представление рассечения  $n$ -мерного куба гиперплоскостью

Для полученной таким образом линейной формы  $L'(x_1, \dots, x_n)$  вычисляются ее значения на множествах:

$$M_i = \{x : f(x) = i\}, \quad i \in \overline{0, k-1},$$

и сравнением соответствующих минимальных и максимальных значений определяется, дает ли она точное разделение областей значений функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$ . Если она не дает точное разделение, то процедура повторяется. Если после корректировки линейная форма дает точное разделение областей значений функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$ , то алгоритм заканчивает работу: коэффициенты линейной формы найдены.

Возможно, что в случае закливания алгоритма необходимо будет прибавлять корректирующие линейные формы с коэффициентами  $c_1$  и  $c_2$  меньшими единицы:

$$L'(x_1, \dots, x_n) = L(x_1, \dots, x_n) + c_1(v_1x_1 + \dots + v_nx_n) - c_2(u_1x_1 - \dots - u_nx_n).$$

*Пример 6.* Рассмотрим коррекцию линейной формы:

$$L(x_1, x_2) = 18x_1 + 10x_2, \quad (3)$$

полученную с помощью коэффициентов возрастания в примере 5. Точному разделению мешают точки (3,1) и (2,3). Прибавим соответствующие линейные формы в (3). Получим:

$$L(x_1, x_2) = 18x_1 + 10x_2 + 3x_1 + 1x_2 - 2x_1 - 3x_2 = 19x_1 + 8x_2.$$

Данная линейная форма дает точное разделение областей значений функции  $f^4(x_1, x_2)$  и исправляет нарушение разделения в корректируемых точках:

$$\min_{f^4(x_1, x_2)=1} \{19x_1 + 8x_2\} = L(3,1) = 65 > 62 = L(2,3) = \max_{f^4(x_1, x_2)=0} \{19x_1 + 8x_2\}.$$

**6. Применение метода эллипсоидов Хачияна для нахождения коэффициентов линейной формы.** В общем случае с теоретической точки зрения задача нахождения порогового представления  $k$ -значной функции  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  сводится к решению системы неравенств, вообще говоря, двухсторонних для каждого значения  $i$  вида:

$$b_i \leq a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n < b_{i+1},$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — известные координаты векторов, на которых функция принимает соответствующие значения, а параметры  $a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_k$  — неизвестные.

Действительно, если функция  $f^k(x_1, \dots, x_n)$  задана таблично и является пороговой, то ее значение в каждой точке  $(x_1, \dots, x_n) = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$  приводит к формированию одного, вообще говоря, двустороннего неравенства вида:

$$f^k(x_1, \dots, x_n) = i \Leftrightarrow b_i \leq a_1\varepsilon_1 + a_2\varepsilon_2 + \dots + a_n\varepsilon_n < b_{i+1}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  — известные, принимают значения  $\varepsilon_i \in \{0, \dots, k-1\}$ , а коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_n$  и пороги  $b_0, b_1, \dots, b_k$  — неизвестны. Совокупность неравенств (4) для всех точек  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$  формирует систему:

$$\begin{cases} b_0 \leq a_1\varepsilon_1^{(1)} + a_2\varepsilon_2^{(1)} + \dots + a_n\varepsilon_n^{(1)} < b_1, \\ b_{k-1} \leq a_1\varepsilon_1^{(k^n)} + a_2\varepsilon_2^{(k^n)} + \dots + a_n\varepsilon_n^{(k^n)} < b_k. \end{cases} \quad (5)$$

с целочисленными коэффициентами и действительными неизвестными. Полученная система (5) в точности соответствует системе линейных неравенств, рассмотренных Хачияном [9]. Для решения (5) им был предложен полиномиальный алгоритм эллипсоидов, который за известное число шагов дает ответ: совместима система (5) или нет. В случае совместимости определяет решение. Алгоритм используется для решения систем из  $m \geq 2$  линейных неравенств относительно  $n \geq 2$  действительных неизвестных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m, \end{cases} \quad (6)$$

с целыми коэффициентами  $a_{ij}, b_i$ , для которой вводится понятие длины входа системы:

$$L = \left[ \sum_{i,j=1}^{m,n} \log_2(|a_{i,j}|+1) + \sum_{i=1}^m \log_2(|b_i|+1) + \log_2 mn \right] + 1, \quad (7)$$

т.е. число символов, необходимых для записи коэффициентов в двоичной системе. Для удобства рассматриваемые в дальнейшем системы запишем в виде (8):

$$A_i x \leq b_i, i = \overline{1, m}, \quad (8)$$

где  $A_i$  — строки матрицы коэффициентов системы (6), а  $b_i$  — свободные члены.

Методику сведения рассмотрим на примере функции 4-значной логики  $\varphi$  от переменных  $x_1, x_2, x_i \in \{0, 1, 2, 3\}$ , которая задана таблично (см. Таблицу 1) на всех наборах значений аргументов.

Таблица 1 Табличное задание функции  $\varphi(x_1, x_2)$  на всех наборах аргументов

$x_1$	$x_2$	$\varphi(x_1, x_2)$	$x_1$	$x_2$	$\varphi(x_1, x_2)$
0	0	0	2	0	0
0	1	0	2	1	0
0	2	0	2	2	0
0	3	0	2	3	0
1	0	0	3	0	0
1	1	0	3	1	1
1	2	0	3	2	2
1	3	0	3	3	3

Задача нахождения аналитического представления пороговой функции  $f$  от переменных  $x_1, x_2, x_i \in \{0,1,2,3\}$  сводится к задаче нахождения линейной формы  $L(u_1, u_2) = a_1 u_1 + a_2 u_2$  и системы порогов  $b_\alpha$  таких, что  $f(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \alpha \Leftrightarrow b_\alpha < L(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \leq b_{\alpha+1}, \alpha \in \{0,1,2,3\}$ .

Причем для  $\alpha = 0$  и  $\alpha = 3$  пороговое ограничение линейной формы  $L(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  будет иметь односторонний характер, то есть вся система ограничений будет иметь вид:

$$\begin{cases} f(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = 0 \Leftrightarrow L(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \leq b_0, \\ f(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = 1 \Leftrightarrow b_0 < L(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \leq b_1, \\ f(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = 2 \Leftrightarrow b_1 < L(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \leq b_2, \\ f(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = 3 \Leftrightarrow L(\varepsilon_1, \varepsilon_2) > b_2. \end{cases} \quad (9)$$

Рассмотрим методику формирования системы линейных неравенств с использованием таблицы 1 и системы ограничений (9). Сформируем неравенства для каждого значения функции  $\varphi(x_1, x_2)$ .

Пусть  $\varphi(x_1, x_2) = 0$ , тогда получим следующие неравенства:

$$\begin{array}{ll} 0 \leq b_0, & a_1 + 3a_2 \leq b_0, \\ a_2 \leq b_0, & 2a_1 \leq b_0, \\ 2a_2 \leq b_0, & 2a_1 + a_2 \leq b_0, \\ 3a_2 \leq b_0, & 2a_1 + 2a_2 \leq b_0, \\ a_1 \leq b_0, & 2a_1 + 3a_2 \leq b_0, \\ a_1 + a_2 \leq b_0, & 3a_1 \leq b_0, \\ a_1 + 2a_2 \leq b_0, & \end{array}$$

Для  $\varphi(x_1, x_2) = 1$ , получим ограничение:

$$b_0 < 3a_1 + a_2 \leq b_1 \Leftrightarrow \begin{cases} 3a_1 + a_2 \leq b_1, \\ -3a_1 - a_2 + b_0 \leq -1. \end{cases}$$

Для  $\varphi(x_1, x_2) = 2$ , получим ограничение:

$$b_1 < 3a_1 + 2a_2 \leq b_2 \Leftrightarrow \begin{cases} 3a_1 + 2a_2 \leq b_2, \\ -3a_1 - 2a_2 + b_1 \leq -1. \end{cases}$$

Для  $\varphi(x_1, x_2) = 3$ , получим ограничение:

$$3a_1 + 3a_2 > b_2 \Leftrightarrow 3a_1 + 3a_2 \geq b_2 + 1.$$

Таким образом, приводя все неравенства к виду (8), получим систему линейных неравенств (10) с 5 неизвестными  $a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} -b_0 \leq 0, \\ a_2 - b_0 \leq 0, \\ 3a_2 - b_0 \leq 0, \\ a_1 - b_0 \leq 0, \\ a_1 + a_2 - b_0 \leq 0, \\ a_1 + 2a_2 - b_0 \leq 0, \\ a_1 + 3a_2 - b_0 \leq 0, \\ 2a_1 - b_0 \leq 0, \\ 2a_1 + a_2 - b_0 \leq 0, \\ 2a_1 + 2a_2 - b_0 \leq 0, \\ 2a_1 + 3a_2 - b_0 \leq 0 \\ 3a_1 - b_0 \leq 0, \\ 3a_1 + a_2 - b_1 \leq 0, \\ -3a_1 - a_2 + b_0 \leq -1, \\ 3a_1 + 2a_2 - b_2 \leq 0, \\ -3a_1 - 2a_2 + b_1 - 1, \\ -3a_1 - 3a_2 + b_2 \leq -1. \end{array} \right. \quad (10)$$

Для решения системы (10) применим модифицированный алгоритм, основанный на методе эллипсоидов Л.Г Хачияна. Модифицируем полиномиальный алгоритм Хачияна, введя дополнительный критерий выхода из алгоритма по отрицательной невязке в центре эллипсоида, полученного на очередной итерации алгоритма. Этот критерий является корректным поскольку  $\theta(x_k) = \max_{i=1..m} \{A_i^T x_k - b_i\}$  и если  $\theta(x_k) \leq 0$ , то очевидно, что все неравенства системы вида (1) выполняются и центр очередного эллипсоида  $x_k$  попадает в многогранник решений системы (1). Если исходная система (1) несовместна, то выход по введённому критерию невозможен, поскольку коэффициент

невязки  $\theta(x_k)$  будет положительным на всех  $6n^2L$  итерациях, где  $n$  — количество неизвестных в системе (1),  $L$  — длина входа системы [9].

Следовательно, данная модификация никак не повлияет на корректность работы всего алгоритма в целом и все леммы из [7] так же будут верны. По описанной методике алгоритм находит решение системы линейных неравенств (10) за 46 итераций. Центр эллипсоида на 46 итерации определяется:

$$x_{45} = \begin{pmatrix} 3.61960930519009E + 20 \\ 1.47740024806186E + 20 \\ 1.18037089474546E + 21 \\ 1,3317378744761E + 21 \\ 1,42000658030312E + 21 \end{pmatrix},$$

которая соответствует вектору неизвестных  $\bar{X} = (a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$ . Произведем округление и сокращение на  $10^{20}$  и запишем окончательное решение  $\bar{X}_{\text{оконч}} = (3.62, 1.48, 11.8, 13.31, 14.22)$ .

Таким образом, искомая пороговая функция  $f$  описывается линейной формой:

$$L(u_1, u_2) = 3.62u_1 + 1.48u_2$$

и системой порогов  $b_i = (b_0, b_1, b_2) = (11.8, 13.31, 14.22)$ .

Непосредственная проверка для всех наборов значений аргументов подтверждает, что найденное аналитическое представление пороговой функции заданного таблично отображения в  $k$ -значной области является корректным. Приведенная методика может быть обобщена для нахождения аналитического представления всех таблично заданных функции  $k$ -значной логики. Причем, если мы с достаточной степенью достоверности сможем утверждать о несовместности полученной системы линейных неравенств, то можно будет предположить, что заданная таблично функция  $k$ -значной логики не имеет порогового представления.

**7. Заключение.** Предложенные в данной статье подходы к распознаванию параметров  $k$ -значной пороговой функции являются новыми, а то обстоятельство, что все они приводят к решению, позволяет дать им в целом положительную оценку. Их более глубокое изучение и

проведение сопоставительного анализа определяют направление для дальнейших исследований в данной области.

### Литература

1. *Бутаков Е.А.* Методы синтеза релейных устройств из пороговых элементов // М: Энергия. 1970. 328 с.
2. *Дертоуэс М.* Пороговая логика // М.: Мир. 1967. 344 с.
3. *Зуев А.Ю.* Пороговые функции и пороговые представления булевых функций // Математические вопросы кибернетики. 1994. № 5. С. 5–61.
4. *Никонов В.Г.* Пороговые представления булевых функций // Обозрение прикл. и промышл. матем. 1994. Вып. 1. № 3. С. 458–545.
5. *Никонов В.Г., Никонов Н.В.* Особенности пороговых представлений  $k$ -значных функций // Труды по дискр. матем. 2008. Вып. 11. № 1. С. 60–85.
6. *Вальцев В.Б., Григорьев В.Р., Никонов В.Г.* Некоторые структурные принципы организации высших функций мозга // Нейрокомпьютер как основа мыслящих ЭВМ. 1993. С. 38–46.
7. *Хачиян Л.Г.* Полиномиальные алгоритмы в линейном программировании // ЖВМиМФ. 1980. Вып. 20. № 1. С. 51–68.
8. *Золотых Н.Ю.* Расшифровка пороговой функции, заданной расширенным оракулом // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 3(1). С. 175–178.
9. *Хачиян Л.Г.* Полиномиальный алгоритм в линейном программировании // Докл. АН СССР. 1978. Вып. 244. № 5. С. 1093–1096.
10. *Кудряцев В.Б.* Теория тестового распознавания // Дискретная математика. 2006. Вып. 18. № 3. С. 3–34.
11. *Winder R.O.* The status of threshold logic // RCA Review. 1969. vol. 30. no. 1. pp. 62–84.
12. *Золотых Н.Ю.* Расшифровка пороговых и близких к ним функций многозначной логики // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород: Нижегородский гос. университет им. Н. И. Лобачевского. 1998. 12 с.
13. *Загоруйко Н.Г.* Прикладные методы анализа данных и знаний // Новосибирск: ИМ СО РАНю 1999. 270 с.
14. *Золотых Н.Ю.* О пороговых и близких к ним функциях, определенных в целочисленных точках политопа // Дискретный анализ и исследование операций: серия 1. 1998. Вып. 5. № 2. С. 40–54.
15. *Кудряцев В.Б.* Теория тестового распознавания // Дискретная математика. 2006. Вып. 18. № 3. С. 3–34.
16. *Журавлев Ю.И.* Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. 1978. №. 33. С. 5–68.
17. *Goldberg P.W.* Learning fixed-dimension linear thresholds from fragmented data // Information and Computation. 2001. vol. 171. no. 1. pp. 98–122.
18. *Irtatov A.A.* Arrangements of hyperplanes and the number of threshold functions // Acta Applicandae Mathematicae. 2001. vol. 68. no. 1–3. pp. 211–226.

## References

1. Butakov E.A. *Metody sinteza relejnyh ustrojstv iz porogovyh jelementov* [Methods for synthesis of relay devices of the threshold elements]. M: Jenergija. 1970. 328 p. (In Russ.).
2. Dertouzos M. *Porogovaja logika* [The threshold logic]. M.: Mir. 1967. 344 p. (In Russ.).
3. Zuev A.Ju. [The threshold function and threshold representations of Boolean functions]. *Matematicheskie voprosy kibernetiki – Mathematical problems of cybernetics*. 1994. no. 5. pp. 5–61. (In Russ.).
4. Nikonov V.G. [The threshold representations of Boolean functions]. *Obozrenie prikl. i promysl. matem. – Review of Applied and Industrial Mathematics*. 1994. vol. 1. no. 3. pp. 458–545. (In Russ.).
5. Nikonov V.G., Nikonov N.V. [Features of threshold representations of k-valued functions]. *Trudy po disk. matem. – Proceeding on Discrete Mathematics*. 2008. vol. 11. no. 1. pp. 60–85. (In Russ.).
6. Val'cev V.B., Grigor'ev V.R., Nikonov V.G. [Some structural principles of higher brain functions]. *Nejrokomp'juter kak osnova mysljashhij JeVM – Neurocomputer as a basis for thinking computer*. 1993. pp. 38–46. (In Russ.).
7. Hachijan L.G. [Polynomial algorithms in linear programming]. *ZhVMiMF – CMAmpJ*. 1980. vol. 20. no. 1. pp. 51–68. (In Russ.).
8. Zolotyh N.Ju. [Deciphering of threshold functions, given the advanced oracle]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo – Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky*. 2012. no. 3(1). pp. 175–178. (In Russ.).
9. Hachijan L.G. [A polynomial algorithm for linear programming]. *Dokl. AN SSSR – Reports of the AS USSR*. 1978. vol. 244. no. 5. pp. 1093–1096. (In Russ.).
10. Kudrjavcev V.B. [Test recognition theory]. *Diskretnaja matematika – Discrete Math*. 2006. vol. 18. no. 3. pp. 3–34. (In Russ.).
11. Winder R.O. The status of threshold logic. *RCA Review*. 1969. vol. 30. no. 1. pp. 62–84.
12. Zolotyh N. Ju. *Rasshifrovka porogovyh i blizkih k nim funkcij mnogoznachnoj logiki*. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kand. fiz.-mat. nauk. [Deciphering of threshold and similar functions of many-valued logic. Abstract of the thesis for the degree of Cand. Sci. Sciences]. Nizhnij Novgorod: Nizhegorodskij gos. universitet im. N.I. Lobachevskogo. 1998. 12 p. (In Russ.).
13. Zagorujko N. G. *Prikladnye metody analiza dannyh i znaniy* [Applied methods of data analysis and knowledge]. Novosibirsk: IM SO RAN. 1999. 270 p. (In Russ.).
14. Zolotyh N.Ju. [On threshold and nearly threshold functions defined at integer points of a polytope]. *Diskretnyj analiz i issledovanie operacij. Serija 1 – Discrete Analysis and Operations Research: Series 1*. 1998. vol. 5. no. 2. pp. 40–54. (In Russ.).
15. Kudrjavcev V.B. [Test recognition theory]. *Diskretnaja matematika – Discrete Math*. 2006. vol. 18. no. 3. pp. 3–34. (In Russ.).
16. Zhuravlev Ju.I. [On the algebraic approach to solving the problems of recognition and classification]. *Problemy kibernetiki – Problems of Cybernetics*. 1978. vol. 33. pp. 5–68. (In Russ.).
17. Goldberg P.W. Learning fixed-dimension linear thresholds from fragmented data. *Information and Computation*. 2001. vol. 171. no. 1. pp. 98–122.
18. Irmatov A.A. Arrangements of hyperplanes and the number of threshold functions. *Acta Applicandae Mathematicae*. 2001. vol. 68. no. 1–3. pp. 211–226.

**Бурделев Александр Владимирович** — старший преподаватель кафедры математического моделирования и анализа данных факультета прикладной математики и информатики, Белорусский государственный университет (БГУ). Область научных интересов: пороговая логика, построение пороговых функций, распознавание параметров k-значных

функций. Число научных публикаций — 3. [aburd2011@mail.ru](mailto:aburd2011@mail.ru); пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь; р.т.: +375445737505.

**Burdel'jov Aleksandr Vladimirovich** — senior lecturer of mathematical modeling and data analysis department of faculty of applied mathematics and computer science, Belarusian State University (BSU). Research interests: threshold logic, constructing threshold functions, parameter detection k-valued functions. The number of publications — 3. [aburd2011@mail.ru](mailto:aburd2011@mail.ru); 4, pr-t Nezavisimosty, Minsk, 220030, Belarus; office phone: +375445737505.

**Никонов Владимир Глебович** — д-р техн. наук, доцент, член Президиума, Российская академия естественных наук. Область научных интересов: теория запретов k-значных функций, булевы графы, пороговая логика, теория алгоритмов. Число научных публикаций — 200. [nikonovu@yandex.ru](mailto:nikonovu@yandex.ru); Сивцев Вражек пер., 29/16, Москва, 119002; .

**Nikonov Vladimir Glebovich** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, member of the Presidium of the Russian Academy of natural Sciences. Research interests: bans the theory of k-valued functions, Boolean graphs, threshold logic, theory of algorithms. The number of publications — 200. [nikonovu@yandex.ru](mailto:nikonovu@yandex.ru); 29/16, Sivtsev Vrazhek lane., Moscow, 119002; .

**Лаников Игорь Игоревич** — сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт «КВАНТ». Область научных интересов: методы решения систем линейных неравенств с k-значными неизвестными, метод эллипсоидов, характеристика пороговых функций, теория алгоритмов. Число научных публикаций — 3. [landoflord@ya.ru](mailto:landoflord@ya.ru); 4-й Лихачевский пер., 15, Москва, 125438; р.т.: +79114783991.

**Lapikov Igor' Igorevich** — employee, "RDI "KVANT". Research interests: methods of solving systems of linear inequalities with k-valued unknowns, the method of ellipsoids, the characterization of threshold functions, theory of algorithms. The number of publications — 3. [landoflord@ya.ru](mailto:landoflord@ya.ru); 15, 4-th lihachevsky per., Moscow, 125438, Russia; office phone: +79114783991.

## РЕФЕРАТ

*Бурделев А.В., Никонов В.Г., Лапиков И.И.* **Распознавание параметров узла защиты информации, реализованного пороговой k-значной функцией.**

В данной статье рассматриваются аналитический и алгоритмический подходы к распознаванию параметров пороговых k-значных функций, которые могут быть использованы для построения узлов обработки и защиты информации. Основное внимание сосредоточено на проблеме доказательства принадлежности некоторой k-значной функции к классу пороговых. Для аналитического решения этой проблемы предлагается использовать коэффициенты роста и возрастания, на основе которых строится итеративный алгоритм нахождения коэффициентов линейной формы k-значной пороговой функции. Наряду с этим в статье рассматривается алгоритмический подход, основанный на сведении задачи нахождения порогового представления k-значной функции к системе линейных неравенств, для решения которой применяется модифицированный метод эллипсоидов Хачияна. Для рассмотренных подходов приведены результаты экспериментальных исследований, на основании которых проводится их сравнительный анализ.

## SUMMARY

*Burdeljov A.V., Nikonov V.G., Lapikov I.I.* **Recognizing Parameters of the Information Security Unit Implemented by the Threshold K-Valued Function.**

This article discusses analytical and algorithmic approaches to the recognition of the parameters of the threshold k-valued functions, which can be used for building information processing and security units. The main focus is put on the issue of proving k-valued function belonging to the threshold class. In order to find an analytical solution to this problem it is proposed to use the input coefficients of expansion and increase, based on which an iterative algorithm for finding the coefficients of linear forms of the k-valued threshold function is built. In addition, the article discusses an algorithmic method based on reducing the problem of finding a threshold representation of k-valued functions to the system of linear inequalities, for the solution of which the ellipsoid method, modified by Khachiyan, is applied. The results of experimental research into the analyzed approaches are given. Based on these results the comparative analysis of the approaches is carried out.

А.Р. БИРИЧЕВСКИЙ  
**УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОБИЛЬНАЯ ОПЕРАЦИОННАЯ  
СИСТЕМА С ПОДСИСТЕМАМИ АУТЕНТИФИКАЦИИ И  
ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ  
ПСЕВДОВЕРОЯТНОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

---

*Биричевский А.Р. Универсальная мобильная операционная система с подсистемами аутентификации и защиты информации на основе псевдовероятностного преобразования.*

**Аннотация.** Данная статья посвящена архитектуре универсальной мобильной операционной системе. В работе описаны основные подсистемы разработанной операционной системы, структура системы защиты операционной системы. Отличительной особенностью разработанной операционной системы является интеграция псевдовероятностных преобразований в модули защиты информации.

**Ключевые слова:** псевдовероятностное преобразование, операционная система, аутентификация, криптовайдер, виртуальная среда.

*Birichevskij A.R. Universal Mobile Operating System Including Subsystems of Authentication and Data Protection Based on the Pseudo-Probability Transformation.*

**Abstract.** This article focuses on the architecture of a universal mobile operating system. The paper describes the main subsystems of the developed operating system and the structure of the operating system protection. A distinctive feature of the developed operating system is the integration of pseudo-probability transformations into information protection modules.

**Keywords:** pseudo-probability transformation; the operating system; authentication; cryptographic; virtual environment.

---

**1. Введение.** На сегодняшний день разработано очень большое количество операционных систем. Операционная система представляет собой прекрасный механизм экономичного использования ресурсов. Операционные системы успешно применяются и в средствах защиты информации различных типов.

При разработке средств защиты информации производители нередко используют схожую элементную базу. Например, средство защиты программных продуктов Guardant Stealth II [1] и персональные идентификаторы Рутокен ЭЦП [2] реализованы на базе микроконтроллера общего назначения (Guardant Stealth II имеет процессор тактовой частотой 60 МГц, 32 разряда, архитектура ARM) с интерфейсом USB и энергонезависимой памяти. Чуть более сложную структуру имеют средства защиты от НСД производства ОКБ САПР [3]. Аккорд-5MX реализован на базе микроконтроллера общего назначения (тактовая частота 16 МГц, архитектура RISC, 8 разрядов) и контроллера программируемой логики. Как можно видеть, все представленные средства защиты имеют в своем составе микроконтроллер общего назначе-

ния. Стоит отметить, что применяемые микроконтроллеры имеют сравнительно невысокие вычислительные возможности.

В данной работе под мобильными устройствами понимается устройство, реализованное на однокристальном микроконтроллере и имеющее низкие вычислительные мощности (тактовая частота до 200 МГц, оперативная и постоянная память до десятков мегабайт). В данный класс устройств попадает большое количество средств защиты информации:

- персональные идентификаторы (USB-токены);
- средства защиты программных продуктов (USB-ключи);
- смарт-карты;
- средства защиты информации от несанкционированного доступа.

Сравнительно невысокая производительность аппаратной платформы не позволяет применять достаточно сложные операционные системы. Существующие защищенные операционные системы для мобильных систем (например, операционная система MULTOS [4]) часто привязаны к конкретной аппаратной платформе (в данном случае аппаратная платформа — специализированный контроллер для смарт-карт). Данная особенность сильно ограничивает область применения операционной системы. Применение универсальной операционной системы в системах защиты информации позволит унифицировать подходы к обеспечению безопасности при разработке систем защиты информации, что может значительно снизить затраты при разработке средств защиты информации и, соответственно, сделает такие продукты более конкурентоспособными.

В данной работе будет рассмотрена структура универсальной операционной системы, которая может быть использована в мобильных системах различного назначения.

Отличительной особенностью разработанной операционной системы является интеграция псевдовероятностных преобразований в модули защиты информации. Под понятием псевдовероятностного преобразования понимается способ криптографического преобразования, в котором зашифровываются совместно два или более различных сообщений на двух или более различных ключах [5]. Псевдовероятностное преобразование позволяет обеспечить высокий уровень защищенности от атаки с принуждением.

**2. Архитектура операционной системы.** На рисунке 1 представлена архитектура разработанной операционной системы. В качестве целевой аппаратной платформы была выбрана архитектура контроллеров

ARM. Данная архитектура широко распространена в современных мобильных устройствах и имеет большое количество модификаций.

Прикладной уровень				5
Виртуальная среда				4
Защищенная ФС	Крипто-провайдер	Подсистема ЗИ	...	3
Ядро ОС			Безопасный загрузчик	2
ARM Cortex-M3	ARM Cortex-M0	ARM7TDMI		1

Рис. 1. Архитектура операционной системы

Операционная система организована по классической архитектуре типа «микроядро»[6]. Данная архитектура была выбрана по следующим причинам:

- необходимостью реализации в операционной системе режима «аварийного завершения» (так как система будет эксплуатироваться в неблагоприятных условиях мобильных устройств);

- достаточно низкой производительностью аппаратной платформы (мобильные системы имеют сравнительно небольшую производительность);

- многоцелевой характер применения операционной системы (различным видам устройств необходим различный набор сервисных приложений).

Так как основные функции системы разграничения доступа реализованы в ядре операционной системы, аутентичность программного кода ядра операционной системы имеет большое значение в системе защиты операционной системы в целом. Для обеспечения защиты программного кода ядра в состав разработанной операционной системы входит безопасный загрузчик, который производит проверку ядра перед загрузкой системы.

На третьем уровне архитектуры операционной системы располагаются различные служебные подсистемы (файловая система, криптопровайдер и т.д.). Набор служебных подсистем может варьироваться в зависимости от места эксплуатации операционной системы. Отключение служб осуществляется путем правки конфигурационного файла ядра операционной системы.

В операционной системе предусмотрена подсистема виртуализации. На рисунке 2 изображена схема виртуальной среды выполнения команд.

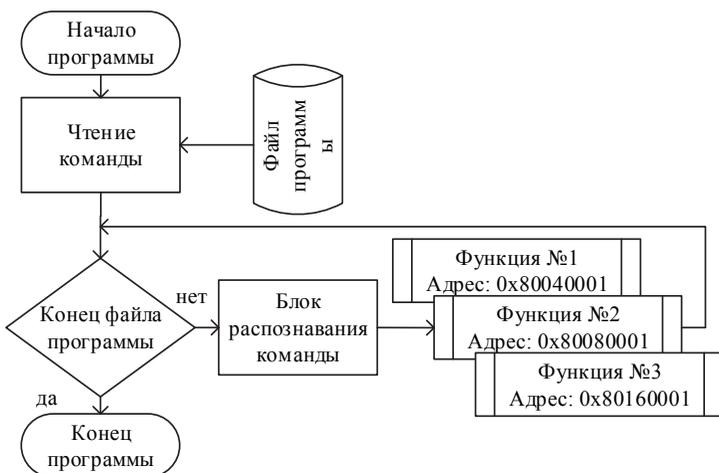


Рис. 2. Схема виртуальной среды выполнения команд

Для удобства разработчиков прикладного программного обеспечения операционной системы виртуальные команды имеют схожий синтаксис с языком программирования ASSEMBLER.

В операционной системе предусмотрены механизмы обнаружения вторжений. В частности, выполняется контроль использования оперативной памяти и доступа к файловым объектам. Виртуальная машина следит, чтобы приложение не вышло за пределы своего адресного пространства. При попытке получить доступ вне выделенного адресного пространства приложение будет завершено с ошибкой.

**3. Подсистема аутентификации.** Подсистема аутентификации в разработанной операционной системе играет одну из наиболее важных ролей. В подсистеме аутентификации ОС реализована аутентификация локальных и удаленных пользователей.

Подсистема аутентификации представляет собой набор библиотек, которые используются для проведения процедур аутентификации. Прототипом структуры подсистемы аутентификации послужила применяемая в операционных системах семейства Linux архитектура PAM (Pluggable Authentication Modules — подключаемые модули аутентификации)[7].

Подсистема аутентификации локальных пользователей обеспечивает проверку пользователей с использованием многозначных паролей.

Для защиты пользователей от принуждающей атаки в операционной системе был разработан алгоритм аутентификации пользователей на базе многоразовых паролей с защитой от принуждающей атаки. При этом для защиты пользователей было выбрано достаточно простое и эффективное решение. На этапе создания пользователя в системе выбирается два имени пользователя с похожим написанием. Например, имена «user1» и «userl» визуально похожи, однако они отличаются одним последним символом (цифра «1» и латинская буква «l»). Один пользователь имеет необходимые права в системе. Второй пользователь имеет минимальные права. В случае ввода резервного пароля (при принуждающей атаке) будет выполнен вход ограниченным пользователем.

Для создания аутентификационных данных у пользователя запрашиваются две пары значений логина и пароля: основной набор ( $login_1, pass_1$ ), дополнительный набор ( $login_2, pass_2$ ). Далее вычисляется значение ключей  $K_1, K_2$  по формуле:

$$K_n = h(login_n, pass_n). \quad (1)$$

Далее необходимо найти значение шифртекста  $C_{login}$  такое, что выполняется:

$$\begin{cases} E_{K_1}(M_1) = C_{login} \\ E_{K_2}(M_2) = C_{login} \end{cases} \quad (2)$$

где  $M_1 = \{login_1 | h(login_1)\}$ ,  $M_2 = \{login_2 | h(login_2)\}$ ,  $h()$  — хеш-функция,  $E_K()$  — функция шифрования. Стоит заметить, что в сообщении  $M_1, M_2$  дополнительно введено хеш-значение для возможности дальнейшей проверки. В операционной системе хранится файл хранилища шифртекстов пользователей. В данном файле хранится шифротекст  $C_{login}$ .

Процесс аутентификации начинается с запроса у пользователя логина и пароля. Далее необходимо вычислить ключ шифрования  $K$  по формуле (1).

Далее необходимо выполнить чтение шифротекста  $C_{login}$  из файла и расшифровать сообщение ключом, полученным на предыдущем шаге по формуле:

$$M = D_K(C_{login}) = \{login | h(login)\}, \quad (3)$$

где  $M$  — расшифрованное сообщение,  $K$  — ключи шифрования,  $D_K()$  — функция расшифрования,  $h()$  — хеш-функция. Если сообще-

ние состоит из *login*"и хеш-значения *login*", то необходимо выполнить вход в систему пользователем *login*."

При вводе резервного пароля ( $pass_2$ ) будет расшифровано значение резервного логина ( $login_2$ ). А вход в систему будет выполнен пользователем с усеченными правами.

Для защиты удаленных пользователей в операционной системе реализован предложенный в [8] протокол аутентификации с использованием одноразовых паролей на основе алгебраического алгоритма псевдовероятностного защитного преобразования. Данный протокол обеспечивает дополнительную защиту удаленных пользователей от принуждающей атаки.

**4. Защита от анализа приложений.** Защита прикладных программных продуктов от анализа в операционной системе реализуется в виртуальной среде выполнения команд. При создании прикладного приложения разработчику предлагается использовать специальные библиотечные функции операционной системы.

В операционной системе классические методы защиты приложений от анализа дополнительно усилены посредством применения псевдовероятностных преобразований.

Наиболее часто используемой в приложениях структурой является «условие». «Условие» используется как самостоятельно, так и в более сложных структурах, таких как «цикл».

Для защиты от статического анализа (дизассемблирования) целесообразно в ключевых блоках программы вместо структуры «условие» использовать псевдовероятностные преобразование. Вместо ключа использовать входные данные «условия». На выходе необходимо реализовать ложные ветви кода (например, в зашифрованном сообщении может содержаться адрес следующего блока программы).

На рисунке 3 изображена блок-схема функции, которая в качестве конструкции типа «условие» использует блок шифрования.

За блоком шифрования может быть реализовано любое количество истинных или ложных ветвей кода. При этом для злоумышленника последующее выполнение каждой из ветвей кода будет равновероятным (так как для шифрования адреса следующей команды применяется псевдовероятностное защитное преобразование).

Применение псевдовероятностного преобразования в качестве конструкции типа «условие» позволит значительно усложнить (особенно при многократном применении) статический анализ приложения (дизассемблирование).

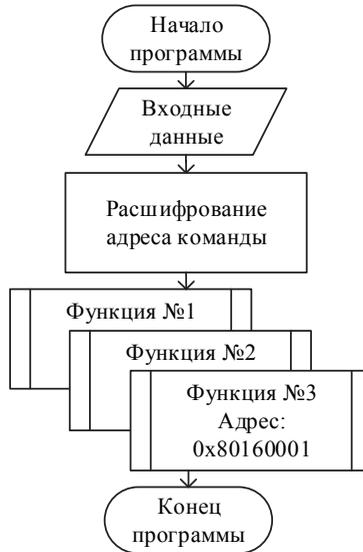


Рис. 3. Применение псевдовероятностных преобразований в качестве конструкции типа «если»

Для защиты программы от активного анализа средствами отладки также может применяться псевдовероятностное преобразование.

Один из способов применения псевдовероятностных преобразований для защиты программы от активного анализа — контроль времени выполнения. В данном случае ключом шифрования выступает разница во времени (например, количество тактов процессора, которое прошло за период времени). На выходе блока шифрования получается адрес следующего блока основной программы (либо ложной ветви алгоритма).

В докладе [9] был предложен и ряд других способов применения псевдовероятностных преобразований для обеспечения защиты приложений от анализа.

В ходе анализа работы приложения злоумышленником на вход блока шифрования подается определенное значение. Далее производится анализ реакции программы. В данном случае применение программ отладчиков может рассматриваться как «принуждение» программы к выполнению неких действий. Применение псевдовероятностных преобразований для противодействия атаке с принуждением позволяет более эффективно применять методы защиты приложений от анализа.

**5. Криптографическая подсистема.** В разработанной операционной системе предлагается применять псевдовероятностные преобразования также в рамках криптографической подсистемы для сокрытия

наличия резервных серий хранимой ключевой информации (данный способ был предложен в работе [10]). На рисунке 4 представлен алгоритм хранения набора резервных серий ключевой информации.

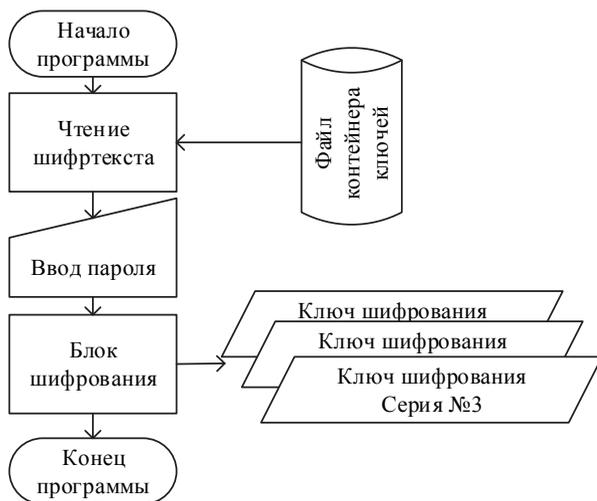


Рис. 4. Применение псевдовероятностных преобразований для хранения резервных серий ключевой информации

Контейнер ключей представляет собой файл, который содержит в себе значение шифртекста  $C$ . Для вычисления данного значения для  $n$  серий ключей необходимо найти решение системы уравнений:

$$\begin{cases} E_{K_1}(C) \bmod 2^r = M_1 \\ \dots \\ E_{K_n}(C) \bmod 2^r = M_n \end{cases} \quad (4)$$

где  $K_1 \dots K_n$  — ключи шифрования ключей (пароль фиксированной длины);  $M_1 \dots M_n$  — защищаемые серии ключей;  $E(\cdot)$  — функция шифрования;  $C$  — криптограмма;  $r$  — разрядность криптограммы. Информация о наличии резервных серий ключевой информации может иметь значительную ценность для злоумышленника. В качестве алгоритма шифрования применяется ГОСТ 28147-89. Так как длина файла шифртекста не зависит от количества зашифрованных серий ключевой информации, у злоумышленника отсутствует возможность доказать, что существуют несколько серий ключей.

Дополнительной положительной особенностью данного способа хранения ключевой информации является возможность совместить процесс генерации ключевой информации и выработки файла контей-

нера ключей. В данном случае вычисления сводится к генерации шифртекста  $C$  и нахождению  $n$  значений ключей шифрования ключей  $K_1 \dots K_n$  по формуле:

$$E_{K_n}(C) \bmod 2^n = M_n. \quad (5)$$

Стоит отметить, что данный метод может применяться только с учетом требований целевых алгоритмов шифрования для ключевой информации.

**6. Заключение.** В разработанной операционной системе подсистема информационной безопасности глубоко интегрирована в системные службы. ОС обеспечивает эшелонированную систему защиты от наиболее актуальных угроз безопасности. Отличительной особенностью операционной системы является применение псевдовероятностного шифрования в подсистемах защиты информации.

Применение универсальной операционной системы в мобильных устройствах телекоммуникационных и информационных систем, в том числе в системах защиты информации, позволит унифицировать подходы к обеспечению безопасности при разработке таких систем. Данный подход значительно сократит расходы на разработку и производство мобильных устройств на схожих аппаратных платформах. Область применения ОС: аутентифицирующие устройства (токены, идентификаторы), системы охраны, устройства защиты программного обеспечения, персональные устройства хранения данных (защищенные файловые хранилища), аппаратные средства шифрования (криптопровайдеры).

### Литература

1. GuardantStealth II — электронный ключ с базовыми возможностями. URL: <http://www.guardant.ru/products/guardant-stealth/> (дата обращения: 23.03.2016).
2. РутOKEN ЭЦП. Электронный идентификатор с аппаратной реализацией российских стандартов электронной подписи, шифрования и хэширования. URL: <http://www.rutoken.ru/products/all/rutoken-esp/#features> (дата обращения: 23.03.2016).
3. СЗИ НДС Аккорд-АМДЗ — это аппаратный модуль доверенной загрузки. URL: <http://www.accord.ru/amdz.html> (дата обращения: 23.03.2016).
4. Официальный сайт операционной системы MULTOS. URL: <http://www.multos.com> (дата обращения: 10.03.2016).
5. *Гордеев А.В.* Операционные системы: Учебник для вузов. 2-е изд // СПб.: Питер. 2007. 416 с.
6. *Колисниченко Д.Н.* Linux. От новичка к профессионалу // СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 781 с.
7. *Березин А.Н., Биричевский А.Р., Молдовян Н.А., Рыжков А.В.* Способ отрицаемого шифрования // Вопросы защиты информации. 2013. № 2. С. 18–21.
8. *Биричевский А.Р.* Применение отрицаемого шифрования в протоколах одноразовых паролей // Вестник ИТАРК. 2015. № 1(1). С. 96–100.
9. *Биричевский А.Р.* Отрицаемое шифрование как механизм защиты приложений от отладки // Труды всероссийской научно-практической конференции «Инноваци-

онная деятельность в Вооруженных силах Российской Федерации». Спб: ВАС. 2013. С. 81–85.

10. *Биричевский А.П.* Способ применения отрицаемого шифрования для хранения ключей // IX Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России»: Материалы конференции. СПб. 2015. С. 98–99.

## References

1. Berezin A.N., Birichevskij A.R., Moldovjan N.A., Ryzhkov A.V. [Deniable encryption method]. *Voprosy zashhity informacii – Issues of protection of information*. 2013. no. 2. pp. 18–21. (In Russ.).
2. Birichevskij A.R. Application of deniable encryption protocols, in one-time passwords. *Vestnik ITARK – Bulletin ITARK*. 2015. no. 1(1). pp. 96–100. (In Russ.).
3. Birichevskij A.R. [Deniable encryption as a defense mechanism of the application debugging]. *Otricaemoe shifrovanie kak mehanizm zashhity prilozhenij ototladki. Trudy vsearmejskoj nauchnoprakticheskoj konferencii «Innovacionnaja dejatel'nost' v Vooruzhennyh silah Rossijskoj Federacii»*. [Proceedings of the All-Army scientific and practical conference «Innovative activity in the Armed Forces of the Russian Federation»]. SPb.: VAS. 2013. pp. 81–85. (In Russ.).
4. Birichevskij A.R. [Method of use deniable encryption for storage of keys]. *Sposob primenenija otricaemogo shifrovaniya dlja hranenija kljuchej. IX Sankt-Peterburgskaja mezhhregional'naja konferencija «Informacionnaja bezopasnost' regionov Rossii»: Materialy konferencii*. [IX St.Petersburg Interregional Conference «Information Security of Russian Regions»: Proceedings of the conference]. SPb. 2015. pp. 98–99. (In Russ.).
5. Oficial'nyj sajt operacionnoj sistemy MULTOS [The official website of MULTOS operating system]. Available at: <http://www.multos.com> (accessed 10.03.2016).
6. GuardantStealth II — jelektronnyj ključ s bazovymi vozmožnostjami [GuardantStealth II — electronic key with basic features]. Available at: <http://www.guardant.ru/products/guardant-stealth/> (accessed: 23.03.2016) (In Russ.).
7. Rutoken JeCP. Jelektronnyj identifikator s apparatnoj realizaciej rossijskih standartov jelektronnoj podpis, shifrovaniya i hjšhirovanija [Rutoken EDS. Electronic ID with the hardware implementation of the Russian standards for electronic signatures, encryption and hashing]. Available at: <http://www.rutoken.ru/products/all/rutoken-ecp/#features> (accessed: 23.03.2016) (In Russ.).
8. SZI NSD Akkord-AMDZ — jeto apparatnyj modul' doverennoj zagruzki [SZI NSD Accord- AMDZ — a trusted hardware module loading]. Available at: <http://www.accord.ru/amdz.html> (accessed: 23.03.2016) (In Russ.).
9. Gordeev A.V. *Operacionnye sistemy: Uchebnik dlja vuzov* [Operating Systems: A Textbook for high schools]. 2-e izd. SPb.: Piter. 2007. 416 p.
10. Kolisnichenko D. N. *Linux. Ot novichka k professional* [Linux. From beginner to professional]. SPb.: BHV-Peterburg. 2010. 781 p.

**Биричевский Алексей Романович** — аспирант лаборатории криптологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), старший преподаватель, ФГБОУ ВО Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина. Область научных интересов: методы защиты информации, теория вероятности, криптография. Число научных публикаций — 14. [lehabirich@mail.ru](mailto:lehabirich@mail.ru); 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; p.t.: 89505675437.

**Birichevskij Aleksej Romanovich** — Ph.D. student of cryptology laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), senior lecturer, Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin. Research interests: methods of information protection, probability theory, cryptography. The number of publications — 14. [lehabirich@mail.ru](mailto:lehabirich@mail.ru); 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: 89505675437.

## РЕФЕРАТ

*Биричевский А.Р.* **Универсальная мобильная операционная система с подсистемами аутентификации и защиты информации на основе псевдовероятностного преобразования.**

Работа посвящена универсальной мобильной операционной системе. Данная операционная система может быть применена в средствах защиты информации. Применение универсальной операционной системы, позволит унифицировать подходы к разработке систем защиты информации. Это значительно снизит затраты при разработке.

Отличительной особенностью разработанной операционной системы является интеграция псевдовероятностных преобразований в модули защиты информации. В работе описаны методы применения псевдовероятностных преобразований в подсистемах аутентификации, защиты приложений от анализа и криптографической подсистеме.

## SUMMARY

*Birichevskij A.R.* **Universal Mobile Operating System Including Subsystems of Authentication and Data Protection Based on the Pseudo-Probability Transformation.**

The work is dedicated to a universal mobile operating system. This operating system can be used in the protection of information systems. The use of a universal operating system in the information protection systems will lead to a unified approach to the development of the latter. This will significantly reduce costs in the development of information security facilities.

A distinctive feature of the developed operating system is the integration of pseudo-probability transformations into information protection modules. This paper describes methods for applying pseudo-probability transformations in subsystems of authentication and protection of applications from analysis as well as in a cryptographic subsystem.

Р.Б. ТРЕГУБОВ, Ю.Г. АЛЕКСИКОВ, С.И. САИТОВ  
**ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МНОГОУРОВНЕВЫХ  
МАРШРУТИЗИРУЮЩИХ СИСТЕМ В ТЕОРЕТИКО-  
МНОЖЕСТВЕННОМ БАЗИСЕ**

---

*Трегубов Р.Б., Алексиков Ю.Г., Саитов С.И.* **Представление иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем в теоретико-множественном базисе.**

**Аннотация.** В статье предлагается вариант применения положений теории множеств и теории иерархических систем для формального описания элементов открытых систем, реализующих взаимосвязанные многоуровневые процессы маршрутизации. В качестве реальных прототипов таких открытых систем могут служить инфраструктурные объекты, в которых реализуется распределение материальных ресурсов, энергии или информации с использованием иерархически вложенных функций управления потоками и/или маршрутизации.

**Ключевые слова:** маршрутизация, иерархическая многоуровневая маршрутизирующая система, открытые системы, инфокоммуникационная система, теория множеств, теория иерархических систем.

*Tregubov R.B., Alekshikov Yu.G., Saitov S.I.* **Representation of the Hierarchical Multilayer Routing Systems in a Set-Theoretic Base.**

**Abstract.** In the article the option of application of provisions of the theory of sets and the theory of hierarchical systems for the formal description of elements of the open systems realizing interdependent multi-level processes of routing is offered. Infrastructure facilities, in which distribution of the material resources, energy or information with the use of hierarchically nested functions of control of flows and/or routings is realized, can serve as real prototypes of such open systems.

**Keywords:** routing; the hierarchical multilayer routing system; open systems; infocommunication system; the theory of sets; the theory of hierarchical systems.

---

**1. Введение.** Инфраструктурные объекты, такие как нефте- и газораспределительные системы, авто- и железнодорожные сети, системы электрификации, инфокоммуникационные системы и пр. играют важнейшую роль для государства и общества. Вопросы их моделирования, анализа и синтеза (оптимизации) являются актуальными для многих отраслей научного знания [1, 2].

Реализуя функции распределения материальных ресурсов, энергии или информации, в инфраструктурных объектах предусмотрены подсистемы, обеспечивающие реализацию иерархически вложенных функций управления потоками и/или маршрутизации. Основное назначение *маршрутизирующих подсистем* — это преобразование наименования или адреса элемента маршрутизирующей подсистемы в маршрут в пределах маршрутизирующей подсистемы для достижения этого элемента. Следовательно, формальное представление архитектуры инфраструктурного объекта обязательно должно содержать строгое

математическое описание соответствующих элементов и процедур. К сожалению, в ряде случаев описание инфраструктурных объектов ограничивается вербальными понятиями «сложный», «распределенный», «многоуровневый», «вложенные функции распределения» и пр. Ниже предлагается вариант применения теории множеств (ТМ) для формального представления этих и других свойств больших технических систем на примере инфокоммуникационной системы и эталонной модели взаимодействия открытых систем.

**2. Общие положения.** Инфокоммуникационная система (ИКС) в настоящее время представляет собой [3] взаимоувязанную совокупность систем обработки и хранения информации, телекоммуникационных систем, их объединяющих, функционирующих под единым управлением с целью сбора, обработки, хранения, защиты, передачи и распределения, отображения и использования информации в интересах абонентов (пользователей). Общая архитектура ИКС традиционно описывается эталонной моделью взаимодействия открытых систем (ЭМВОС), которая включает (рисунок 1) семь уровней иерархии: прикладной, представления данных, сеансовый, транспортный, сетевой, звена данных и физический [4]. При этом сам термин *архитектура* определяется как совокупность принципов логической и физической организации технических и программных средств, протоколов и интерфейсов.

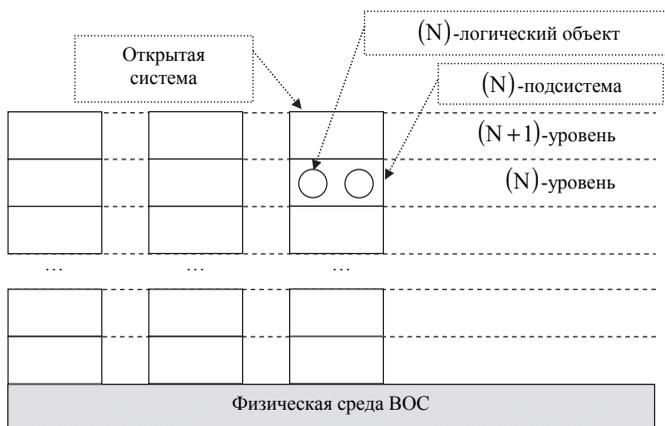


Рис. 1. Организация уровней во взаимосвязанных открытых системах

Уже на основе анализа этой самой общей архитектуры можно утверждать, что информационная инфраструктура является *иерархической* системой [5], т. е. множеством, частично упорядоченным так, что существует ровно один элемент этого множества, не имеющий

предшествующего, а все остальные элементы имеют ровно один предшествующий [6].

В соответствии с ЭМВОС, (N)-подсистема — элемент иерархической структуры открытой системы, который непосредственно взаимодействует только с элементами смежного верхнего или смежного нижнего подразделений этой открытой системы (рисунок 1) [6]. В ИКС (N)-подсистемы, как правило, имеют индивидуальные или групповые адреса (например, *Bridge ID*, *Router ID* и др.). Маршрутизирующими подсистемами в ИКС являются физический, каналный и сетевой уровни ЭМВОС.

Таким образом, формальная постановка и решение задач моделирования, анализа и оптимизации характеристик ИКС, как и любого другого инфраструктурного объекта, должны учитывать наличие многих одновременно функционирующих маршрутизирующих подсистем, взаимодействие которых осуществляется иерархическим образом.

Естественно, формальное описание структурно-простых объектов (последовательных, параллельных, древовидных) такого класса не вызовет затруднений. Следовательно, дальнейшие рассуждения будут относиться только к структурно-сложным распределенным техническим системам, в которых реализуются функции маршрутизации. Для их обозначения ниже используется термин *иерархическая многоуровневая маршрутизирующая система* (ИММС), т. е. открытая система, реализующая функции маршрутизации, структура которой при описании не может быть сведена к простым последовательным, параллельным или древовидным структурам.

Понятие ИММС с системных позиций является более общим, чем ИКС, и предполагается к использованию в тех случаях, когда описываемые формализмы могут быть использованы и для других инфраструктурных объектов, в которых предусмотрена реализация функций маршрутизации.

**3. Теоретико-множественное представление преобразований блоков данных в узлах инфокоммуникационной системы.** Представление элементов ИММС (в частности ИКС) в теоретико-множественном базисе далее опирается на введении ряда обозначений для устоявшихся в предметной области терминов и определений. Пусть  $SS_l^{(n)}$  — подсистема  $n$ -го уровня, а  $SS_n = \{ \dots, ss_l^{(n)}, \dots \}$  — множество подсистем  $n$ -го уровня. При этом обозначения (N), (N+1) и (N-1), определяют

смежные уровни и соотношения между ними [6]:  $(N+1)$ -уровень — верхний уровень, смежный с  $(N)$ -уровнем;  $(N-1)$ -уровень — нижний уровень, смежный с  $(N)$ -уровнем.

Целевое предназначение ИКС — обеспечение пользователей информацией с заданным качеством. При этом блоком данных называется битовая последовательность, передаваемая как единое целое между устройствами ИКС [6].

Далее под протокольным блоком данных (ПБД) понимается блок данных ИКС, передаваемый между логическими объектами одного и того же уровня [4]. ПБД получает наименование того уровня, который его формирует. Так, например, к ПБД физического уровня можно отнести циклы технологий *PDH* (плезиохронной цифровой иерархии) или *SDH* (синхронной цифровой иерархии). ПБД канального уровня является *Ethernet*-кадр, а ПБД сетевого уровня — *IP*-пакет. ПБД включает сервисный блок данных и протокольную управляющую информацию (рисунок 2). Сервисный блок данных (СБД) при этом трактуется как блок данных, в который отображаются протокольные блоки данных смежного верхнего уровня при их переносе в смежный нижний уровень [4].  $(N)$ -протокольная управляющая информация (ПУИ) понимается как информация, которой обмениваются  $(N)$ -логические объекты для координации их совместной работы через  $(N-1)$ -соединение.

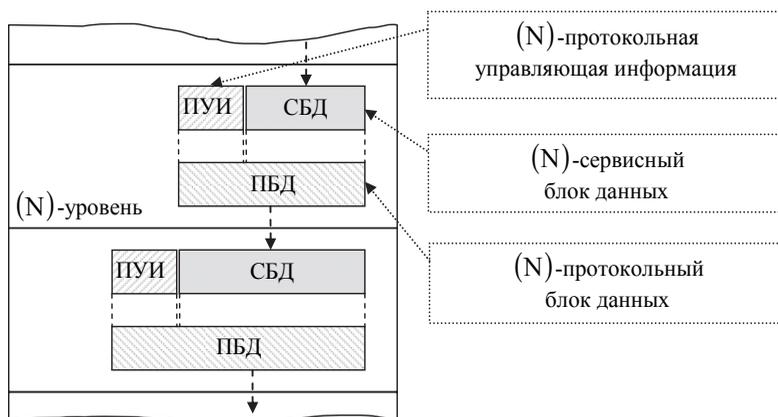


Рис. 2. Взаимоотношения между блоками данных в ИКС

Ниже используются следующие обозначения:  $pdu_i^{(n)}$  — протокольный блок данных  $n$ -го уровня;  $PDU_n = \{ \dots, pdu_i^{(n)}, \dots \}$  — множество протокольных блок данных  $n$ -го уровня;  $sdu_i^{(n)}$  — сервисный блок данных  $n$ -го уровня;  $SDU_n = \{ \dots, sdu_i^{(n)}, \dots \}$  — множество сервисных блок данных  $n$ -го уровня;  $pci_i^{(n)}$  — протокольная управляющая информация  $n$ -го уровня;  $PCI_n = \{ \dots, pci_i^{(n)}, \dots \}$  — множество протокольной управляющей информации  $n$ -го уровня.

В ходе функционирования ИКС осуществляет различные действия над ПБД. Например, сцепление (рисунок 3) — функция, выполняемая (N)-логическим объектом для преобразования нескольких (N)-ПБД в один (N-1)-СБД. Расцепление — функция, выполняемая (N)-логическим объектом для выделения нескольких (N)-ПБД, содержащихся в одном (N-1)-СБД. Эта функция является обратной сцеплению (рисунок 3) [7].

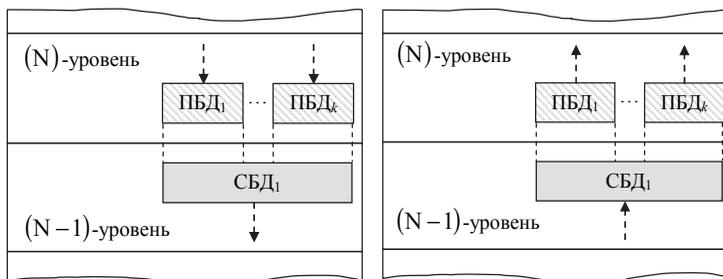


Рис. 3. Сцепление и расцепление блоков данных в ИКС

С теоретико-множественной точки зрения преобразование блока данных между смежными уровнями — это соответствие между  $k$ -й декартовой степенью множества протокольных блоков данных  $n$ -го уровня и  $r$ -й декартовой степенью множества сервисных блоков данных  $(n-1)$ -го уровня, т. е.:

$$\left( PDU_n^{\times k}, SDU_{n-1}^{\times r}, CDUBL_{n-1,k,r} \right) \Leftrightarrow PDU_n^{\times k} \xrightarrow{CDUBL_{n-1,k,r}} SDU_{n-1}^{\times r}, \quad (1)$$

где  $CDUBL_{n-1,k,r} = \{ \dots, cdubl_m^{(n-1,k,r)}, \dots \}$  — подмножество множества

пар  $cdubl_m^{(n-1,k,r)} = \left( \left( \underbrace{\dots, pdu_i^{(n)}, \dots}_k \right), \left( \underbrace{\dots, sdu_j^{(n-1)}, \dots}_r \right) \right)$ , состоящих из

кортежа протокольных блоков данных  $n$ -го уровня с числом компонентов  $k$  и кортежа сервисных блоков данных  $(n-1)$ -го уровня с числом компонентов  $r$ , которые связаны представленным преобразующим соответствием.

При этом если  $(k > 1) \wedge (r = 1)$  соответствие  $CDUBL_{n-1,k,r}$  называется сцепление, а обратное ему соответствие  $CDUBL_{n-1,k,r}^{-1}$  — расцепление.

Аналогично с помощью ТМ можно математически описать объединение, разъединение (рисунок 4), сегментирование и сборку блоков данных, производимых в рамках одного уровня ИКС (рисунок 5) [4].

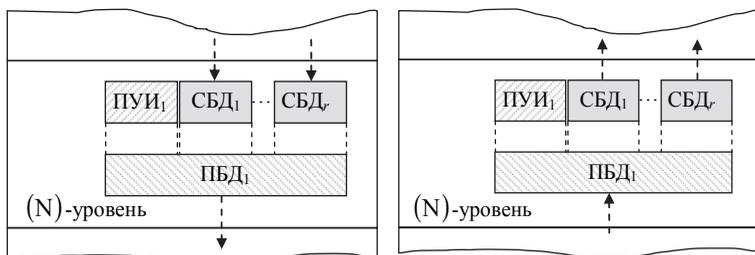


Рис. 4. Объединение и разделение блоков данных в ИКС

С точки зрения ТМ преобразование блока данных в пределах одного уровня — это соответствие между  $s$ -й декартовой степенью множества протокольной управляющей информации  $n$ -го уровня,  $r$ -й декартовой степенью множества сервисных блоков данных  $n$ -го уровня и  $k$ -й декартовой степенью множества протокольных блоков данных  $n$ -го уровня:

$$\begin{aligned} & (PCI_n^{\times s}, SDU_n^{\times r}, PDU_n^{\times k}, CDUWL_{n,s,r,k}) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow PCI_n^{\times s} \times SDU_n^{\times r} \xrightarrow{CDUWL_{n,s,r,k}} PDU_n^{\times k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $CDUWL_{n,s,r,k} = \{ \dots, cduwl_m^{(n,s,r,k)}, \dots \}$  — подмножество множества

$$\text{троек } cduwl_m^{(n,s,r,k)} = \left( \left( \underbrace{\dots, pci_t^{(n)}, \dots}_s \right), \left( \underbrace{\dots, sdu_j^{(n)}, \dots}_r \right), \left( \underbrace{\dots, pdu_l^{(n)}, \dots}_k \right) \right),$$

состоящих из кортежа протокольной управляющей информации  $n$ -го уровня с числом компонентов  $s$ , кортежа сервисных блоков данных  $n$ -го уровня с числом компонентов  $r$  и кортежа протокольных блоков данных  $n$ -го уровня с числом компонентов  $k$ , которые связаны представленным преобразующим соответствием.

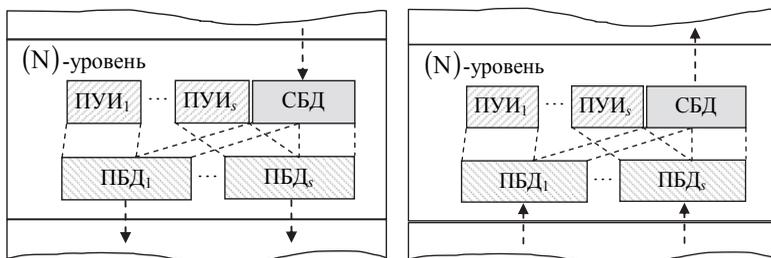


Рис. 5. Сегментирование и сборка блоков данных

При этом если:

—  $(s=1) \wedge (r>1) \wedge (k=1)$  соответствие  $CDUWL_{n,s,r,k}$  называется объединение, а обратное ему соответствие  $CDUWL_{n,s,r,k}^{-1}$  — разделение;

—  $(s>1) \wedge (r=1) \wedge (k=s)$  соответствие  $CDUWL_{n,s,r,k}$  называется сегментирование, а обратное ему соответствие  $CDUWL_{n,s,r,k}^{-1}$  — сборка.

**4. Теоретико-множественное представление процессов передачи блоков данных между узлами инфокоммуникационной системы.** Аппаратно-программные средства (АПС), входящие в состав ИКС, используются для формирования, приема, обработки, хранения, передачи, доставки информации. К таковым целесообразно относить и иные технические и программные средства, применяемые при оказании услуг связи и информатизации или обеспечении функционирования ИКС [8]. С точки зрения ЭМВОС данные АПС являются открытыми системами.

Результатом функционирования ИКС (услугой ИКС) является передача определенного ПБД к определенному адресу с требуемыми характеристиками качества. С точки зрения ЭМВОС процесс передачи ((N)-передача данных) — есть (N)-средство, которое передает (N)-сервисные блоки данных от одного (N+1)-логического объекта к одному или нескольким другим (N+1)-логическим объектам [7]. При этом услуга уровня — функциональная возможность, которую данный уровень взаимосвязи открытых систем вместе с нижерасположенными уровнями обеспечивает смежному верхнему уровню [4]. Другими словами (N)-услуга — функциональная возможность (N)-уровня и нижерасположенного уровня, предоставляемая (N+1)-логическому объекту на границе между (N) - и (N+1)-уровнями [7].

Известно, что протокол — набор семантических и синтетических правил, определяющий взаимосвязь логических объектов уровня при обмене данными (рисунок 6) [4]. Следовательно, (N)-протокол — набор правил и форматов (семантических и синтаксических), определяющих процедуры связи (N)-логических объектов при выполнении (N)-функций [7].

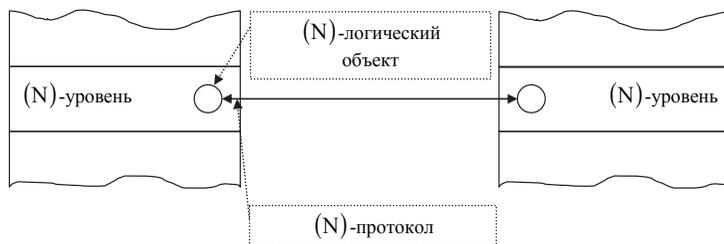


Рис. 6. Протокол взаимосвязи уровня (N), т. е. (N)-протокол

Логический объект является одним из важнейших понятий как для ЭМВОС, так и для теоретико-множественного представления ИММС. Логический объект уровня далее определяется как активный элемент уровня взаимосвязи открытых систем, выполняющий определенное подмножество его функций [4], т. е. (N)-логический объект — активный элемент внутри (N)-подсистемы, воплощающий комплекс

возможностей, определенных для (N)-уровня, который соответствует конкретному типу (N)-логического объекта [7].

В ИКС логические объекты  $n$ -го уровня имеют индивидуальные и/или групповые адреса (например, MAC-адрес, IP-адрес, TCP-порт, UDP-порт, адрес электронной почты и т.д.).

Пусть  $a_i^{(n)}$  — логический объект  $n$ -го уровня;

$A_n = \{ \dots, a_i^{(n)}, \dots \}$  — множество логических объектов  $n$ -го уровня.

Исходя из изложенного ранее, логический объект  $n$ -го уровня ИММС может принадлежать только одной подсистеме  $n$ -го уровня, в тоже время как одной подсистеме  $n$ -го уровня может принадлежать несколько логических объектов  $n$ -го уровня, для описания данного свойства используется соответствие представленное ниже:

$$(SS_n, A_n, B_n) \Leftrightarrow SS_n \xrightarrow{B_n} A_n, \quad (3)$$

где  $B_n = \{ \dots, b_k^{(n)}, \dots \}$  — подмножество множества пар

$b_k^{(n)} = (ss_i^{(n)}, a_j^{(n)})$ , состоящих из адреса подсистемы  $n$ -го уровня и адреса логического объекта  $n$ -го уровня, которые связаны представленным соответствием принадлежности.

Логическое соединение — взаимосвязь, обеспечиваемая некоторым уровнем, между двумя или более логическими объектами смежного верхнего уровня с целью обмена данными [4]. Тогда (N)-соединение — ассоциация, устанавливаемая (N)-уровнем между двумя или более (N+1)-логическими объектами для передачи данных [7].

Соединение ИММС при этом получает наименование того уровня, который его обеспечивает (например, соединение физического уровня, соединение канального уровня, соединение сетевого уровня и т.д.) [4].

С точки зрения ТМ, логическое соединение — это отношение между  $s$ -й декартовой степенью множества адресов логических объектов  $n$ -го уровня и  $k$ -й декартовой степенью множества адресов логических объектов этого же уровня, обеспечиваемое смежным нижним уровнем. Для наглядности на рисунке 7 показана ИКС, включающая два оконечных узла (ОУ) и три транзитных узла (ТУ). При этом ТУ1 и ТУ3 включают три уровня ЭМВОС (физический, канальный и сетевой), а ТУ2 — четыре (включает транспортный).

Для логического соединения ИММС можно записать:

$$\left( A_n^{\times s}, A_n^{\times k}, LC_{n-1,s,k} \right) \Leftrightarrow A_n^{\times s} \xrightarrow{LC_{n-1,s,k}} A_n^{\times k}, \quad (4)$$

где  $LC_{n-1,s,k} = \left\{ \dots, l_{c_m}^{(n-1,s,k)}, \dots \right\}$  — подмножество множества пар

$$l_{c_m}^{(n-1,s,k)} = \left( \left( \underbrace{\dots, a_i^{(n)}, \dots}_s \right), \left( \underbrace{\dots, a_j^{(n)}, \dots}_k \right) \right)$$

состоящих из кортежа адресов

логических объектов  $n$ -го уровня с числом компонентов  $s$  и кортежа адресов логических объектов  $n$ -го уровня с числом компонентов  $k$ , которые взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

При этом если:

—  $(s = 1) \wedge (k = 1)$  соответствие  $LC_{n-1,s,k}$  называется логическое соединение "точка-точка";

—  $(s > 1) \wedge (k = 1)$  соответствие  $LC_{n-1,s,k}$  называется логическое соединение "многоточка-точка";

—  $(s = 1) \wedge (k > 1)$  соответствие  $LC_{n-1,s,k}$  называется логическое соединение "точка-многоточка";

—  $(s > 1) \wedge (k > 1)$  соответствие  $LC_{n-1,s,k}$  называется логическое соединение "многоточка".

Установление логического соединения связано в ИКС с выбором определенного метода коммутации и схемы мультиплексирования [8].

Далее под *коммутацией каналов* понимается совокупность операций на станции или узле вторичной сети, обеспечивающих последовательное соединение каналов (линий) вторичной сети связи [9]. Пространственная коммутация — коммутация в сетях связи, осуществляемая соединением пространственных или временных каналов вторичной сети без изменения их временных позиций [10]. Временная коммутация — коммутация в сетях связи, осуществляемая соединением временных позиций каналов вторичной сети [10].

В современных ИКС часто применяется коммутация с накоплением. Под *коммутацией сообщений* далее понимается совокупность операций на коммутационной станции, узле коммутации вторичной сети, состоящих в приеме сообщения, его накопления и последующей передаче в соответствии с содержащимся в нем адресным признаком. Коммутация пакетов — совокупность операций на коммутационной станции и узле коммутации вторичной сети, состоящих в приеме отрезков сообщений и передачи их в соответствии с содержащимся в них адресным признаком [9].

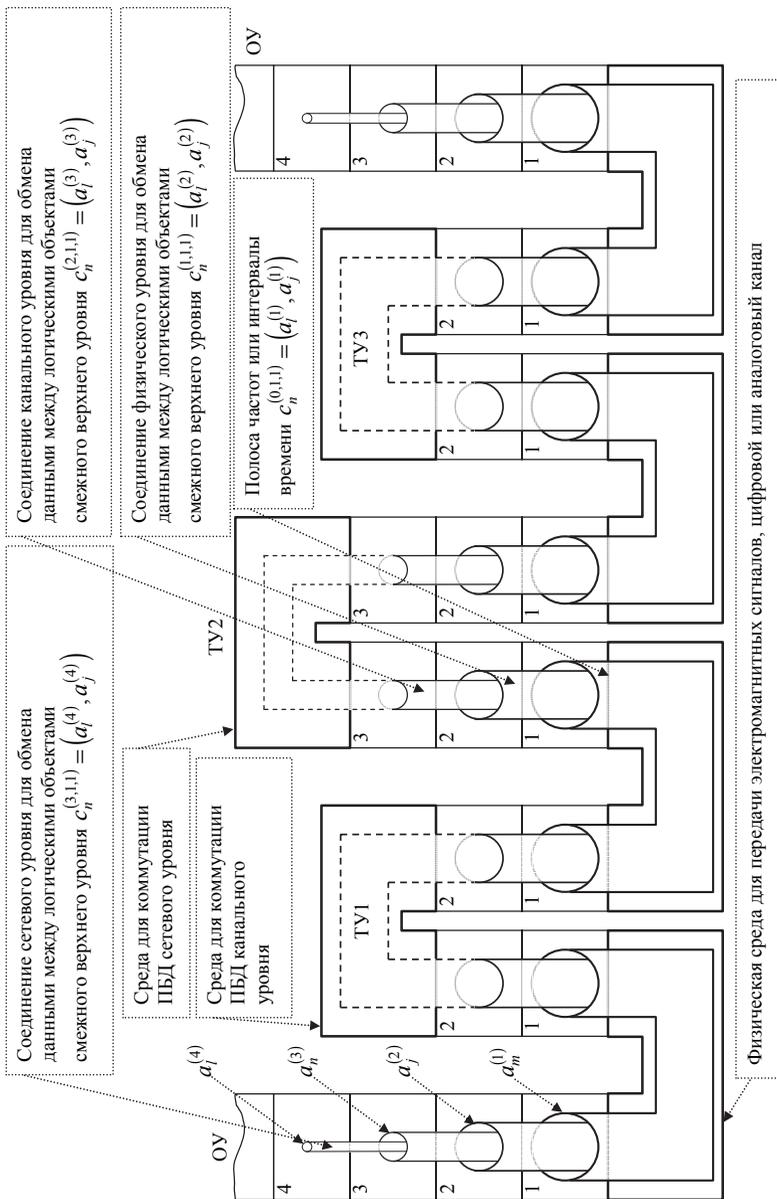


Рис. 7. Логические соединения в исследуемой ИКС

Для описания методов коммутации средствами ТМ необходимо задать множество моментов времени следующим образом:

$$T = \left\{ t_j \mid (t_j \in \mathbf{R}) \wedge (t_j \geq 0) \right\} . \quad (5)$$

Отсюда можно определить, что  $(N)$ -коммутация — это отношение между декартовым произведением следующих множеств:  $t$ -я декартова степень множества логических объектов  $n$ -го уровня,  $r$ -я декартова степень множества протокольной управляющей информации  $n$ -го уровня,  $d$ -я декартова степень множества моментов времени и декартовым произведениями следующих множеств:  $j$ -я декартова степень множества логических объектов  $n$ -го уровня,  $x$ -я декартова степень множества протокольной управляющей информации  $n$ -го уровня,  $y$ -я декартова степень множества моментов времени (рисунок 8).

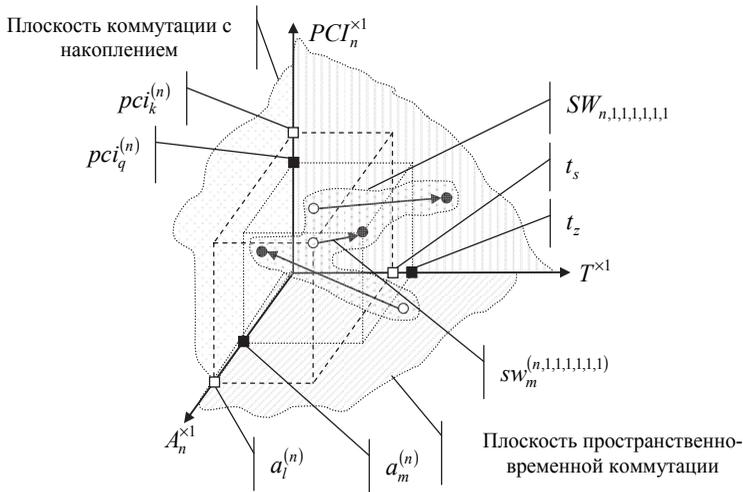


Рис. 8.  $(N)$ -коммутация  $(N)$ -коммутация описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} & \left( A_n^{x1} \times PCI_n^{xr} \times T^{xd}, A_n^{xj} \times PCI_n^{xx} \times T^{xy}, SW_{n,t,r,d,j,x,y} \right) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow A_n^{x1} \times PCI_n^{xr} \times T^{xd} \xrightarrow{SW_{n,t,r,d,j,x,y}} A_n^{xj} \times PCI_n^{xx} \times T^{xy}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $SW_{n,t,r,d,j,x,y} = \{ \dots, SW_m^{(n,t,r,d,j,x,y)}, \dots \}$  — подмножество множества

пар  $SW_m^{(n,t,r,d,j,x,y)} = \left( \left( \underbrace{(\dots, a_l^{(n)}, \dots)}_t, \underbrace{(\dots, pci_k^{(n)}, \dots)}_r, \underbrace{(\dots, t_s, \dots)}_d \right), \right.$

$\left. \left( \underbrace{(\dots, a_m^{(n)}, \dots)}_j, \underbrace{(\dots, pci_q^{(n)}, \dots)}_x, \underbrace{(\dots, t_z, \dots)}_y \right) \right)$ , состоящих из кортежа,

включающего три элемента: кортеж из  $t$  адресов логических объектов  $n$ -го уровня  $\underbrace{(\dots, a_l^{(n)}, \dots)}_t$ , кортеж из  $r$  протокольной управляющей

информации  $n$ -го уровня  $\underbrace{(\dots, pci_k^{(n)}, \dots)}_r$ , кортеж из  $d$  моментов време-

ни  $\underbrace{(\dots, t_s, \dots)}_d$  и кортежа, включающего также три элемента: кортеж

из  $j$  адресов логических объектов  $n$ -го уровня  $\underbrace{(\dots, a_m^{(n)}, \dots)}_j$ , кортеж

из  $x$  протокольной управляющей информации  $n$ -го уровня  $\underbrace{(\dots, pci_q^{(n)}, \dots)}_x$ , кортеж из  $y$  моментов времени  $\underbrace{(\dots, t_z, \dots)}_y$ , которые

взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

Таким образом, получено теоретико-множественное описание методов коммутации. Учитывая, что нулевая декартова степень произвольного множества  $X^{\times 0}$  содержит единственный элемент — пустой кортеж, можно утверждать, что если:

$$- (t \geq 1) \wedge (r = 0) \wedge (d = 0) \wedge (j \geq 1) \wedge (x = 0) \wedge (y = 0) \wedge (n = 1),$$

тогда отношение  $SW_{n,t,r,d,j,x,y}$  это пространственная коммутация;

$$- (t = 0) \wedge (r = 0) \wedge (d \geq 1) \wedge (j = 0) \wedge (x = 0) \wedge (y \geq 1) \wedge (n = 1),$$

тогда отношение  $SW_{n,t,r,d,j,x,y}$  это временная коммутация;

$$- (t \geq 1) \wedge (r = 0) \wedge (d \geq 1) \wedge (j \geq 1) \wedge (x = 0) \wedge (y \geq 1) \wedge (n = 1),$$

тогда отношение  $SW_{n,t,r,d,j,x,y}$  это пространственно-временная коммутация [10];

$$- (t \geq 1) \wedge (r \geq 1) \wedge (d = 0) \wedge (j \geq 1) \wedge (x \geq 1) \wedge (y = 0) \wedge (n \geq 2),$$

тогда отношение  $SW_{n,t,r,d,j,x,y}$  это коммутация с накоплением;

$$- (t \geq 1) \wedge (r \geq 1) \wedge (d = 0) \wedge (j \geq 1) \wedge (x \geq 1) \wedge (y = 0) \wedge (n = 2),$$

тогда отношение  $SW_{n,t,r,d,j,x,y}$  это коммутация кадров (ячеек);

$$- (t \geq 1) \wedge (r \geq 1) \wedge (d = 0) \wedge (j \geq 1) \wedge (x \geq 1) \wedge (y = 0) \wedge (n = 3),$$

тогда отношение  $SW_{n,t,r,d,j,x,y}$  это коммутация пакетов;

$$- (t \geq 1) \wedge (r \geq 1) \wedge (d = 0) \wedge (j \geq 1) \wedge (x \geq 1) \wedge (y = 0) \wedge (n > 3),$$

тогда отношение  $SW_{n,t,r,d,j,x,y}$  это коммутация сообщений.

Тогда коммутационное соединение можно определить, как отношение между  $s$ -й декартовой степенью множества адресов логических объектов  $n$ -го уровня и  $k$ -й декартовой степенью множества адресов логических объектов этого же уровня, обеспечиваемое коммутационной средой подсистем этого же уровня (рисунок 2).

В терминах ТМ коммутационное соединение описывается выражением:

$$\left( A_n^{\times s}, A_n^{\times k}, WC_{n,s,k} \right) \Leftrightarrow A_n^{\times s} \xrightarrow{WC_{n,s,k}} A_n^{\times k}, \quad (7)$$

где  $WC_{n,s,k} = \left\{ \dots, wc_m^{(n,s,k)}, \dots \right\}$  — подмножество множества пар

$$wc_m^{(n,s,k)} = \left( \left( \underbrace{\dots, a_i^{(n)}, \dots}_s \right), \left( \underbrace{\dots, a_j^{(n)}, \dots}_k \right) \right)$$

состоящих из кортежа адресов логических объектов  $n$ -го уровня с числом компонентов  $s$  и кортежа адресов логических объектов  $n$ -го уровня с числом компонентов  $k$ , которые взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

При этом если:

—  $(s = 1) \wedge (k = 1)$  соответствие  $WC_{n,s,k}$  называется коммутационное соединение "точка-точка";

- $(s > 1) \wedge (k = 1)$  соответствие  $WC_{n,s,k}$  называется коммутационное соединение "многоточка-точка";
- $(s = 1) \wedge (k > 1)$  соответствие  $WC_{n,s,k}$  называется коммутационное соединение "точка-многоточка";
- $(s > 1) \wedge (k > 1)$  соответствие  $WC_{n,s,k}$  называется коммутационное соединение "многоточка".

Аналогичным образом в рамках принятого подхода можно описать схемы *мультиплексирования*. Здесь и далее под мультиплексированием логических соединений понимается функция, выполняемая логическим объектом — отправителем уровня, использующая одно соединение смежного нижнего уровня для обеспечения нескольких соединений данного уровня [4]. Другими словами, мультиплексирование — функция (N)-уровня, посредством которой одно (N-1)-соединение используется для поддержания нескольких (N)-соединений [7].

Следовательно, *демультиплексирование* — это функция, выполняемая (N)-логическим объектом, посредством которой распознаются (N)-протокольные блоки данных, относящиеся к нескольким (N)-соединениям, в составе (N-1)-СБД, принимаемых по одному (N-1)-соединению. Эта функция является обратной мультиплексированию, выполняемой (N)-логическим объектом, передающим (N-1)-СБД.

Здесь и далее под *интерфейсом* (рисунок 9) понимается совокупность средств и правил, обеспечивающих взаимодействие устройств вычислительной машины или системы обработки информации и (или) программ [12]. Традиционно интерфейсное соединение получает наименование смежного нижнего уровня взаимосвязи систем обработки данных.

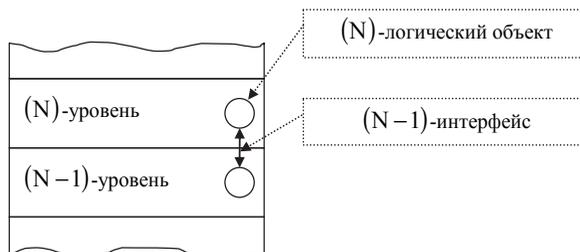


Рис. 9. Интерфейс (N-1) уровня, т. е. (N-1)-интерфейс

В рамках ТМ интерфейсное соединение предлагается представить как соответствие между  $s$ -й декартовой степенью множества адресов логических объектов  $n$ -го уровня и  $k$ -й декартовой степенью множества адресов логических объектов  $(n-1)$ -го уровня.

Интерфейсное соединение далее описывается выражением:

$$\left( A_n^{\times s}, A_{n-1}^{\times k}, IC_{n-1,s,k} \right) \Leftrightarrow A_n^{\times s} \xrightarrow{IC_{n-1,s,k}} A_{n-1}^{\times k}, \quad (8)$$

где  $IC_{n-1,s,k} = \left\{ \dots, ic_m^{(n-1,s,k)}, \dots \right\}$  — подмножество множества пар

$$ic_m^{(n-1,s,k)} = \left( \left( \underbrace{\dots, a_i^{(n)}, \dots}_s \right), \left( \underbrace{\dots, a_j^{(n-1)}, \dots}_k \right) \right)$$

состоящих из кортежа адресов логических объектов  $n$ -го уровня с числом компонентов  $s$  и кортежа адресов логических объектов  $(n-1)$ -го уровня с числом компонентов  $k$ , которые взаимосвязаны с помощью представленного соответствия связности.

При этом если:

—  $(s > 1) \wedge (k = 1)$  соответствие  $IC_{n-1,s,k}$  называется интерфейсное соединение с функцией мультиплексирования, а обратное ему соответствие  $IC_{n-1,s,k}$  — интерфейсное соединение с функцией демultipлексирования;

—  $(s = 1) \wedge (k > 1)$  соответствие  $IC_{n-1,s,k}$  называется интерфейсное соединение с функцией расщепления, а обратное ему соответствие  $IC_{n-1,s,k}$  — интерфейсное соединение с функцией рекомбинация.

**5. Теоретико-множественное представление процессов маршрутизации блоков данных в инфокоммуникационной системе.** Простейшими в задачах маршрутизации являются одношаговые соединения. При теоретико-множественном представлении одношаговое соединение "точка-точка" — это отношение связности, обеспечиваемое коммутационным соединением "точка-точка" подсистемы  $n$ -го уровня и логическим соединением "точка-точка"  $(n-1)$ -го уровня, между логическими объектами  $n$ -го уровня:

$$\left( A_n^{\times 1}, A_n^{\times 1}, SHC_{n-1,1,1} \right) \Leftrightarrow A_n^{\times 1} \xrightarrow{SHC_{n-1,1,1}} A_n^{\times 1} = A_n^{\times 1} \xrightarrow{LC_{n-1,1,1} \circ WC_{n,1,1}} A_n^{\times 1}, \quad (9)$$

где  $SHC_{n-1,1,1} = \{ \dots, shc_k^{(n-1,1,1)}, \dots \}$  — подмножество множества пар адресов  $shc_k^{(n-1,1,1)} = (a_l^{(n)}, a_j^{(n)})$  логических объектов  $n$ -го уровня, которые взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

Многошаговое соединение "точка-точка" с числом шагов равным  $k \geq 2$  — это отношение связности, обеспечиваемое  $k \geq 2$  одношаговыми соединениями "точка-точка"  $(n-1)$ -го уровня, между логическими объектами  $n$ -го уровня:

$$(A_n^{\times 1}, A_n^{\times 1}, MHC_{n-1,k,1,1}) \Leftrightarrow A_n^{\times 1} \xrightarrow{MHC_{n-1,k,1,1}} A_n^{\times 1} = A_n^{\times 1} \xrightarrow{\overbrace{SHC_{n-1,1,1} \circ \dots \circ SHC_{n-1,1,1}}^k} A_n^{\times 1}, \quad (10)$$

где  $MHC_{n-1,k,1,1} = \{ \dots, mhc_m^{(n-1,k,1,1)}, \dots \}$  — подмножество множества пар адресов  $mhc_m^{(n-1,k,1,1)} = (a_l^{(n)}, a_j^{(n)})$  логических объектов  $n$ -го уровня, которые взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

Целесообразно ввести следующее обозначение для многошагового соединения "точка-точка" с числом шагов равным единицы:

$$(A_n^{\times 1}, A_n^{\times 1}, MHC_{n-1,1,1,1}) \Leftrightarrow A_n^{\times 1} \xrightarrow{MHC_{n-1,1,1,1}} A_n^{\times 1} = A_n^{\times 1} \xrightarrow{SHC_{n-1,1,1}} A_n^{\times 1}. \quad (11)$$

Маршрутизируемое соединение "точка-точка" — это отношение связности, получаемое в результате объединения композиций многошагового соединения "точка-точка" (10) с числом шагов  $h \in \{ 1, 2, \dots, hl \}$  и коммутационного соединения "точка-точка" (7):

$$\begin{aligned} (A_n^{\times 1}, A_n^{\times 1}, RC_{n-1,hl,1,1}) \Leftrightarrow A_n^{\times 1} \xrightarrow{RC_{n-1,hl,1,1}} A_n^{\times 1} &= \left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,1,1,1}} A_n^{\times 1} \right) \cup \\ &\left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,2,1,1}} A_n^{\times 1} \right) \cup \left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,3,1,1}} A_n^{\times 1} \right) \cup \dots \cup \\ &\left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,hl,1,1}} A_n^{\times 1} \right) = \bigcup_{h=1}^{h=hl} \left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,h,1,1}} A_n^{\times 1} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $hl$  — это предельное число шагов в многошаговом соединении,  $RC_{n-1,hl,1,1} = \{ \dots, rc_k^{(n-1,hl,1,1)}, \dots \}$  — подмножество множества пар адресов  $rc_k^{(n-1,hl,1,1)} = (a_l^{(n)}, a_j^{(n)})$  логических объектов  $n$ -го уровня, которые взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

Условия наличия маршрута в ИММС также можно описать в ТМ.

Отношение  $a_l^{(n)} \xrightarrow{RC_{n-1,hl,1,1}} a_j^{(n)}$  считается выполненным, если существует хотя бы одна последовательность элементов  $z_0 = a_l^{(n)}, z_1, \dots, z_m = a_j^{(n)}$  из множества  $A_n$  (рисунок 10), для которой выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned}
 & a_l^{(n)} \xrightarrow{RC_{n-1,hl,1,1}} a_j^{(n)} \Leftrightarrow (a_l^{(n)}, a_j^{(n)}) \in RC_{n-1,hl,1,1} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \exists (z_0 = a_l^{(n)}, z_1, \dots, z_m = a_j^{(n)}) \in A_n, \\
 & \forall i \in \{0, 1, \dots, m-2\} \left( z_i \xrightarrow{SHC_{n-1,1,1}} z_{i+1} \right), \\
 & \forall i \in \{m-1\} \left( z_i \xrightarrow{WC_{n,1,1}} z_{i+1} \right), 0 < m \leq hl.
 \end{aligned} \tag{13}$$

Однако на практике допустимы не все последовательности элементов  $z_0 = a_l^{(n)}, z_1, \dots, z_m = a_j^{(n)}$ , данное множество ограничивается возможностями маршрутизирующего и маршрутизируемого протоколов.

Таким образом, функция маршрутизации в (N)-уровне ИММС позволяет транслировать связь по цепочке (N)-логических объектов. Прохождение маршрута связи через промежуточные (N)-логические объекты остается неизвестным ни нижним, ни верхним уровням. (N)-логический объект ИКС, принимающий участие в маршрутизации, может содержать таблицу маршрутизации [7].

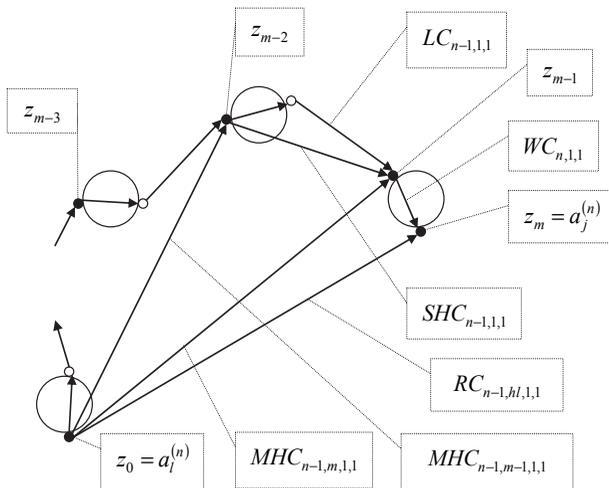


Рис. 10.  $(N - 1)$ -маршрутизируемое соединение "точка-точка"

Далее *маршрутизируемый* протокол ИММС трактуется как протокол, с помощью которого передаваемые данные ретранслируются от одного равноправного логического объекта другому равноправному логическому объекту (например в ИКС, это *IP*, *AppleTalk*, *DECnet* и др.). Для ретрансляции данных маршрутизируемый протокол использует информацию, предоставляемую маршрутизирующим протоколом [13]. При этом *маршрутизирующий* протокол — протокол, позволяющий логическому объекту с помощью алгоритма маршрутизации определить маршрут, по которому может быть установлена связь с другим логическим объектом или другими логическими объектами (например, *OSPF*, *IS-IS*, *RIP* и др.). С помощью маршрутизирующего протокола формируются и поддерживаются таблицы маршрутизации [13].

В теоретико-множественном представлении *таблица маршрутизации* соединений "точка-точка" — отношение связности, обеспечиваемое логическим соединением  $(n - 1)$ -го уровня между двумя логическими объектами  $N$ -го уровня соседних подсистем того же уровня с учетом адреса логического объекта-приемника того же уровня:

$$\left( A_n^{\times 2}, A_n^{\times 1}, RT_n \right) \Leftrightarrow A_n^{\times 2} \xrightarrow{RT_n} A_n^{\times 1}, \quad (14)$$

где  $RT_n = \left\{ \dots, rt_k^{(n)}, \dots \right\}$  — подмножество множества кортежей из трех элементов  $rt_k^{(n)} = \left( ta^{(n)}, da^{(n)}, ha^{(n)} \right)$ , включающих: адрес логического

объекта текущего шага  $ta^{(n)}$ , адрес логического объекта-приемника  $da^{(n)}$ , адрес логического объекта следующего шага  $ha^{(n)}$ , которые взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

Маршрутизирующий протокол ИММС в процессе определения оптимального маршрута сравнивает между собой метрики альтернативных маршрутов [13]. Под метрикой при этом понимается абстрактный способ измерения степени близости между двумя логическими объектами [14]. Для измерения длины маршрута могут быть использованы разные метрики: количество транзитных логических объектов ИММС, линейная протяженность маршрута, стоимость маршрута и др.

Пусть задано множество метрик  $n$ -го уровня следующим образом:

$$MC_n = \left\{ mc_i^{(n)} \mid \left( mc_i^{(n)} \in \mathbf{R} \right) \wedge \left( mc_{\min}^{(n)} \leq mc_i^{(n)} \leq mc_{\max}^{(n)} \right) \right\}, \quad (15)$$

где  $mc_{\min}^{(n)}$  — минимально возможное значение метрики  $n$ -го уровня;  $mc_{\max}^{(n)}$  — максимально возможное значение метрики  $n$ -го уровня. Тогда метрика логического соединения "точка-точка" — это соответствие между логическим соединением "точка-точка"  $(n-1)$ -го уровня и метрикой  $n$ -го уровня:

$$\left( LC_{n-1,1,1}, MC_n, MLC_{n-1,1,1} \right) \Leftrightarrow LC_{n-1,1,1} \xrightarrow{MLC_{n-1,1,1}} MC_n, \quad (16)$$

где  $MLC_{n-1,1,1} = \left\{ \dots, mlc_i^{n-1,1,1}, \dots \right\}$  — подмножество множества пар  $mlc_i^{(n-1,1,1)} = \left( lc_k^{(n-1,1,1)}, mc_j^{(n)} \right)$ , включающих логическое соединение "точка-точка"  $(n-1)$ -го уровня и метрику  $n$ -го уровня, взаимосвязанных с помощью рассмотренного соответствия.

Следовательно, метрика коммутационного соединения "точка-точка" — это соответствие между коммутационным соединением "точка-точка"  $n$ -го уровня и метрикой  $n$ -го уровня:

$$\left( WC_{n,1,1}, MC_n, MWC_{n,1,1} \right) \Leftrightarrow WC_{n,1,1} \xrightarrow{MWC_{n,1,1}} MC_n, \quad (17)$$

где  $MWC_{n,1,1} = \{ \dots, mwc_l^{n,1,1}, \dots \}$  — подмножество множества пар  $mwc_i^{(n,1,1)} = (wc_k^{(n,1,1)}, mc_j^{(n)})$ , включающих коммутационное соединение "точка-точка"  $n$ -го уровня и метрику  $n$ -го уровня, взаимосвязанных с помощью представленного соответствия.

Множество параметров алгоритма маршрутизации  $n$ -го уровня ИММС целесообразно сформировать следующим образом:

$$RAP_n = \left\{ rap_i^{(n)} \mid \left( rap_i^{(n)} \in \mathbf{N} \right) \wedge \left( 1 \leq rap_i^{(n)} \leq K \right) \right\}, \quad (18)$$

где  $K$  — максимальное число маршрутов для одной пары логического объекта-источника и логического объекта-приемника.

Это позволяет определить *алгоритм маршрутизации* соединения "точка-точка" ИММС как соответствие между метриками логических соединений "точка-точка"  $(n-1)$ -го уровня, метриками коммутационных соединений "точка-точка"  $n$ -го уровня, параметром алгоритма маршрутизации  $n$ -го уровня и таблицей маршрутизации соединений "точка-точка"  $n$ -го уровня:

$$\begin{aligned} & \left( \mathbf{MLC}_{n-1,1,1}, \mathbf{MWC}_{n,1,1}, RAP_n, \mathbf{RT}_n, RA_n \right) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \mathbf{MLC}_{n-1,1,1} \times \mathbf{MWC}_{n,1,1} \times RAP_n \xrightarrow{RA_n} \mathbf{RT}_n \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\mathbf{MLC}_{n-1,1,1} = \{ \dots, MLC_{n-1,1,1,l}, \dots \}$  — множество различных вариантов метрик логических соединений "точка-точка";

$\mathbf{MWC}_{n,1,1} = \{ \dots, MWC_{n,1,1,j}, \dots \}$  — множество различных вариантов метрик коммутационных соединений "точка-точка";

$RAP_n = \{ \dots, rap_s^{(n)}, \dots \}$  — множество параметров алгоритма маршрутизации;  $\mathbf{RT}_n = \{ \dots, RT_{n,h}, \dots \}$  — множество вариантов таблицы маршрутизации соединений "точка-точка";

$RA_n = \{ \dots, ra_g^{(n)}, \dots \}$  подмножество множества кортежей из четырех элементов  $ra_g^{(n)} = (MLC_{n-1,1,1,l}, MWC_{n,1,1,j}, rap_s^{(n)}, RT_{n,h})$ , включающих: метрики отношений связности логических объектов  $MLC_{n-1,1,1,l}$ , принадлежащих разным подсистемам  $n$ -го уровня; метрики отношений связности

логических объектов  $MWC_{n,1,1,j}$ , принадлежащих одной подсистеме  $n$ -го уровня; параметр алгоритма маршрутизации  $rap_s^{(n)}$ , таблицу маршрутизации соединений "точка-точка"  $RT_{n,h}$ , которые взаимосвязаны с помощью рассмотренного соответствия связности.

Следовательно, маршрут соединения "точка-точка" между логическим объектом с адресом  $a_l^{(n)}$   $n$ -го уровня и логическим объектом  $a_j^{(n)}$  того же уровня, полученный на основании таблицы маршрутизации соединений "точка-точка"  $RT_{n,h}$  того же уровня может быть представлен кортежем адресов логических объектов следующего вида:

$$\begin{aligned} \mu_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h}, hl}^{(n)} &= (z_0 = a_l^{(n)}, z_1, z_2, \dots, z_{m-1}, z_m = \\ &= a_j^{(n)}) \mid \forall i \in \{0, 1, \dots, m\} (z_i \in A_n), \\ \forall i \in \{1, 2, \dots, m-1\} (z_i &= RT_{n,h}(z_{i-1}, z_m)), \\ \forall i \in \{0, 1, \dots, m-2\} (z_i &\xrightarrow{SHC_{n-1,1,1}} z_{i+1}), \\ \forall i \in \{m-1\} (z_i &\xrightarrow{WC_{n,1,1}} z_{i+1}), 0 < m \leq hl. \end{aligned} \quad (20)$$

Множество маршрутов соединений "точка-точка" между всеми логическими объектами  $n$ -го уровня, полученные на основании всех таблиц маршрутизации соединений "точка-точка" того же уровня можно определяется выражением:

$$M_n = \left\{ \mu_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h}, hl}^{(n)} \mid (l \in I) \wedge (j \in I) \wedge \right. \\ \left. \wedge (l \neq j) \wedge (h \in H) \wedge ((a_l^{(n)}, a_j^{(n)}) \notin WC_{n,1,1}) \right\}, \quad (21)$$

где  $I$  — это множество всех номеров элементов множества  $A_n$ ;  $H$  — это множество всех номеров элементов множества  $RT_n$ .

В современных ИКС между парой пользователей имеется целая совокупность каналов (маршрутов) передачи блоков данных. Это позволяет выделить на ее структуре некоторый сегмент узлов и линий, определяемый как *двухполюсная сеть связи* (ДСС), то есть часть сети связи,

обеспечивающая передачу информации между парой абонентов сети [15]. Аналогичную структуру можно выделить в ИММС для пары корреспондирующих оконечных пунктов "отправитель"—"получатель". Существующее положение дел требует введения следующего определения.

ДСС — это множество маршрутов соединений "точка-точка" между логическим объектом с адресом  $a_i^{(n)}$   $n$ -го уровня и логическим объектом  $a_j^{(n)}$  того же уровня, полученные на основании всех таблиц маршрутизации соединений "точка-точка" того же уровня. Для математической записи этого определения в теоретико-множественном базисе целесообразно использовать выражение:

$$v_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)} = \left\{ \mu_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h,hl}}^{(n)} \mid h \in H \right\}. \quad (22)$$

Тогда множество двухполюсных сетей связи между всеми логическими объектами  $n$ -го уровня определяется согласно следующего выражения:

$$Y_n = \left\{ v_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)} \mid (i \in I) \wedge (j \in I) \wedge (i \neq j) \wedge ((a_i^{(n)}, a_j^{(n)}) \notin WC_{n,1,1}) \right\}. \quad (23)$$

В ИКС многополюсной сетью связи (МСС) называют часть сети связи, обеспечивающая одновременную передачу информации нескольких ДСС [15]. Аналогичные объекты можно выделить и в иных ИММС. Следовательно, в рамках настоящего исследования, МСС — это множество двухполюсных сетей связи между заданной группой логических объектов  $n$ -го уровня, определяемое следующим образом

$$w_{I_g, hl}^{(n)} = \left\{ v_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)} \mid (i \in I_g) \wedge (j \in I_g) \wedge (i \neq j) \wedge ((a_i^{(n)}, a_j^{(n)}) \notin WC_{n,1,1}) \right\}, \quad (24)$$

где  $I_g \subseteq I$  — это подмножество множества всех номеров элементов множества  $A_n$ .

Множество многополюсных сетей связи между всеми логическими объектами  $n$ -го уровня целесообразно представить в виде:

$$W_n = \left\{ w_{I_g, hl}^{(n)} \mid g \in G \right\}, \quad (25)$$

где  $G$  — это множество всех номеров заданных подмножеств множества  $A_n$ .

Вышеизложенное позволяет уточнить выражение (13) с учетом введенных выше понятий следующим образом. Соотношение  $a_l^{(n)} \xrightarrow{RC_{n-1,hl,1,1}} a_j^{(n)}$  считается выполненным, если степень множества маршрутов соединений "точка-точка"  $v_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)}$  между логическим объектом с адресом  $a_l^{(n)}$   $n$ -го уровня и логическим объектом  $a_j^{(n)}$  того же уровня, полученные на основании всех таблиц маршрутизации соединений "точка-точка" того же уровня больше единицы (другими словами его подмножеством является не только пустое множество):

$$a_l^{(n)} \xrightarrow{RC_{n-1,hl,1,1}} a_j^{(n)} \Leftrightarrow (a_l^{(n)}, a_j^{(n)}) \in RC_{n-1,hl,1,1} \Leftrightarrow 2^{\wedge \left( v_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)} \right)} > 1. \quad (26)$$

Учитывая (8) и (26), можно записать выражение связывающее логическое соединение "точка-точка"  $n$ -го уровня и маршрутизируемое соединение "точка-точка"  $(n-1)$ -го уровня (рисунок 11):

$$\left( A_{n+1}^{\times 1}, A_{n+1}^{\times 1}, LC_{n,1,1} \right) \Leftrightarrow A_{n+1}^{\times 1} \xrightarrow{LC_{n,1,1}} A_{n+1}^{\times 1} = A_{n+1}^{\times 1} \xrightarrow{IC_{n,1,1}^{-1} \circ RC_{n-1,hl,1,1} \circ IC_{n,1,1}} A_{n+1}^{\times 1}, \quad (27)$$

где  $LC_{n,1,1} = \{ \dots, l_c^{(n,1,1)}, \dots \}$  — подмножество множества пар адресов  $l_c^{(n,1,1)} = (a_l^{(n+1)}, a_j^{(n+1)})$  логических объектов  $(n+1)$ -го уровня, которые взаимосвязаны с помощью соответствующего отношения связности.

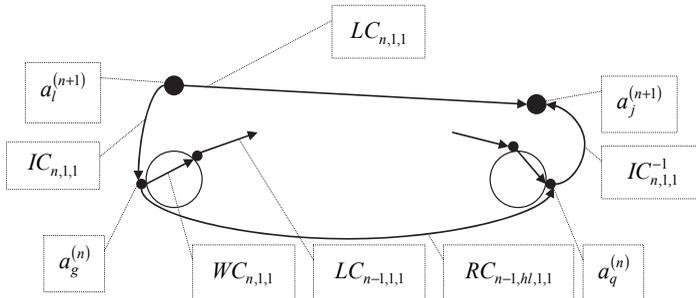


Рис. 11. Взаимосвязь между  $(N)$ -логическим соединением "точка-точка" и  $(N-1)$ -маршрутизируемым соединением "точка-точка"

Таким образом, на примере ИКС получены строгие математические выражения для описания различных аспектов реализации функций маршрутизации в ИММС.

**6. Заключение.** В статье на базе теории иерархических систем [5], эталонной модели взаимодействия открытых систем и теории множеств представлено иерархическое семейство формализмов [16], каждый из которых описывает поведение ИММС с точки зрения различных уровней абстрагирования. В качестве системного обобщения изложенного на рисунке 12 представлено стратифицированное представление соединений ИКС, включающее следующие уровни: (N)-логическое соединение; (N)-интерфейсное соединение и (N-1)-маршрутизируемое соединение; (N)-коммутационное соединение и (N-1)-многошаговое соединение; (N-1)-одношаговое соединение; (N-1)-логическое соединение и (N)-коммутационное соединение; (N-1)-интерфейсное соединение и (N-2)-маршрутизируемое соединение.

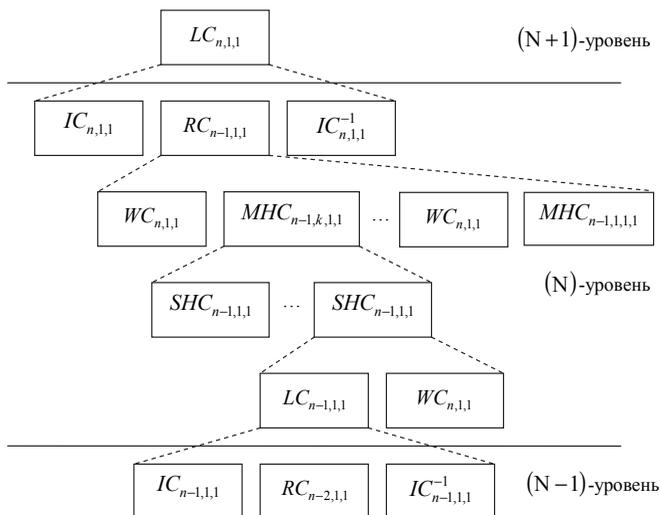


Рис. 12. Стратифицированное описание соединений в ИКС в рамках ЭМВОС

При дальнейшем развитии представленная в статье система формализмов должна способствовать решению актуальной научной проблемы разработки конструктивного подхода к решению задач моделирования, анализа и синтеза (оптимизации) ИММС, который бы

позволил с единых методологических позиций осуществить системную композицию разнородных существующих и вновь создаваемых методов исследования больших технических систем.

В качестве *достоинств теории множеств* в контексте проводимых исследований целесообразно выделить:

- возможность математически строго сформулировать как основные понятия, так и получаемые результаты исследований, получить ряд строго сформулированных понятий относительно элементов [11] и свойств систем, которые прежде могли быть описаны лишь на вербальном уровне;
- возможность зафиксировать систему исходных данных и последовательность процедур их использования для анализа и синтеза (оптимизации) ИММС;
- возможность определить и контролировать как начальные условия, так и узловые моменты моделирования от этапа к этапу исследования с помощью математических методов и моделирования на ЭВМ;
- возможность использования полученных формализмов и атрибутов в качестве формального языка описания ИММС в современных средствах автоматизации управления (в том числе средствах моделирования, проектирования и пр.).

Направлением дальнейших исследований в предметной области является использование системы формализмов, предложенной в статье, для решения конкретных задач моделирования, анализа и синтеза (оптимизации) ИММС, традиционно представляемых в базах теории графов, теории массового обслуживания и теории надежности.

### Литература

1. Тихонов А.Н., Иванников А.Д., Соловьев И.В. и др. Основы управления сложной организационно-технической системой. Информационный аспект: монограф. // М.: МАКС Пресс. 2010. 136 с.
2. Манов, Н. А., Хохлов М. В., Чукуреев Ю. Я. и др. Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем: монограф // Сыктывкар: НИЦ УрО РАН, 2010. 292 с.
3. Саитов И.А., Басов О.О., Карнов А.А. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления: монограф // Орел: Академия ФСО России. 2015. 272 с.
4. ГОСТ 24402-88 Телеобработка данных и вычислительные сети. Термины и определения // М.: Стандартинформ. 2005. 19 с.
5. Mesarovic M., Macko D., Takahara Y. Hierarchical Multilevel Systems Theory // Academic Press. New York. 1970. 344 p.
6. ГОСТ 20886-85 Организация данных в системах обработки данных. Термины и определения // М.: Стандартинформ. 2005. 24 с.
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель // М.: Стандартинформ. 2006. 62 с.

8. Саитов И. А. Основы теории построения защищенных мультипротокольных оптических транспортных сетей телекоммуникационных систем: монограф // Орел: Академия ФСО России. 2008. 220 с.
9. ГОСТ 22348-86 Сеть связи автоматизированная единая. Термины и определения // М.: Госстандарт России. 1990. 14 с.
10. ГОСТ 19472-88 Система автоматизированной телефонной связи общегосударственная. Термины и определения // М.: Госстандарт России. 1990. 47 с.
11. Трегубов Р.Б., Федоров М.В., Дворякин В.В. и др. Способ пространственно-временной коммутации // Патент РФ №. 2530673. 2013.
12. ГОСТ 15971-90 Системы обработки информации. Термины и определения // М.: Госстандарт России. 1992. 14 с.
13. Томас Т.М. II Структура и реализация сетей на основе протокола OSPF: 2-е изд.: Пер. с англ. // М.: Издательский дом «Вильямс». 2004. 816 с.
14. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вызов. 3-е изд // СПб.: Питер. 2006. 958 с.
15. Филин Б.П. Методы анализа структурной надежности сетей связи // М.: Радио и связь. 1988. 208 с.
16. Takahara Y., Mesarovic M. Organization Structure: Cybernetic Systems Foundation // New York: Springer. 2012. 288 p.

## References

1. Tikhonov A.N., Ivannikov A.D., Solov'ev I.V. et. al. *Osnovy upravleniya slozhnoy organizatsionno-tekhnicheskoy sistemoy. Informatsionnyy aspekt: monograf* [Fundamentals of management of complex organizational and technical system. Information aspect: a monograph]. М.: MAKS Press. 2010. 136 p. (In Russ.).
2. Manov N.A., Hohlov M.V., Chukreev Y.Y. et. al. *Metody i modely issledovaniya nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem : monograf* [Methods and models for the study of reliability of electric power systems: monograph]. Syktyvkar, NZ UrO RAN, 2010. 292 p. (In Russ.).
3. Saitov I.A., Basov O.O., Karpov A.A. *Metodologicheskie osnovy sinteza polimodal'nykh infokommunikatsionnykh sistem gosudarstvennogo upravleniya: monograf* [Methodological bases of synthesis of multimodal infocomm governance systems: Monograph]. Orel: Akademiya FSO Rossii. 2015. 272 p. (In Russ.).
4. *GOST 24402-88 Teleobrabotka dannykh i vychislitel'nye seti. Terminy i opredeleniya* [State Standart 24402-88. Teleprocessing and computer network. Terms and definitions]. Standartinform Publ. 2005. 19 p. (In Russ.).
5. Mesarovic M., Macko D., Takahara Y. Hierarchical Multilevel Systems Theory. Academic Press. 1970. New York. 344 p.
6. *GOST 20886-85 Organizatsiya dannykh v sistemakh obrabotki dannykh. Terminy i opredeleniya* [State Standart 20886-85. Data organization in data processing systems. Terms and definitions]. Standartinform Publ. 2005. 24 p. (In Russ.).
7. *GOST R ISO/MEK 7498-1-99 Informatsionnaya tekhnologiya. Vzaimosvyaz' otkrytykh sistem. Bazovaya etalonnyaya model'. Chast' 1. Bazovaya model'* [State Standart R ISO/MEK 7498-1-99. Information technology. Open Systems Interconnection. Basic Reference Model. Part 1: Basic Model]. Standartinform Publ. 2006. 62 p. (In Russ.).
8. Saitov I.A. *Osnovy teorii postroeniya zashchishchennykh mul'tiprotokol'nykh opticheskikh transportnykh setey telekommunikatsionnykh sistem: monograf* [Fundamentals of the theory of building secure multiprotocol optical transport networks telecommunication systems: Monograph]. Orel: Akademiya FSO Rossii. 2008. 220 p. (In Russ.).
9. *GOST 22348-86 Set' svyazi avtomatizirovannaya edinaya. Terminy i opredeleniya* [State Standart 22348-86 United automatic telecommunication network. Terms and definitions]. М.: Gosstandart Rossii. 1990. 14 p. (In Russ.).
10. *GOST 19472-88 Sistema avtomatizirovannoy telefonnoy svyazi obshchegosudarstvennaya. Terminy i opredeleniya* [State Standart 19472-88 National

- automatic telephone communication system. Terms and definitions]. M.: Gosstandart Rossii. 1990. 47 p. (In Russ.).
11. Tregubov R.B., Fedorov M.V., Dvoryadkin V.V. et al. *Sposob prostranstvenno-vremennoy kommutatsii* [Method of spatio-temporal switching]. Patent RF no. 2530673. 2013.
  12. *GOST 15971-90 Sistemy obrabotki informatsii. Terminy i opredeleniya* [State Standart 15971-90 Information processing systems. Terms and definitions]. M.: Gosstandart Rossii. 1992. 14 p. (In Russ.).
  13. Tomas T. M. II — OSPF Network Design Solution: Second Edition. Indianapolis: Cisco Press. 2003. 747p. (Russ. ed.: Tomas T. M. II Struktura i realizatsiya setey na osnove protokola OSPF. 2-e izd. M.: Izdateľ'skiy dom "Vil'yams". 2004. 816 p.).
  14. Olifer V.G. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: Uchebnyk dlya vuzov. 3-e izd.* [Computer networks. Principles, technologies, protocols: a textbook for high schools. 3rd ed]. SPb.: Piter. 2006. 958 p.
  15. Filin B.P. *Metody analiza strukturnoy nadezhnosti setey svyazi* [Methods of analysis of structural reliability of communications networks]. M.: Radio i svyaz'. 1988. 208 p.
  16. Takahara Y., Mesarovic M. *Organization Structure: Cybernetic Systems Foundation*. New York: Springer. 2012. 288 p.

**Трегубов Роман Борисович** — к-т техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 61. [treba@list.ru](mailto:treba@list.ru); ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034; п.т.: +7(4862)54-9731.

**Tregubov Roman Borisovich** — Ph.D., researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 61. [treba@list.ru](mailto:treba@list.ru); 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

**Алексиков Юрий Григорьевич** — к-т техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 29. [allexic@mail.ru](mailto:allexic@mail.ru); ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034; п.т.: +7(4862)54-9731.

**Aleksikov Yuriy Grigor'evich** — Ph.D., researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 29. [allexic@mail.ru](mailto:allexic@mail.ru); 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

**Сантов Сергей Игоревич** — сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 6. [serg-saitov@yandex.ru](mailto:serg-saitov@yandex.ru); ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034; п.т.: +7(4862)54-9731.

**Saitov Sergey Igorevich** — researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 6. [serg-saitov@yandex.ru](mailto:serg-saitov@yandex.ru); 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

## РЕФЕРАТ

### *Трегубов Р.Б., Алексиков Ю.Г., Саитов С.И.* **Представление иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем в теоретико-множественном базисе.**

В статье предлагается вариант применения положений теории множеств и теории иерархических систем для формального описания элементов открытых систем, реализующих взаимосвязанные многоуровневые процессы маршрутизации. В качестве реальных прототипов таких открытых систем могут служить инфраструктурные объекты, в которых реализуется распределение материальных ресурсов, энергии или информации с использованием иерархически вложенных функций управления потоками и/или маршрутизации.

В работе для наглядности теоретические конструкции рассматриваются на примерах из инфокоммуникаций. Это обусловлено, с одной стороны, высокой сложностью инфокоммуникационной системы, как объекта исследования. С другой стороны — это связано с многолетним опытом решения задач и разнообразием методов маршрутизации в таких системах. В соответствие инфокоммуникационной системе поставлен формальный объект — иерархическая многоуровневая маршрутизирующая система, т. е. открытая система, реализующая функции маршрутизации, структура которой при описании не может быть сведена к простым последовательным, параллельным или древовидным структурам.

В статье сделан вывод, что с теоретико-множественной точки зрения преобразование блока данных между смежными уровнями открытой системы, внутри одного уровня и между одноименными уровнями открытых систем могут быть описаны в виде различных отношений между декартовыми степенями соответствующих множеств. Аналогичным образом могут быть представлены логические и коммутационные соединения, процессы мультиплексирования и демультиплексирования, а также маршруты установления таких соединений.

В работе в качестве достоинств предлагаемого подхода выделены следующие его возможности:

- математически строго сформулировать как основные понятия, так и получаемые результаты исследований, получить ряд строго сформулированных понятий относительно элементов и свойств систем, которые прежде могли быть описаны лишь на вербальном уровне;
- зафиксировать систему исходных данных и последовательность процедур их использования для анализа и синтеза (оптимизации) ИММС;
- определить и контролировать как начальные условия, так и узловые моменты моделирования от этапа к этапу исследования с помощью математических методов и моделирования на ЭВМ;
- использовать полученные формализмы и атрибуты в качестве формального языка описания ИММС в современных средствах автоматизации управления (в том числе средствах моделирования, проектирования и пр.).

## SUMMARY

### *Tregubov R.B., Aleksikov Yu.G., Saitov S.I.* **Representation of the Hierarchical Multilayer Routing Systems in a Set-Theoretic Base.**

In the article we propose the option of application of provisions of the theory of sets and the theory of hierarchical systems for the formal description of elements of the open systems realizing interdependent multi-level processes of routing. Infrastructure facilities, in which the distribution of the material resources, energy or information with the use of hierarchically nested functions of control of flows and/or routings is realized, can serve as real prototypes of such open systems.

In the article, for descriptive reasons theoretical constructions are considered with examples from infocommunications. On the one hand, this is due to the high complexity of the infocommunication system as an object of research. On the other hand, it is connected to long-term experience in problem solving as well as a variety of routing methods in such systems. The infocommunication system is associated with the formal object, the hierarchical multilayer routing system, i.e. the open system realizing functions of routing whose structure in the description cannot be reduced to simple sequential, parallel or tree structures.

In the article the conclusion is drawn that, from the set-theoretic point of view, the conversion of a data unit between adjacent levels of open system, within one level, and between the levels of open systems of the same name can be described in the form of different relations between the Cartesian levels of the appropriate sets. Logical and switching connections, processes of multiplexing and demultiplexing, and also routes of establishment of such connections can be similarly represented.

In the article, the advantages of the proposed approach are the following:

- mathematically strict formulation of both the basic concepts and the received results of researches; acquisition of a row of strictly formulated concepts concerning elements and properties of systems which formerly could only be described at a verbal level;
- recording of a system of basic data and a sequence of procedures of their use for the analysis and synthesis (optimization) of IMMS;
- step-by-step definition and control of both initial conditions and focal points in simulation during research by means of mathematical methods and simulation on a computer;
- use of the received formalisms and attributes as the formal language of the description of IMMS in the modern control automation equipment (including simulation and design tools, and so forth).

А.И. МОТИЕНКО, А.Г. ТАРАСОВ, И.В. ДОРОЖКО, О.О. БАСОВ  
**ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ  
СИСТЕМАМИ СПАСЕНИЯ ПОСТРАДАВШИХ**

---

*Мотиенко А.И., Тарасов А.Г., Дорожко И.В., Басов О.О.* **Проактивное управление робототехническими системами спасения пострадавших.**

**Аннотация.** В статье рассматривается задача реализации проактивного управления робототехническими системами (РТС) спасения пострадавших. Применение широкой номенклатуры сенсорных элементов в составе РТС позволяет расширить перечень контролируемых параметров и сформировать управляющие воздействия с использованием прогнозирующих и упреждающих возможностей, базирующихся на методах и технологиях комплексного моделирования. Представлен комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему. Оценена эффективность такого решения.

**Ключевые слова:** проактивное управление, робототехническая система, байесовская сеть доверия, комплексное моделирование, показатели эффективности.

*Motienko A.I., Tarasov A.G., Dorozhko I.V., Basov O.O.* **Proactive Control of Robotic Systems for Rescue Operations.**

**Abstract.** This paper considers the task of implementing proactive control of robotic systems (RS) for rescuing victims. The use of a wide range of sensory elements in the RS allows one to expand the list of monitored parameters and to generate the control action with the use of predictive and proactive capabilities based on the methods and technology of integrated modeling. A complex of models for making decisions about assistance to victims is presented. The efficiency of such decisions is evaluated.

**Keywords:** proactive control; robotic system; Bayesian belief network; integrated modelling; indicators of efficiency.

---

**1. Введение.** Стремление человека заменить техническими средствами свое прямое участие в выполнении различных видов работ является неотъемлемым элементом цивилизационного процесса. Современные достижения в области робототехники нашли достаточно широкое применение при решении задач автоматизации на опасных производствах, при выполнении монотонных и высокоточных работ. Активное внедрение автоматизированных систем в процессы управления и, соответственно, сокращение эксплуатирующего персонала, с одной стороны, и принципиальная ограниченность привлечения персонала для устранения нештатных ситуаций с позиций безопасности, с другой стороны, требуют решения задачи автоматизации процесса устранения неисправности для обеспечения необходимого уровня оперативности и безопасности.

Одной из задач, решаемых автоматизированными системами управления, является парирование отказов и недопущение возникновения нештатных ситуаций, которые не могут быть решены при реализации реактивного управления, требующего учета всей имеющейся

статистической информации, расширенного контроля параметров для осуществления мониторинга и координации.

В этих условиях целесообразно переходить к новой технологии управления, базирующейся на концепции проактивного управления, которое, применительно к организационно-техническим объектам, включает в себя, как функции целеполагания, планирования, регулирования, так и функции учета и контроля, мониторинга и координации.

**2. Концепция проактивного управления.** Проактивное управление объектами предполагает предотвращение возникновения нештатных ситуаций за счет создания в соответствующей системе управления принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на методах и технологиях системного (комплексного) моделирования [1].

Методология проактивного управления направлена на выявление инициирующих событий, формирование и реализацию управляющих воздействий, нацеленных на парирование не следствий, а причин, вызывающих возможные нештатные, аварийные и кризисные ситуации в объекте управления [2]. Анализ современных АСУ показал, что в них реализованы технические средства контроля и управления, фиксирующие последствия нештатных и аварийных ситуаций и обеспечивающие реактивное управление. Для реализации методологии проактивного управления необходимо разрабатывать средства и методы выявления инициирующих событий.

Для реализации методологии проактивного управления в качестве технических средств контроля и управления в условиях нештатной ситуации целесообразно применять робототехнические системы (РТС), которые обладают свойствами манипуляции и локомоции [3, 4]. Ввиду сложности точного априорного определения всего спектра и характеристик нештатной ситуации необходимо разрабатывать образцы РТС с возможностью алгоритмической и структурной реконфигурации для ликвидации непредвиденных нештатных ситуаций. Такие РТС должны строиться по модульной архитектуре, предусматривающей подключение широкого спектра измерительных средств (датчиков, видеокамер, систем технического зрения и др.), а также различных исполнительных механизмов.

В качестве примера применения методологии проактивного управления рассмотрим задачу принятия решения на оказание помощи пострадавшему в зоне аварии ракеты космического назначения (РКН).

В случае аварии РКН образуется зона, характеризующаяся

возникновением опасных, с точки зрения воздействия на людей и окружающую среду, факторов. Для обследования данной зоны необходимо применять РТС, способные обнаружить пострадавших, провести осмотр, опрос и манипуляции для определения их состояния, определить наиболее безопасное положение для транспортировки и реализовать структуру для безопасной транспортировки пострадавшего [5-8]. Особенность решения представленных задач заключается в том, что пострадавших может быть несколько, и при их обнаружении РТС должно на месте спрогнозировать возможность спасения пострадавшего [9-11]. Для решения представленной совокупности задач необходимо разработать комплекс моделей, которые позволят выработать решение на оказание помощи пострадавшему. Такое решение должно осуществляться с позиций системного подхода, который заключается в рассмотрении исследуемых систем в их взаимосвязи и взаимодействии со средой [12-14].

**3. Комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему.** В случае обнаружения пострадавшего в зоне действия опасных факторов необходимо оценить его текущее состояние, спрогнозировать изменение состояния с учетом времени на оценку текущего состояния и эвакуацию из опасной зоны и выработать решение на проведение эвакуации или дальнейший поиск других пострадавших.

Для определения района обследования, рельефа местности, активности воздействия опасных факторов разрабатывается модель оценивания окружающей обстановки. Формирование оптимальной траектории обследования заданного района и создание необходимой для соответствующего положения транспортирования пострадавшего структуры производятся на основе модели движения и реконфигурации РТС в различных условиях обстановки. Для определения позы для транспортировки пострадавшего разрабатывается модель выбора положения для транспортировки пострадавшего. Выработка решения на проведение эвакуации или дальнейший поиск других пострадавших производится на основе модели оценивания эффективности оказания помощи пострадавшему. Взаимодействие данных моделей показано на рисунке 1.

Наиболее сложной является задача разработки модели оценивания окружающей обстановки, так как она связана с учетом большого числа неопределенных, слабо формализуемых факторов. В работе [15] приводится методика расчета выбросов несимметричного диметилгидразина при заданных объеме опасного вещества, площади пролива и данных атмосферы. Для случая аварии РКН на активном участке полета эти данные необходимо

рассчитывать, в связи с чем в статье предлагается модель расчета массы компонентов топлива на активном участке полета РКН, на основании которой с использованием известных методик определяются радиусы зон поражения. При наличии атмосферных данных может быть спрогнозирована динамика изменения агрессивности среды, по которой определяется среднее время выживания с момента возникновения аварии до гибели пострадавшего.



Рис. 1. Комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему

Модель выбора положения для транспортировки пострадавшего описана в [16]. В данной работе уточнена ее структура, добавлены переменные, обозначающие обнаружение пострадавшего, активность среды и способы определения признаков травм. Полученные из модели оценивания обстановки радиусы зон повреждений определяют степень активности среды («высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует»), которая, в свою очередь, влияет на возможность проведения мероприятий определения признаков травм (осмотр, опрос, манипуляции) в модели выбора положения для транспортировки пострадавшего.

Модель движения и реконфигурации РТС определяется решаемыми задачами, особенностями применения и характеристиками РТС, в настоящее время прорабатывается и является направлением дальнейших исследований.

Модель оценивания эффективности оказания помощи пострада-

давшему основана на известных подходах к оцениванию эффективности и учитывает неопределенность, нечеткость величины ущерба.

#### 4. Модель оценивания обстановки в результате аварии РКН.

Данная модель по результатам анализа телеметрической информации и определения времени аварии известного типа РКН позволяет рассчитать радиусы зон поражения.

В случае экстремальной ситуации на стартовом столе огневое кольцо не распространится более чем на 300 м от пусковой установки. При разгерметизации баков с компонентами ракетного топлива (КРТ) в результате падения РКН образуется облако с КРТ, масса которого определяется по следующей формуле [17]:

$$M_{\text{обл}} = M_{\Gamma} + M_{\text{Ж}} + M_{\text{И}}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{обл}}$  — масса КРТ в первичном облаке;  $M_{\Gamma}$  — масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде газа при мгновенном вскипании КРТ;  $M_{\text{Ж}}$  — масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде аэрозоля;  $M_{\text{И}}$  — масса КРТ, переходящая в первичное облако в виде газа при кипении пролива.

Площадь поверхности пролива  $S_{\text{прол}}$  на открытой местности при свободном растекании определяется по формуле:

$$S_{\text{прол}} = \frac{\pi \left( \sqrt[3]{25,5 \frac{M_{\text{КРТ}} - M_{\Gamma} - M_{\text{Ж}}}{\rho_{\text{КРТ}}}} \right)^2}{4}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{КРТ}}$  — масса КРТ в РКН на момент аварии;  $\rho_{\text{КРТ}}$  — плотность КРТ.

Радиус первичного облака КРТ  $R_{\text{обл1}}$  в момент детонации баков РКН определяется как:

$$R_{\text{обл1}} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \frac{M_{\text{обл}}}{\rho_{\text{выб}}}}, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{выб}}$  — плотность КРТ в первичном облаке в начальный момент времени.

Радиус вторичного облака  $R_{\text{обл2}}$ , образующегося при испарении КРТ из пролива, определяется как:

$$R_{\text{обл2}} = 0,56\sqrt{S_{\text{прол}}} \cdot \quad (4)$$

В случае экстремальной ситуации при подготовке и пуске РКН результаты воздействия на людей и окружающую среду зависят от количества топлива, оставшегося в баках ракеты-носителя, и, соответственно, времени полета. По статистическим и техническим данным, наиболее значительные последствия (взрыв, удар о земную поверхность, пожар) возможны в первые 25÷40 секунд полета, т.е. в радиусе 30 км от стартового комплекса. После этого критического периода полета высота становится значительной, а остатки топлива, наоборот, незначительными.

По характеристикам двигательных установок можно рассчитать расход КРТ и, приняв его постоянным, определить массу КРТ ( $M_{\text{КРТ}}$ ) в процессе полета РКН для различных моментов времени возникновения ЭС. Для наиболее критического периода полета (0÷40 секунд) данные по массе КРТ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Массовые характеристики КРТ на начальном этапе полета РКН

Время полета, с	Масса КРТ в боковых блоках, кг	Масса КРТ в центрально м блоке, кг	Масса КРТ в 3 ступени, кг	Общая масса КРТ, кг	Масса О, кг	Масса Г, кг
0	39162	90160	23204	270012	191941	78071
10	35911	87228	23204	254076	180612	73463
20	32660	84296	23204	238140	169284	68856
30	29409	81364	23204	222203	157956	64248
40	26158	78432	23204	206267	146627	59640

В случае возникновения ЭС без возгорания КРТ кислород, который используется в качестве окислителя (О), быстро испаряется с образованием «белого облака». Керосин, который используется в качестве горючего (Г), в результате детонации частично перейдет в газообразное и аэрозольное состояние с образованием первичного облака, а оставшаяся часть образует «пятно загрязнения» на поверхности Земли. Для рассматриваемого примера были получены данные, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Пространственные характеристики в случае возникновения ЭС без возгорания КРТ на начальном этапе полета РКН

Время полета, с	Масса горючего ( $M$ ), кг	$M_{\Gamma}$ , кг	$M - M_{\Gamma}$ , кг	$M_{\text{Ж}}$ , кг	$M_{\text{И}}$ , кг	$M_{\text{обл}}$ , кг	$R_{\text{обл}}$ , м	$S_{\text{прол}}$ , м <sup>2</sup>	$R_{\text{обл2}}$ , м
0	78071	30606	47465	30606	16860	61211	6	52	4
10	73463	28799	44664	28799	15865	57599	6	50	4
20	68856	26993	41863	26993	14870	53986	5	48	4
30	64248	25187	39061	25187	13875	50373	5	46	4
40	59640	23380	36260	23380	12879	46761	5	43	4

Значительно чаще в результате экстремальной ситуации происходит возгорание КРТ, из-за чего возникает более сложная задача моделирования проливов КРТ с последующим возгоранием и образованием облака с продуктами горения токсичных КРТ. В данном случае необходимо рассмотреть воздействие ударной волны и динамику распространения токсонагрузки вредных веществ.

Для определения радиуса действия ударной волны, сформированной в результате взрыва топливовоздушной смеси (ТВС), можно воспользоваться приближенной формулой [17]:

$$R = K \cdot W^{1/3} / (1 + (3180/W)^2)^{1/6}, \quad (5)$$

где коэффициент  $K$  определяется по справочным данным, а  $W$  — тротиловый эквивалент взрыва, определяемый из соотношения:

$$W = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{M_{\Gamma} q_{\Gamma}}{4,5 \cdot 10^6}, \quad (6)$$

где  $M_{\Gamma}$  — масса ТВС;  $q_{\Gamma}$  — теплота сгорания газа, величина которой определяется по справочным данным или оценивается по формуле [17]:

$$q_{\Gamma} = 44\beta, \quad (7)$$

где  $\beta$  — табличное значение корректировочного коэффициента для наиболее распространенных взрывоопасных веществ.

Для начального участка полета РКН «Союз-2» определены следующие значения радиусов действия ударной волны для зоны полного разрушения зданий  $R_1$  ( $K=3,8$ ), для зоны тяжелых повреждений  $R_2$  ( $K=5,6$ ) и для зоны средних повреждений  $R_3$  ( $K=9,6$ ), которые

представлены в таблице 3.

Таблица 3. Расчетные значения радиусов действия ударной волны в случае возникновения ЭС на начальном этапе полета РКН для различных зон повреждений

Время полета, с	$M_{Г}$ , кг	$W$ , МДж	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$R_3$ , м
0	253152,29	129979,95	192,47	283,64	486,24
10	238211,17	122308,50	188,61	277,94	476,48
20	223270,06	114637,05	184,57	272,00	466,29
30	208328,94	106965,60	180,36	265,79	455,64
40	193387,83	99294,15	175,93	259,27	444,47

Таким образом, модель оценивания окружающей обстановки позволяет по известным характеристикам РКН (масса КРТ) и времени возникновения аварии рассчитать радиусы зон опасных факторов. На основании начальных радиусов зон поражения и данных атмосферы прогнозируются изменения агрессивности окружающей среды для выработки оптимальных маршрутов спасения пострадавших и времени нахождения пострадавшего в зоне действия опасных факторов с целью определения возможности спасения пострадавшего.

**5. Модель выбора положения для транспортировки пострадавшего на основе байесовских сетей доверия.** Для моделирования процесса выбора положения для транспортировки пострадавшего предпочтение было отдано байесовским сетям доверия (БСД), обладающими преимуществами по сравнению с деревьями решений, методами анализа иерархий, продукционными моделям представления знаний, нечеткими моделями и нейронными сетями [18]. БСД основаны на принципе максимального использования имеющейся априорной информации, ее непрерывного пересмотра и переоценки с учетом получаемых выборочных данных об исследуемом явлении или процессе. При этом новые наблюдения или решения применяются для модификации априорных вероятностей, которые, в свою очередь, необходимы для вычисления апостериорных вероятностей гипотез [19]. Кроме того, в отсутствие эмпирических данных БСД обеспечивают использование субъективных (экспертных) вероятностных оценок для априорных гипотез.

Разработанная математическая модель выбора положения для транспортировки пострадавшего в виде БСД имеет следующий вид:

$$\langle G, PAR \rangle, \quad (8)$$

где  $G$  — ациклический направленный граф;  $PAR$  — множество параметров, определяющих БСД.

Вершинами ациклического направленного графа  $G$  являются: (рисунок 2).

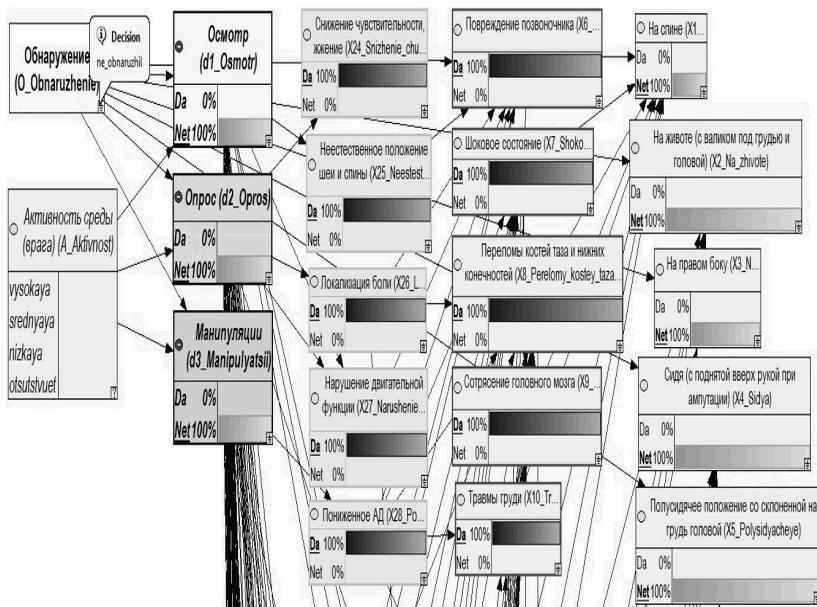


Рис. 2. Фрагмент БД, когда пострадавший не обнаружен

1. Дискретные переменные, обозначающие:

- позы для транспортировки (на спине, на животе (с валиком под грудью и головой), на правом боку, сидя (с поднятой вверх рукой при ампутации), полусидячее положение со склоненной на грудь головой) —  $x_1, \dots, x_5$  ;

- наиболее распространенные травмы (повреждение позвоночника, переломы костей таза и нижних конечностей, сотрясение головного мозга, травмы шеи и т.д.) —  $x_6, \dots, x_{23}$  ;

- признаки травм (потеря сознания, неестественное положение шеи и спины, тахикардия, головная боль, рвота, нарушение речи и т.д.) —  $x_{24}, \dots, x_{125}$  ;

- способы определения признаков травм (осмотр, опрос, манипуляции) —  $d_1, \dots, d_3$ , которые связаны с переменными  $x_{24}, \dots, x_{125}$ . При этом, если признак травмы не обнаруживается одним из способов определения травм, то связь между ними отсутствует, например, при-

знак травмы «Шум в ушах» не имеет связи с «Осмотром» и «Манипуляциями»;

– активность среды (врага) —  $A$  («высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует»), от которых зависит применение способов определения травм). Информация об активности среды (врага) может быть введена в робота либо уточнена роботом с помощью имеющихся у него датчиков шума, газа и т.д.;

2. Вершина действия, обозначающая обнаружение (необнаружение) пострадавшего, —  $O$ .

Параметрами сети **PAR** являются [16]:

1. Для вершины  $A$ , не имеющей родительских переменных, априорные вероятности (безусловные вероятности) того, что активность среды (врага) «высокая», «средняя», «низкая», «отсутствует» —  $P(\tilde{A}_m)$ ,  $m = 1...4$ . Знак « $\sim$ » обозначает положительное или отрицательное означивание переменной.

2. Для вершин  $x_{24}, \dots, x_{125}$  задаются условные вероятности зависимости признаков травм от способов определения травм —  $P(\tilde{x}_k | \tilde{d}_n)$ ,  $k = 24...125$ ;  $n = 1...3$ .

3. Для вершин  $x_6, \dots, x_{23}$  задаются условные вероятности зависимости травм от признаков травм —  $P(\tilde{x}_j | \tilde{x}_k)$ ,  $j = 6...23$ ,  $k = 24...125$ .

4. Для вершин  $x_1, \dots, x_5$  задаются условные вероятности зависимости положений для транспортировки от травм —  $P(\tilde{x}_i | \tilde{x}_j)$ ,  $i = 0...5$ ,  $j = 6...23$ .

В начальный момент времени (пострадавший не обнаружен) робот действий (осмотра, опроса, манипуляций) не производит, предполагается, что пострадавший где-то находится и у него присутствует весь набор признаков травм, положение для транспортировки при этом не выбирается (рисунок 2).

Главное назначение БСД — апостериорный вывод. Суть апостериорного вывода заключается в следующем: при поступлении свидетельства (новой информации) необходимо приравнять к нулю несовместимые со свидетельством вероятности исходов и нормировать оставшиеся вероятности, учитывая априорные данные с тем, чтобы вероятности оставшихся исходов в сумме снова давали единицу [18, 19]. Априорные данные пересчитываются, в результате получается апостериорная оценка, которая, в свою очередь, будет являться априорной информацией в случае поступления новых свидетельств. Апостериорный вывод

в БСД основан на процедуре опроса БСД. Под опросом БСД понимается вычисление безусловного распределения переменной на основе условных распределений БСД и поступивших данных (свидетельств).

На рисунке 3 представлен результат апостериорного вывода в БСД при поступлении информации о том, что пострадавший обнаружен, активность среды (врага) — «средняя» (проводится только «Осмотр» и «Опрос»), а также информации о пострадавшем [16] (таблица 4).

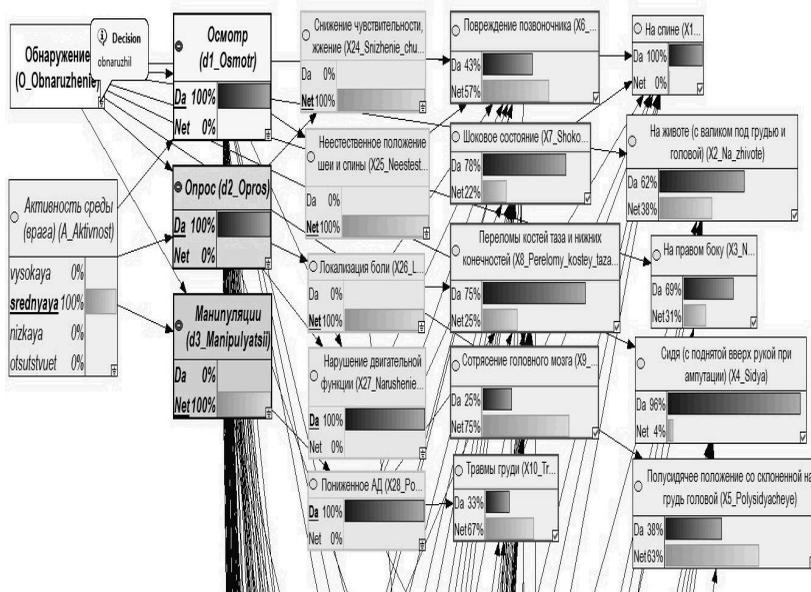


Рис. 3. Фрагмент БСД при поступлении информации

Если пострадавший обнаружен, то проводится действие «Осмотр», а в зависимости от активности среды — «Опрос» и «Манипуляции», в результате которых могут быть исключены определенные признаки травм, а следовательно, уменьшены вероятности связанных с ними травм, что влияет на выбор положения для транспортировки. Выбирается оптимальное положение для транспортировки:

$$x^* = \arg \max_{x_i \in \{x_1, \dots, x_5\}} \{P(x_i | \tilde{x}_6, \dots, \tilde{x}_{23})\}, \quad (9)$$

Таблица 4. Поступившая информация о пострадавшем

Усл. обозн.	Наличие	Усл. обозн.	Наличие	Усл. обозн.	Наличие
A	средняя	X <sub>74</sub>	Нет	X <sub>122</sub>	Нет
d <sub>1</sub>	Да	X <sub>75</sub>	Нет	X <sub>123</sub>	Нет
d <sub>2</sub>	Да	X <sub>76</sub>	Да	X <sub>124</sub>	Нет
d <sub>3</sub>	Нет	X <sub>78</sub>	Нет	X <sub>125</sub>	Нет
X <sub>25</sub>	Нет	X <sub>79</sub>	Нет	X <sub>26</sub>	Нет
X <sub>30</sub>	Да	X <sub>81</sub>	Нет	X <sub>29</sub>	Нет
X <sub>31</sub>	Да	X <sub>82</sub>	Нет	X <sub>36</sub>	Нет
X <sub>37</sub>	Да	X <sub>85</sub>	Нет	X <sub>53</sub>	Нет
X <sub>38</sub>	Да	X <sub>86</sub>	Нет	X <sub>54</sub>	Нет
X <sub>39</sub>	Да	X <sub>87</sub>	Да	X <sub>55</sub>	Нет
X <sub>40</sub>	Нет	X <sub>89</sub>	Да	X <sub>56</sub>	Нет
X <sup>42</sup>	Да	X <sub>94</sub>	Нет	X <sub>58</sub>	Нет
X <sub>43</sub>	Да	X <sub>95</sub>	Нет	X <sub>64</sub>	Нет
X <sub>45</sub>	Да	X <sub>96</sub>	Нет	X <sub>66</sub>	Нет
X <sub>46</sub>	Да	X <sub>99</sub>	Нет	X <sub>68</sub>	Нет
X <sub>47</sub>	Нет	X <sub>101</sub>	Нет	X <sub>77</sub>	Нет
X <sub>48</sub>	Нет	X <sub>102</sub>	Нет	X <sub>83</sub>	Нет
X <sub>49</sub>	Да	X <sub>103</sub>	Да	X <sub>90</sub>	Нет
X <sub>50</sub>	Да	X <sub>104</sub>	Да	X <sub>92</sub>	Нет
X <sub>51</sub>	Да	X <sub>106</sub>	Нет	X <sub>97</sub>	Нет
X <sub>52</sub>	Да	X <sub>107</sub>	Нет	X <sub>100</sub>	Нет
X <sub>57</sub>	Нет	X <sub>109</sub>	Нет	X <sub>108</sub>	Нет
X <sub>59</sub>	Нет	X <sub>110</sub>	Нет	X <sub>115</sub>	Нет
X <sub>63</sub>	Нет	X <sub>111</sub>	Нет	X <sub>119</sub>	Нет
X <sub>65</sub>	Нет	X <sub>112</sub>	Нет	X <sub>27</sub>	Да
X <sub>67</sub>	Нет	X <sub>117</sub>	Нет	X <sub>41</sub>	Да
X <sub>71</sub>	Нет	X <sub>118</sub>	Нет	X <sub>44</sub>	Да
X <sub>72</sub>	Нет	X <sub>120</sub>	Нет	X <sub>88</sub>	Нет
X <sub>73</sub>	Да	X <sub>121</sub>	Нет	X <sub>93</sub>	Нет

**6. Модель оценивания эффективности оказания помощи пострадавшему.** С точки зрения системного подхода, эффективность рассматривается как обобщенное свойство системы, характеризующее степень или полноту достижения цели ее функционирования. Основным требованием при выборе показателя эффективности является соответствие показателя эффективности цели операции  $A_0$ , которая отображается требуемым результатом  $Y^{TP}$ .

Кроме того, показатель эффективности должен удовлетворять следующим требованиям [20]:

- содержательности (физический, экономический или иной смысл);
- интерпретируемости (истолкованием полученных математических зависимостей и результатов применительно к рассматриваемой конкретной области);
- измеримости;
- соответствия системе предпочтений лица, принимающего решение.

Можно выявить два типа основных показателей эффективности применения РТС [21].

Первый тип зависимости эффективности ( $\mathcal{E}$ ) от допущенного ущерба ( $Y_D$ ) характеризуется наличием порогового ущерба ( $Y^*$ ) (рисунк 5, а). Если величина допущенного ущерба превосходит величину порогового ущерба, то цель применения РТС можно считать не достигнутой; если же не превосходит — цель применения РТС достигнута. Наиболее емким ПЭ в этом случае является вероятность  $\mathcal{E} = P(Y_D \leq Y^*)$  того, что в результате применения РТС будет допущен ущерб не больше порогового, т.е. вероятность достижения поставленной цели.

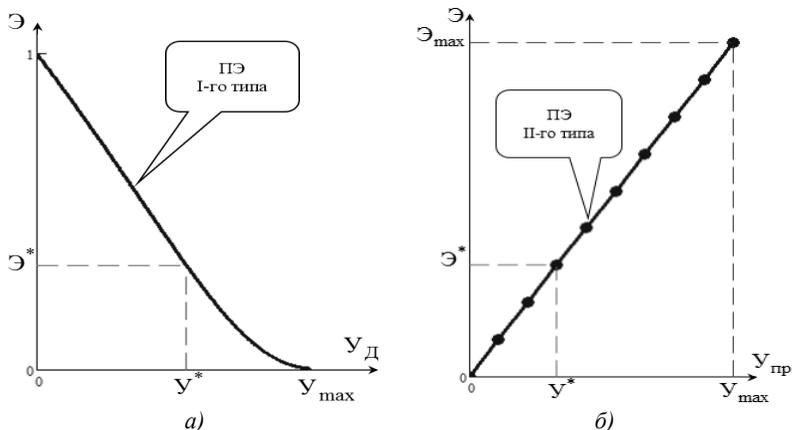


Рис. 4. Гипотетические графики типов показателя эффективности от допущенного и предотвращенного ущерба

Второй тип зависимости эффективности от предотвращенного ущерба имеет место, когда целью применения РТС является макси-

мальное сокращение возможного числа пострадавших (рисунок 5, б). Показателем эффективности при этом является математическое ожидание предотвращенного ущерба —  $\mathcal{E} = M(Y_{\text{пр}})$ .

Главной целью спасения пострадавших является обнаружение максимального числа живых пострадавших и их эвакуация из опасной зоны. В соответствии с этой целью показателем эффективности будет математическое ожидание числа обнаруженных и спасенных пострадавших ( $N_{\text{сп}}$ ) —  $\mathcal{E} = M(N_{\text{сп}})$ . В качестве критерия эффективности спасения пострадавших  $K_{\text{сп}}$  может быть принят критерий оптимальности, в соответствии с которым необходимо обнаружить и спасти максимальное число пострадавших в единицу времени:

$$K_{\text{сп}} = \frac{M[N_{\text{сп}}]}{T_{\text{п}}} \rightarrow \max, \quad (10)$$

где  $T_{\text{п}}$  — время проведения поиска и спасения пострадавших.

За основу для определения эффективности работ по спасению пострадавших примем закон гибели пострадавших:

$$N = N_0 e^{-\alpha T_{\text{п}}}, \quad (11)$$

где  $N$  — число погибших в данный момент времени, чел.;  $N_0$  — число изначально живых в первый момент после возникновения экстремальной ситуации, чел.; ч.;  $\alpha$  — показатель темпа гибели:

$$\alpha = \frac{1}{T_{\text{сп}}}, \quad (12)$$

где  $T_{\text{сп}}$  — среднее время выживания с момента возникновения экстремальной ситуации до гибели пострадавшего.

Из формулы (11) видно, что чем быстрее будет оказана помощь пострадавшим, тем больше число спасенных. Опыт показывает, что сокращение времени начала спасательных работ в завалах зданий (сооружений) с 6 часов до 1 часа уменьшает общие потери на 30÷40%, а повышение темпа работ в два раза также увеличивает число спасенных на 30÷40% [22]. Таким образом, в качестве показателя эффективности применения РТС спасения пострадавших целесообразно использовать темп (интенсивность) извлечения пострадавших (число спасенных за час работы), который в том числе зависит от выбора положения для транспортировки пострадавшего. Правильное положение транспортировки пострадавшего позволит повысить выживаемость

пострадавшего за счет сокращения времени действия агрессивной среды, а неправильное положение транспортировки пострадавшего уменьшит среднее время выживания, тем самым увеличив показатель темпа гибели. Учитывая данные обстоятельства, показатель темпа гибели будет определяться следующим выражением:

$$\alpha = \frac{K_{\text{пол}}^{\text{П}}}{T_{\text{ср}}}, \quad (13)$$

где  $K_{\text{пол}}^{\text{П}}$  — коэффициент влияния положения для транспортировки пострадавшего на темп гибели:

$$K_{\text{пол}}^{\text{П}} = \begin{cases} K_{\text{пол}}^{\text{П}} = 1, \text{ при правильном положении;} \\ K_{\text{пол}}^{\text{П}} > 1, \text{ при неправильном положении.} \end{cases}$$

Время проведения поиска и спасения пострадавших при применении РТС будет определяться следующим выражением:

$$T_{\text{П}} = t_{\text{обн}}^{\text{ЭС}} + t_{\text{разв}}^{\text{РТС}} + t_{\text{п}}^{\text{П}} + t_{\text{сп}}^{\text{П}}, \quad (14)$$

где  $t_{\text{обн}}^{\text{ЭС}}$  — время обнаружения экстремальной ситуации;  $t_{\text{разв}}^{\text{РТС}}$  — время развертывания РТС;  $t_{\text{п}}^{\text{П}}$  — время поиска пострадавшего;  $t_{\text{сп}}^{\text{П}}$  — время спасения пострадавшего.

Время спасения пострадавшего складывается из времени определения положения для транспортировки пострадавшего, времени погрузки и эвакуации пострадавшего, которые зависят от характеристик РТС и способов их применения.

Оценивание эффективности мероприятий по спасению пострадавших показало, что число пострадавших в значительной мере зависит от характеристик и способов применения РТС. Представленные модели могут быть использованы для формирования требований к тактико-техническим характеристикам перспективных РТС спасения пострадавших для соответствия их требованиям по эффективности.

**7. Заключение.** В случае возникновения нештатных и аварийных ситуаций параметры объекта управления или взаимодействующей с ним среды представляют серьезную опасность для жизни и здоровья людей, в связи с чем устранение подобных ситуаций с позиций безопасности возможно только с применением РТС. В состав РТС входит сенсорная система (датчики, система технического зрения и т.д.), благодаря чему появляется возможность получения дополнительных све-

дений об объекте исследования, которые целесообразно использовать для мониторинга и координации управления. Для реализации данных функций и перехода от реактивного на проактивное управление необходима разработка комплекса моделей и методик, которые позволяют формировать управление с учетом развивающейся ситуации. Комплекс моделей для выработки решения на оказание помощи пострадавшему демонстрирует необходимость прогнозирования ситуации, так как можно потратить значительный ресурс на спасение пострадавших и не получить ожидаемого эффекта. Неправильные решения по выбору маршрута эвакуации пострадавших (без прогнозирования изменения агрессивности среды и расчета времени выживания), положения транспортирования пострадавшего (без оценивания признаков пострадавшего) могут привести к гибели пострадавших при их спасении, что доказывает правильность и целесообразность принятого подхода.

### Литература

1. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1(162). С.162–174.
2. *Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В.* Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. № 11. С.7–15.
3. *Тарасов А.Г.* Перспективы создания робототехнических средств и комплексов подготовки и пуска ракет космического назначения // Научно-технические проблемы освоения космоса. 2014. № 6. С.72–75.
4. *Тарасов А.Г., Минаков Е.П.* Робототехнические комплексы автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения и показатели эффективности их применения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 6. С. 19–24.
5. *Мотиенко А.И., Басов О.О., Ронжин А.Л.* Автоматизированные робототехнические средства транспортировки раненых // Труды первой военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». М. 2016. С. 242–247.
6. *Калинин В.Н., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Басов О.О., Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л.* Теоретические и прикладные аспекты управления структурной динамикой робототехнических комплексов // Труды первой военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». М. 2016. С. 369–372.
7. *Солдатов Е.А., Жигалов А.А.* Формирование семейства медицинских робототехнических комплексов военного назначения для эвакуации раненых и пострадавших с поля боя // Труды первой военно-научной конференции «Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации». М. 2016. С. 267–270.
8. *Козыренко Н.С., Мещеряков Р.В., Ходашинский И.А., Ануфриева Н.Ю.* Математическое и алгоритмическое обеспечение оценки состояния здоровья человека // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 33. С. 117–146.
9. *Карпов А.А.* Автоматическое распознавание аудиовизуальной русской речи с применением асинхронной модели // Информационно-измерительные и

- управляющие системы. М. : Радиотехника. 2010. № 7. Т. 8. С. 91–96.
10. *Ронжин А.Л., Юсупов Р.М.* Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 1(162). С. 195–206.
  11. *Басов О.О.* Принципы построения полимодальных инфокоммуникационных систем на основе многомодальных архитектур абонентских терминалов // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 39. С. 109–122.
  12. *Калинин В.Н.* Морфологический анализ проблематики теории системных исследований // *Труды СПИИРАН*. 2013. Вып. 1(24). С. 89–107.
  13. *Калинин В.Н.* Космический аппарат как объект системных исследований // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2014. Вып. 640. С. 80–89.
  14. *Калинин В.Н.* О некоторых задачах оптимального управления информационным взаимодействием космического аппарата с поверхностью Земли // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 4(41). С.34–56.
  15. *Шатов С.В.* Расчет поражающих факторов и их вероятных зон действия при выбросе жидкой фазы несимметричного диметилгидразина // *Труды Военно-космической академии*. 2015. Вып. 648. С.187–191.
  16. *Мотиенко А.И., Макеев С.М., Басов О.О.* Анализ и моделирование процесса выбора положения для транспортировки пострадавшего на основе байесовских сетей доверия // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 6 (43). С. 135–155.
  17. *Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. 3-е изд., испр. и доп.* // М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности. 2010. Серия 27. Выпуск 2. 208 с.
  18. *Jensen F.V., Nielsen T.D.* Bayesian networks and decision graphs // Berlin: Springer, 2007. 457 p.
  19. *Perl J.* Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference // NY etc.: Morgan Kaufmann Publ. 1994. 552 p.
  20. *Куренков В.И.* Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Методические вопросы // Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). 2012. 201 с.
  21. *Петухов Г.Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1. Методология, методы, модели // МО СССР. 1989. 665 с.
  22. *Попов П.А., Федорук В.С., Баринов М.Ф., Мясников Д.В.* Основы моделирования и оценки эффективности действий сил РСЧС при ведении аварийно-спасательных и других неотложных работ: учебное пособие // Химки: АГЗ МЧС России. 2014. 61 с.

## References

1. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. [Theoretical and technological foundations of the concept of proactive monitoring and management of complex objects]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki — Proceedings of the JuFU. Technical Sciences*. 2015. vol. 1(162). pp. 162–174. (In Russ.).
2. Okhtilev M. Yu., Mustafin N. G., Miller, V. E., Sokolov B. V. [The Concept of proactive control over complex objects: theoretical and technological framework]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie — proc. Instrumentation*. 2014. vol. 11. pp. 7–15. (In Russ.).
3. Tarasov A.G. [Prospects of creation of robotic tools and systems training and startup space rockets]. *Naukoemkie tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyah Zemli — H@ES Research*. 2014. vol. 6. no. 6. pp. 72–75. (In Russ.).

4. Tarasov A.G., Minakov E.P. [Robotic systems of automated control systems preparation and launching of a space rocket and indicators of efficiency of their application]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery — Industrial automation and controllers*. 2015. vol. 6. pp. 19–24. (In Russ.).
5. Motienko A.I., Basov O.O., Ronzhin A.L. [Automated robotic means of transportation of the wounded]. *Trudy pervoy voenno-nauchnoj konferencii «Robotizacija Vooruzhennykh Sil Rossijskoj Federacii»* [Proceedings of the first military-scientific conference "Robotics of the Armed Forces of Russian Federation"]. M. 2016. pp. 242–247. (In Russ.).
6. Kalinin V.N., Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Basov O.O., Vatamanjuk I.V., Ronzhin A.L. [Theoretical and applied aspects of management of structural dynamics of robotic complexes]. *Trudy pervoy voenno-nauchnoj konferencii «Robotizacija Vooruzhennykh Sil Rossijskoj Federacii»* [Proceedings of the first military-scientific conference "Robotics of the Armed Forces of Russian Federation"]. M. 2016. pp. 369–372. (In Russ.).
7. Soldatov E.A., Zhigalov A.A. [Formation of the family of medical robotic complexes for military use for the evacuation of wounded and injured from the battlefield]. *Trudy pervoy voenno-nauchnoj konferencii «Robotizacija Vooruzhennykh Sil Rossijskoj Federacii»* [Proceedings of the first military-scientific conference "Robotics of the Armed Forces of Russian Federation"]. M. 2016. pp. 267–270. (In Russ.).
8. Kozyrenko N.K., Meshcheryakov R.V., Hodashinsky I.H., Anufrieva N.A. [Mathematical Model and Algorithms of People Health Evaluation]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2014. vol. 33. pp. 117–146. (In Russ.).
9. Karpov A.A. [Automatic recognition of audio-visual russian speech by asynchronous model]. *Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy — Information-measuring and operating systems*. M.: Radiotekhnika. 2010. vol. 7. no. 8. pp. 91–96. (In Russ.).
10. Ronzhin A.L., Yusupov R.M. [Multimodal interfaces for autonomous robotic systems]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki — Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2015. vol. 1(162). C. 195–206. (In Russ.).
11. Basov O.O. [Principles of construction of polymodal info-communication systems based on multimodal architectures of subscriber's terminals]. *Trudy SPIIRAS — SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 39. pp. 109–122. (In Russ.).
12. Kalinin V.N. [Morphological analysis of problems of the system researches theory]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 1(24). pp. 89–107. (In Russ.).
13. Kalinin V.N. [The spacecraft as object of system researches]. *Trudy Voennokosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo — Proceedings of the Military-space academy named after A.F. Mozhajskiy*. 2014. vol. 640. pp. 80–89. (In Russ.).
14. Kalinin V.N. [On some optimal control problems of informational interaction of the spacecraft with the surface of the Earth]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 4(41). pp. 34–56. (In Russ.).
15. Shatov S.V. [Calculation of amazing factors and their probable operative ranges at emission of the liquid phase asymmetrical dimethylhydrazine]. *Trudy Voennokosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo — Proceedings of the Military-space academy named after A.F. Mozhajskiy*. 2015. vol. 648. pp. 187–191. (In Russ.).
16. Motienko A.I., Makeev S.M., Basov O.O. [Analysis and Modeling of the Process of a Choice of Position for Transportation of the Sufferer on the basis of Bayesian Belief Networks]. *Trudy SPIIRAN — SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 6 (43). pp. 135–155. (In Russ.).
17. *Metodiki ocenki posledstvij avarij na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektah: sbornik dokumentov. 3-e izd., ispr. i dop.* [Evaluation Methods of Accident Consequences at Hazardous Industrial Units: A Source Book. 3<sup>rd</sup> ed., revised and enlarged]. M. M.:

- Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti. 2010. Series 27. vol. 2. 208 p. (In Russ.).
18. Jensen F.V., Nielsen T.D. Bayesian networks and decision graphs. Berlin: Springer. 2007. 457 p.
  19. Perl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. NY etc. Morgan Kaufmann Publ. 1994. 552 p.
  20. Kurenkov V. I. *Metody issledovaniya jeffektivnosti raketno-kosmicheskikh sistem. Metodicheskie voprosy* [Methods for investigating the efficiency of rocket-space systems. Methodological issues]. Samara: Samar. gos. ajerokosm. un-t im. S. P. Koroleva (nac. issled. un-t). 2012. 201 p. (In Russ.).
  21. Petukhov G.B. *Osnovy teorii jeffektivnosti tselenapravennykh protsessov. Ch.I. Metodologiya, metody, modeli* [Fundamentals of the theory of the effectiveness of targeted processes. Part 1. Methodology Methods, Models]. MO SSSR [Ministry of Defense of the USSR]. 1989. 665 p. (In Russ.).
  22. Popov A.P., Fedoruk V.S., Barinov M.F., Myasnikov D.V. *Osnovy modelirovaniya i ocenki jeffektivnosti dejstvij sil RShS pri vedenii avarijno-spasatel'nyh i drugih neotlozhnyh rabot* [Fundamentals of modeling and evaluating the effectiveness of emergency prevention and response forces in the conduct of rescue and other emergency operations. Training manual]. Khimki: AHP of EMERCOM of Russia, 2014. 61 p. (In Russ.).

**Мотиенко Анна Игоревна** — научный сотрудник исследовательской группы информационных технологий в образовании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), преподаватель кафедры физики, математики и информатики, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (ГБОУ ВПО ПСПбГМУ им. И. П. Павлова Минздрава России). Область научных интересов: информационные технологии в образовании, информационные технологии в медицине, аварийно-спасательные роботы. Число научных публикаций — 8. [anna.gunchenko@gmail.com](mailto:anna.gunchenko@gmail.com); 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-03-82.

**Motienko Anna Igorevna** — researcher of research group of information technologies in education, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), teacher of physics, mathematics and informatics department, Pavlov First Saint Petersburg State Medical University. Research interests: information technologies in education, information technologies in medicine, rescue robots. The number of publications — 8. [anna.gunchenko@gmail.com](mailto:anna.gunchenko@gmail.com); 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-03-82.

**Тарасов Анатолий Геннадьевич** — к-т техн. наук, докторант кафедры автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: автоматизация технологических процессов, контроль технического состояния автоматизированных систем подготовки и пуска, разработка учебно-тренировочных средств подготовки специалистов, робототехника. Число научных публикаций — 48. [Atol-77@mail.ru](mailto:Atol-77@mail.ru); Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 347-95-26.

**Tarasov Anatoly Gennadevich** — Ph.D., doctoral student of automated systems preparation and launching of space rockets department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: automation of technological processes, control of technical condition of the automated systems of preparation and launch, development of training tools, robotics. The number of

publications — 48. Atol-77@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 347-95-26.

**Дорожко Игорь Владимирович** — к-т техн. наук, преподаватель кафедры автоматизированных систем подготовки и пуска ракет космического назначения, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА имени А.Ф. Можайского). Область научных интересов: техническая диагностика, надежность, автоматизированные системы управления, байесовские сети доверия, нейронные сети, нечеткая логика, контроль и диагностирование автоматизированных систем управления сложными техническими объектами. Число научных публикаций — 30. Doroghko-Igor@yandex.ru; ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(812) 347-95-26.

**Dorozhko Igor Vladimirovich** — Ph.D., lecturer of automated systems preparation and launching of space rockets department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: control and diagnostics of automated control systems of complex technical objects. The number of publications — 30. Doroghko-Igor@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 347-95-26.

**Басов Олег Олегович** — к-т техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: обработка и кодирование речевых и иконических сигналов, проектирование полимодальных инфокоммуникационных систем. Число научных публикаций — 165. oobasov@mail.ru; Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)549533.

**Basov Oleg Olegovich** — Ph.D., researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: processing and coding of speech and iconic signals, polymodal infocommunicational systems design. The number of publications — 165. oobasov@mail.ru; 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549533.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-08-00696-а).

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grant 16-08-00696-а).

## РЕФЕРАТ

### *Мотиенко А.И., Тарасов А.Г., Дорожко И.В., Басов О.О.* **Проактивное управление робототехническими системами спасения пострадавших.**

Анализ основных тенденций развития робототехнических систем (РТС) показывает, что магистральным направлением является использование их в различных экстремальных ситуациях, что, в частности, относится к проведению аварийно-спасательных работ и ликвидации последствий аварий и катастроф. Применение РТС, оснащенных сенсорными элементами, вычислительными средствами, системами манипуляции и локомоции требует развития новых подходов к управлению данными системами. Перспективным для данного типа систем является реализация проактивного управления, включающего в себя применительно к организационно-техническим объектам как функции целеполагания, планирования, регулирования, так и функции учета и контроля, мониторинга и координации. Внедрение проактивного управления требует разработки комплекса моделей и методик, которые позволяют формировать управление с учетом прогнозирования дальнейшего развития сложившейся ситуации.

В работе предложен комплекс моделей, позволяющий реализовать проактивное управление в РТС спасения пострадавших. Рассмотренный комплекс моделей по результатам оценивания сложившейся обстановки и характеристик РТС спасения пострадавших позволяет сформировать оптимальное управление РТС (минимизируется время проведения работ) для обеспечения необходимых показателей эффективности спасения пострадавших.

## SUMMARY

### *Motienko A.I., Tarasov A.G., Dorozhko I.V., Basov O.O.* **Proactive Control of Robotic Systems for Rescue Operations.**

An analysis of the main trends in the development of robotic systems (RS) shows that the main trend is to use such systems in different extreme situations such as rescue works and liquidation of consequences of accidents and disasters. The use of RS, equipped with sensor elements, computing facilities, systems of manipulation and locomotion requires taking new approaches to such systems management. In this respect, implementation of proactive control appears to be a promising direction. However, it requires designing a complex of models and techniques that help carry out control based on forecasting of the further development of the situation.

In this paper, we propose a complex of models for transportation positions of the victim based on Bayesian networks, which will allow proactive control of RS for rescuing victims. This set of models enables one to carry out the optimal management of RS based on the results of evaluating the existing situation and characteristics of RS, which minimizes the time of rescuing process.

Д.Н. ХАЛИУЛЛИНА  
**ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПРОГРАММНЫЙ  
КОМПЛЕКС ПОДДЕРЖКИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ МАЛЫХ ИННОВАЦИОННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ**

---

*Халиуллина Д.Н.* **Проблемно-ориентированный программный комплекс поддержки стратегического планирования развития малых инновационных предприятий.**

**Аннотация.** В статье описывается программный комплекс, обеспечивающий имитационное моделирование сценариев развития малых инновационных предприятий. Отличительной особенностью представленного решения является возможность определения точек принятия решений о структурных преобразованиях и использование «обратного» прогнозирования для определения исходных условий.

**Ключевые слова:** стратегическое планирование, малое инновационное предприятие, когнитивная карта, имитационная модель.

*Khaliullina D.N.* **A Problem-Oriented Program Complex to Support Strategic Planning of Development of Small Innovative Enterprises.**

**Abstract.** The article describes the program complex that gives an opportunity to simulate scenarios of development of small innovative enterprises. A distinctive feature of the proposed solution is the possibility of defining points for making decisions on structural transformations and the use of "inverse" forecasting for defining initial conditions.

**Keywords:** Strategic planning; Small innovative enterprise; Cognitive map; Simulation model.

---

**1. Введение.** В последнее время обоснованию рациональных управленческих решений в сложных социально-экономических системах уделяется все больше внимания, а эффективность предотвращения или преодоления возникающих кризисов во многом зависит от прогнозирования динамики развития этих систем. Повысить качество управленческих решений при необходимости анализа различных вариантов развития позволяет применение систем поддержки принятия решений.

Малые инновационные предприятия (МИП) — это связующее звено между научно-исследовательскими институтами и крупными промышленными производителями, обладающее собственной спецификой [1]. Так в инновационной сфере они имеют определенные преимущества и способны активно развивать инновационную экономику страны. Поэтому поддержка МИП является приоритетным направлением государственной научно-технической и экономической политики. Такие предприятия часто принимают на себя коммерческие риски при разработке новых продуктов и технологий и выведения их на рынок, что может привести к банкротству. Поэтому одной из целей стратегического управления МИП является выявление потенциальных

проблем и их причин, выработка и принятие комплекса мер по предотвращению или уменьшению негативных последствий, вызванных этими проблемами.

Вопросам стратегического планирования развития предприятий посвящено достаточно много работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Рассмотренные публикации содержат методологические и научные основы классификации стратегий развития [2-5], методические рекомендации по их разработке и определению параметров внешней и внутренней среды, воздействующих на реализацию стратегии [6-9].

С учетом сложности задач стратегического планирования ясно, что разработка «индивидуальных» программных систем, автоматизирующих их решение, — трудоемкий и дорогостоящий процесс, требующий специальных знаний. Поэтому для подавляющего большинства компаний наиболее приемлемым решением является реализация технологий стратегического планирования и управления на основе готовых программных решений (MS Project, Primavera, Project Expert, Альт-Прогноз и др.[10-13]).

Существующие системы стратегического планирования развития предприятия строятся на макроэкономических показателях. Особенностью предлагаемого программного комплекса является формирование описания деятельности МИП в виде математической модели, в которой все задачи и процессы представляются как система взаимосвязанных исчисляемых показателей, а варианты развития исследуются путем имитации с помощью системно-динамической модели.

Предлагаемый программный комплекс обеспечивает поддержку стратегического планирования развития МИП. При этом существует возможность получить прогноз развития предприятия по различным сценариям, а также произвести «обратное» планирование, при котором можно определить исходные условия, обеспечивающее достижение поставленной цели.

**2. Этапы и сценарии планирования.** Если рассматривать предприятие как сложную систему [14], то в его развитии можно выделить периоды роста и периоды кризисов (рисунок 1).



Рис. 1. Фазы развития предприятия [14]

Развитие МИП в первой фазе зависит от возможности выполнения заказов конкретных или немногочисленных клиентов, поэтому финансирование зачастую неустойчиво. Его стартовый капитал небольшой, а структура организации — «плоская» (между руководством и исполнителями работ обычно мало промежуточных уровней управления). Предприятие в данной фазе развития с большой вероятностью достигает предела своих возможностей, если появляются конкуренты, обладающие новыми методами торговли, а также, если руководство пытается решать проблемы прежними методами, которые в возникающих ситуациях не имеют успеха. В связи с этим снижается прибыль, что является одним из признаков кризисного состояния, для выхода из которого необходимо провести реорганизацию предприятия, а именно — изменить структуру его управления.

На втором этапе предприятие переходит в следующую фазу развития (фазу дифференциации). Особенностью данного периода является расширение клиентской базы и рынка сбыта продукции. Дальнейшее развитие возможно при переходе на новый уровень управления (переход в фазу интеграции), в противном случае предприятие может быть разбито на несколько независимых малых предприятий.

Определяющим фактором развития МИП в третьей фазе становится коллектив совместно работающих людей, что позволяет обновить организацию и обеспечить устойчивость функционирования предприятия.

Чтобы корректно описать весь процесс развития предприятия, необходимо разработать несколько моделей, каждая из которых будет представлять поведение этого предприятия на определенной стадии развития. Переход между фазами связан с различными структурными изменениями, основными из которых являются введение многоуровневой структуры управления предприятием и организация территориально распределенного производства.

Автором предлагается двухэтапная технология поддержки стратегического планирования развития МИП [15-17].

*Первый этап.* Основной задачей первого этапа планирования является определение с помощью имитационного моделирования момента принятия решения (в данном случае — о введении новой структуры управления) для вывода организации из кризиса [15, 16]. Многократные «прогоны» имитационной модели при варьировании задаваемых экспертом внешних условий и значений параметров предприятия позволяют определить «пределы роста» предприятия на каждой фазе его развития. Прогноз последствий принятия/не принятия/не своевременного принятия решения формируется в ходе пошаговой имитации вариантов развития (рисунок 2).



Рис. 2. Выбор варианта развития предприятия ( $\bar{V}_A$  — конец  $i$ -ой фазы,  $\bar{V}_B$  — начало  $(i+1)$ -ой фазы,  $t_2$  — нижняя граница времени области принятия решения,  $\bar{t}_2$  — верхняя граница времени области принятия решения,  $t_{sol}$  — время момента принятия решения)

Для выбора варианта развития необходимо произвести расчет критериев  $Kr_i$  для каждого имитируемого сценария в соответствии с заданными предпочтениями по набору показателей, которые характеризуют эффективное управление МИП [17, 18]:

$$Kr_i = k1_i * Sp_i + k2_i * Nm_i - k3_i * t_{max_i}, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $Sp_i$  — площадь фигуры, полученной при одном прогоне модели, имитирующим  $i$ -й сценарий;  $Nm_i$  — значение максимального дохода предприятия для  $i$ -го сценария;  $t_{max_i}$  — значение времени достижения максимального дохода предприятия  $Nm_i$  при этом

сценарии;  $n$  — количество рассмотренных сценариев;  $k1_i$  — суммарное значение балансовой наличности предприятия на определенный момент времени  $t$ ;  $k2_i$  — максимальное значение балансовой наличности предприятия на определенный момент времени  $t$ ;  $k3_i$  — время достижения максимального значения балансовой наличности предприятия.

Предпочтительный сценарий развития МИП определяется в результате решения задачи максимизации критериев:

$$Krit = \{Kr_1, Kr_2, \dots, Kr_{n-1}, Kr_n\} \rightarrow \max, i = \overline{1, n},$$

где  $Kr_i$  — значение критерия для  $i$ -го сценария развития предприятия;  $n$  — количество рассмотренных вариантов;  $i$  — номер варианта.

Варьирование структуры предприятия и многократное проведение имитационных экспериментов с шагом  $\Delta t$  позволяют получить различные варианты перехода предприятия в следующую фазу. Для каждого моделируемого варианта выделяется область принятия решения, а в ней — точка принятия решения. Сравнительный анализ полученных результатов позволяет определить вариант развития с оптимальными по используемому критерию точками принятия решений по реорганизации структуры управления.

Итерационное применение описанной процедуры к последовательности фаз развития МИП позволяет получить конечный вариант развития с выделением на траектории развития оптимальных точек принятия решений по реорганизации структуры управления.

*Второй этап.* На втором этапе решается задача обратного прогнозирования. Основная цель этапа — получив прогноз возможности МИП, достигнуть заданное целевое состояние (рисунок 3).

Суть этапа состоит в получении сценария развития предприятия по установленным предпочтениям достижения целевого (конечного) состояния на определенный момент времени  $t$  [19]. При этом для каждой фазы развития проводится поиск новых начальных состояний. Основным «инструментом» достижения поставленной цели является инвестирование.

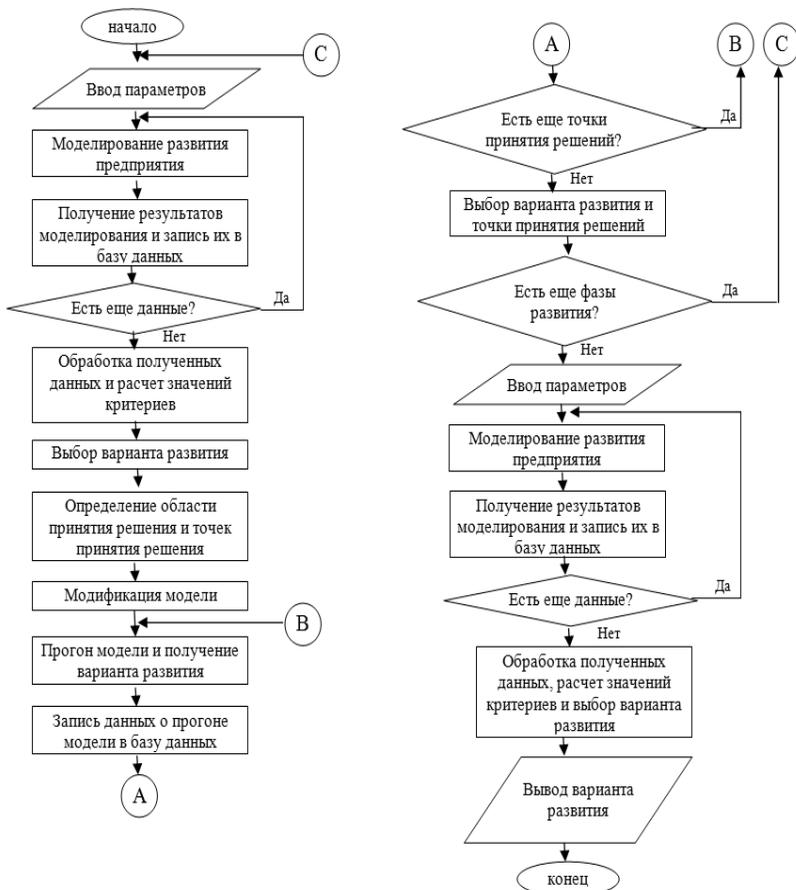


Рис.3. Блок-схема применения технологии поддержки стратегического планирования

Для определения оптимального (по Беллману) значения инвестиций, необходимых предприятию, система состояний представляется конечным взвешенным ориентированным графом  $Gr(B)$ , вершины которого взаимно однозначно соответствуют состояниям системы ( $x_i$ ), дуги — управлениям ( $u_i$ ), веса дуг — стоимостям соответствующих переходов.

Вершины графа  $Gr(B)$  нумеруются целыми неотрицательными числами. Для каждой дуги задается вес  $w_i(x_i, u_i)$ , который равен

разности суммарного дохода предприятия в данной фазе развития и инвестиций, вложенных в данное предприятие.

$$w_i = \text{Sum}C_i - \text{fond}_i, \\ \text{Sum}C_i > 0, \text{fond}_i \geq 0, i = \overline{1, n},$$

где  $w_i$  — весовая функция;  $\text{Sum}C_i$  — суммарное значение балансовой наличности предприятия в  $i$ -м имитационном эксперименте;  $\text{fond}_i$  — соответствующие инвестиции, вложенные в данное предприятие.

Для нахождения оптимальной траектории развития предприятия, обеспечивающей достижение целевого состояния, производится подсчет значений функции Беллмана в графе  $Gr(B)$  для каждой промежуточной вершины, и выделяются дуги, которые обращают эту вершину в максимум. Определение оптимальной траектории системы позволяет получить искомый вариант развития предприятия.

По представленной схеме сценарии строятся в «обратном» направлении от конечного целевого состояния до начала первой фазы. Для каждой фазы развития предприятия производится выбор управлений для всех допустимых начальных состояний, которые могут возникнуть в результате предыдущих шагов. По достижении начального состояния системы формируется сценарий развития предприятия, приводящий к целевому состоянию, в «прямом» направлении. В результате применения данной процедуры получаем начальные условия и сценарий развития предприятия, при котором достигается целевое состояние.

### **3. Выбор средств реализации программного комплекса.**

Сложность принятия решений в сфере управления МИП обусловлена как многоаспектностью и взаимосвязанностью происходящих процессов (экономических, социальных и т.п.), так и недостатком количественной информации о динамике этих процессов. Это вынуждает переходить к качественному анализу процессов.

В силу указанных особенностей такие системы относятся к классу слабоструктурированных [20]. Одним из направлений современной теории поддержки и принятия решений при исследовании управления слабоструктурированными системами является когнитивное моделирование [21-24].

*Когнитивное моделирование.* На начальном этапе формализации используется когнитивная карта ситуации (векторный функциональный граф), которая получается путем структуризации знаний эксперта (экспертов) о предметной области на основе теоретических представлений, статистических данных, применения

различных экспертных методов [25]. Формально граф задается в виде кортежа  $\langle G, X, F \rangle$ , в котором:

$$\begin{aligned} G &= \langle V, E \rangle, \quad V = \{v_i \mid v_i \in V, i = 1, 2, \dots, k\}, \\ E &= \{e_i \mid e_i \in E, i = 1, 2, \dots, k\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $G$  — ориентированный граф (когнитивная карта),  $V$  — множество вершин («концептов»), — множество дуг.

Вершины  $V_i \in V, i = 1, 2, \dots, k$  представляют элементы изучаемой системы.

Дуги  $e_{ij} \in E, (i, j = 1, 2, \dots, N)$  отражают взаимосвязь между вершинами  $V_i$  и  $V_j$ . Причем влияние  $V_i$  на  $V_j$  в изучаемой ситуации может быть положительным ((знак «+» над дугой), если увеличение/уменьшение одного фактора приводит к увеличению/уменьшению другого или отрицательным (знак «-» над дугой), если увеличение/уменьшение одного фактора приводит к уменьшению/увеличению другого) либо отсутствовать.

$$X = \{X^{(v_i)} \mid X^{(v_i)} \in X, i = 1, 2, \dots, k\}, \quad (2)$$

где  $X$  — множество параметров вершин.

В общем случае:

$$X^{(v_i)} = \{x_g^{(i)}\}, \quad g = 1, 2, \dots, n_i,$$

т.е. каждой вершине ставится в соответствие вектор независимых друг от друга параметров (либо один параметр, если  $g = 1$ , то  $x_g^{(i)} = x_i$ ).

Применительно к рассматриваемому случаю, параметр будет один, отвечающий за численное значение элементов карты.

$$F = F(X, E) = F(x_i, x_j, e_{ij}), \quad (3)$$

где  $F$  — функционал преобразования дуг, ставящий в соответствие каждой дуге знак («+», «-»).

$$F(X, E) = \begin{cases} +1, & \text{если рост (падение) } x_i \\ & \text{влечет за собой рост (падение) } x_j \\ -1, & \text{если рост (падение) } x_i \\ & \text{влечет за собой падение (рост) } x_j \end{cases}, \quad i, j = 1, 2, \dots, k.$$

При положительной связи увеличение значения фактора-причины приводит к увеличению значения фактора-следствия, а при отрицательной связи увеличение значения фактора-причины приводит к уменьшению значения фактора-следствия.

Исходная когнитивная карта МИП представлена на рисунке 4.

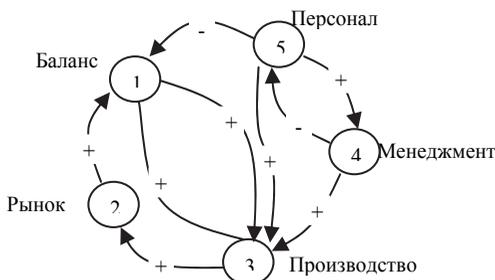


Рис. 4. Исходная когнитивная карта МИП

Представленная когнитивная карта содержит основные факторы МИП.

*Системно-динамическое моделирование.* Имитационное моделирование на основе системной динамики [26] является эффективным и довольно универсальным вариантом компьютерного моделирования в области исследования и управления сложными системами, поскольку позволяет решать задачи высокой сложности, обеспечивает имитацию как комбинаторно, так и структурно сложных процессов.

Переход к от когнитивной карты к системно-динамической (СД) модели в общем случае может быть довольно сложной задачей. Автором разработана формальная схема и правила отображения когнитивной карты на структуру системно-динамической модели. В системах динамического моделирования, в частности AnyLogic [27], элементы формального представления задаются следующим набором множеств:  $\{S, Fl, Var, C, R\}$ , где  $S$  — множество накопителей,  $Fl$  — множество потоков,  $Var$  — множество переменных,  $C$  — множество констант,  $R$  — множество информационных связей. При формировании системно-динамической модели необходимо обеспечить адекватное отображение элементов когнитивной карты на элементы СД-модели. Узлы исходной когнитивной карты  $V_i^0$  отражают обобщенные понятия реального мира, которым соответствует некоторый определяемый количественно объем

определенных ресурсов. Поэтому в системно-динамической модели они будут представлять собой предполагаемые накопители:  $V^0 \rightarrow S$ .

Динамика значений накопителей определяется в СД-модели входящими в них и исходящими из них потоками. Достаточно очевидным представляется отобразить каждую связь исходной когнитивной карты (ИКК)  $e_{i,j}^0$  на соответствующие потоки  $Fl^+$  и  $Fl^-$ .

Дальнейший анализ предметной области дает представление о новых факторах, которые могут выступать в качестве «регуляторов» потоков. В когнитивной карте они будут представлены вершинами следующего уровня:  $V_i^{1+}, V_i^{1-}$ . Однако количественные характеристики самих «регуляторов» потоков, как правило, зависят от определенных факторов, не учтенных в ИКК. Включение этих факторов в когнитивную карту приводит к появлению в ней дополнительных вершин и связей.

При этом необходимо учитывать, что на будущие потоки могут влиять как новые переменные, так и существующие потоки, а также рассмотренные ранее накопители:

1. Если имеющийся поток относится к нескольким накопителям, то преобразование примет вид:  $e_{i,j}^0 \rightarrow V_{i,j}^1, e_{i,(i,j)}^1, e_{(i,j),j}^1$ . При этом  $(e_{i,(i,j)}^1, V_{i,j}^1) \rightarrow (e_{i,(i,j)}^1, V_i^{1-}) \rightarrow F_i^-$ , а  $(V_{i,j}^1, e_{(i,j),j}^1) \rightarrow (V_i^{1+}, e_{(i,j),j}^1) \rightarrow F_i^+$ .

2. Если на поток влияют другие потоки через информационные связи:  $e_{i,j}^1 \rightarrow R_{i,j}^1$ .

3. Если на поток влияют факторы, не относящиеся ни к потокам, ни к накопителям, определенным ранее, возможны два случая:

а.  $V_i^2 \rightarrow Var$ , если рассматриваемый фактор будет переменным;

б.  $V_i^2 \rightarrow C$ , если значение рассматриваемого фактора постоянно в рамках рассматриваемого сценария.

В ходе дальнейшего анализа может возникнуть ситуация, когда изначально рассматриваемая вершина ИКК, отнесенная к накопителям, не имеет входных и выходных потоков в СД-модели. В данном случае, эта вершина преобразуется в переменную:  $V_i^0 \rightarrow Var$ . Оставшиеся в когнитивной карте дуги преобразуются в информационные связи:  $e_{i,j}^k \rightarrow R_{i,j}^{k+1}$ .

Анализ экспертных данных и информации из литературных источников [28, 29] позволил определить вид зависимостей между

элементами разрабатываемой СД-модели. Некоторые из них представлены ниже:

*Staff* — численность персонала.

$$d(\text{Staff})/dt = \text{StaffChoice} - \text{Discharge} ,$$

где *StaffChoice* — интенсивность прироста кадров; *Discharge* — интенсивность увольнения кадров.

*EnterprBalance* — балансовая наличность предприятия.

$$d(\text{EnterprBalance})dt = \text{Income} - \text{TotalExpend} ,$$

где *Income* — доход предприятия; *TotalExpend* — общие расходы.

*MinPrice* — минимальная цена.

$$\text{Min Price} = \text{Outlay1 Article} \cdot \text{GainCoef} ,$$

где *Outlay1Article* — затраты на 1 изделие; *GainCoef* — коэффициент выгоды.

*Sold* — доход с продаж.

$$\text{Sold} = \text{Min Price} \cdot \text{Quantity} ,$$

где *MinPrice* — минимальная цена, *Quantity* — количество произведенной продукции.

*TotalWages* — общая заработная плата.

$$\text{TotalWages} = \text{Wages} \cdot \text{Staff} ,$$

где *Wages* — средняя заработная плата; *Staff* — численность персонала.

Общий вид разработанной модели AnyLogic представлен на рисунке 5.

*Организация хранения данных.* В разработанной версии комплекса программных средств для хранения данных использована СУБД Microsoft Access. Таблицы в базе разделены по своей функциональности на следующие группы:

1. Таблицы когнитивной карты.
2. Таблицы системно-динамической модели.
3. Таблицы хранения данных вычислительного эксперимента (начальные условия, промежуточные и конечные результаты).

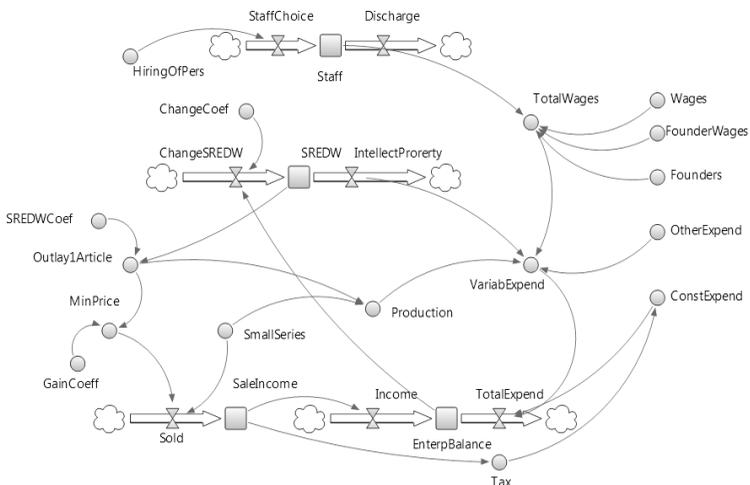


Рис. 5. Системно-динамическая модель инновационного предприятия

Описание когнитивной карты хранится в двух таблицах, одна из которых содержит описание вершин, а вторая — связей (идентификаторы дуг, их направление и тип связи: положительная или отрицательная).

Таблицы описания структуры системно-динамической модели представлены справочниками по каждому множеству СД-модели ("Накопители", "Потоки", "Переменные", "Константы"), а также таблицами взаимодействия перечисленных элементов ("Накопитель-Поток", "Переменная-Поток", "Переменная-Переменная", "Константа-Переменная", "Накопитель-Переменная") (рисунок 6).



Рис. 6. Связи таблиц системно-динамической модели

Связи между таблицами, хранящими когнитивную карту и компоненты системно-динамической модели, в явном виде в базе данных не хранятся. Они формируются процедурно в соответствии с рассмотренными ранее правилами отображения.

Хранение данных для организации поддержки стратегического планирования организовано с помощью следующих таблиц:

1. «Прогнозы» — содержит информацию о балансовой наличности предприятия за весь период моделирования для каждого из варианта развития.

2. «ТочкиПринятияРешения» — в данную таблицу заносятся сведения о точках, из которых необходимо будет выбрать точку принятия решения.

3. «Выбрано» — хранит данные о времени принятия решения.

Для связи СД-модели с базой данных в среде AnyLogic используется стандартный компонент *baza* [27], реализующий функции соединения с базой данных, чтения и записи данных.

*Средства формирования структуры моделей и управления процессами целевой обработки.* Инструменты формирования моделей и управления вычислительным экспериментом реализованы средствами Borland C++Builder 6.

Структура когнитивной карты создается с помощью специализированного графического редактора, который также реализует процедуры отображения ее элементов на компоненты СД-модели. В процессе формирования когнитивной карты с помощью разработанного редактора строится граф  $G$ . Для каждой  $V_i$  определяется номер, имя и уровень детализации, значение которого для всех вершин ИКК на начальном этапе равно «0». Для работы с когнитивной картой редактором реализуются следующие группы основных операций:

- Создать / сохранить / загрузить когнитивную карту.
- Создать / удалить / выделить / редактировать характеристики вершины.
- Создать / удалить / выделить / перенаправить / разорвать связь.

В результате операции разрыва связи, по сути, осуществляется замена одной связи  $e_{i,j}^k$  между существующими вершинами  $V_i^k$  и  $V_j^k$  комбинацией из трех элементов: «связь-вершина-связь» ( $e_{i,j}^k \rightarrow V_{i,j}^{k+1}, e_{i,(i,j)}^{k+1}, e_{(i,j),j}^{k+1}$ ).

С каждым элементом графического изображения когнитивной карты ассоциирован соответствующий фрагмент СД-модели, вид которого определяется на основе анализа описанных выше правил отображения.

Операция сохранения модели осуществляет запись в базу данных информации о структуре как когнитивной карты, так и

соответствующей СД-модели. Сохраненное описание структуры СД-модели используется для автоматизированного синтеза непараметризованной СД-модели в среде AnyLogic.

Разработанный модуль принятия решений реализует представленные выше этапы стратегического планирования и включает в себя два блока:

- Блок анализа критериев, который позволяет выбрать время для реорганизации предприятия, рассчитать значения критериев и выбрать варианта развития. Применяется на первом этапе стратегического планирования.

- Блок расчета и анализа функций инвестирования. Для нахождения оптимального варианта развития предприятия в данном блоке применяется метод динамического программирования. Применяется на втором этапе стратегического планирования.

**4. Структура программного комплекса.** Основные компоненты разрабатываемого программного комплекса и взаимодействие между ними схематически показаны на рисунке 7.

При создании любой программной системы необходимо определить требования, которым она должна удовлетворять.

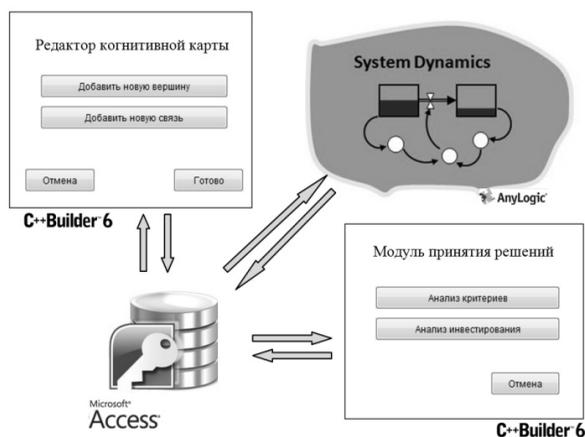


Рис.7. Структура программного комплекса

Функциональность создаваемого программного комплекса представлена на диаграмме вариантов использования (прецедентов) (рисунок 8).

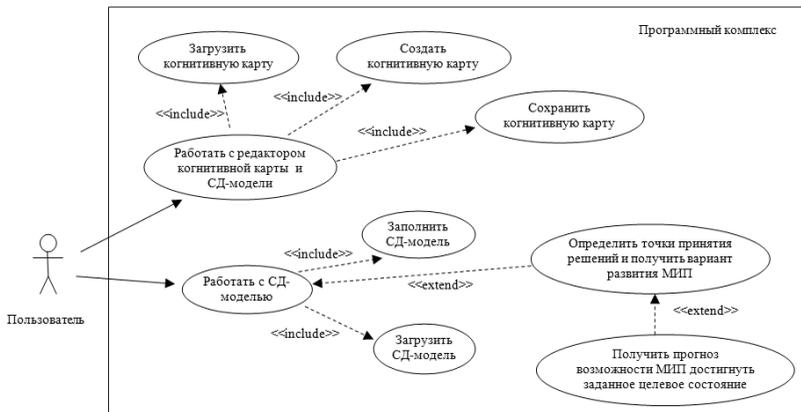


Рис. 8. Диаграмма сценариев использования программного комплекса

Данная диаграмма состоит из акторов, вариантов использования и отношений между ними. При этом актором называется любой объект, субъект или система, взаимодействующая с моделируемой системой извне. Это может быть человек, техническое устройство или другая система, которая может служить источником воздействия на разрабатываемую систему. В свою очередь, вариант использования определяет некоторый набор действий, совершаемых программным комплексом.

Разрабатываемый комплекс должен обеспечивать возможность выполнения следующих функций:

- Поддержка формирования и хранения структуры когнитивной карты. Вводятся концепты, а также их связи.
- Синтез структуры системно-динамической модели МИП на основе когнитивной карты. По разработанным правилам производится отображение элементов когнитивной карты на компоненты системно-динамической модели.
- Настройка на предметную область и настройка входных параметров. На начальном этапе комплекс настраивается на конкретное предприятие — вводятся начальные значения входных параметров.
- Обработка введенных данных и моделирование развития предприятия. С помощью системно-динамической модели многократно проводятся сеансы имитации вариантов развития предприятия для различных входных параметров, задаваемых экспертом. Также осуществляется запись полученных результатов в базу данных.

- Выбор варианта развития предприятия в соответствии с заданным критерием. Анализ данных, хранимых в базе, позволяет вычислить значения различных критериев для каждого варианта развития, в результате обработки которых можно определить наилучший вариант.

- Установка целевого состояния. Устанавливается целевое состояние (численное значение балансовой наличности предприятия), состояние, к которому необходимо привести предприятие на установленный момент времени.

- Управление инвестициями и получение новых значений промежуточных целевых состояний. Проводится прогон имитационной модели с учетом инвестирования на каждом этапе развития, в результате чего начальные состояния каждой фазы будут представлять собой набор значений промежуточных состояний, по которым можно построить граф состояний. По полученным данным определяем оптимальный вариант развития предприятия, при котором достигается целевое состояние.

**5. Пример использования программного комплекса.** В качестве примера рассмотрено применение разработанного программного комплекса для управления предприятием, реализующим инновационную технологию производства перламутрового пигмента. Используемые данные относятся к 2013 году.

Для реализации технологии производства перламутрового пигмента в промышленном масштабе реализуется следующее:

- Создание пилотной установки для оптимизации параметров технологии, режимов работы оборудования и для наработки опытных образцов продукта с дальнейшим испытанием их в специализированных организациях.

- Создание промышленной установки мощностью не менее 100 т продукта в год с корректировкой этой величины в ходе маркетинговых исследований, которые будут проводиться параллельно испытаниям опытных партий.

Пилотная установка будет работать в периодическом режиме в течение не более 5-8 месяцев, а с учетом подбора и изготовления оборудования, его монтажа и вывода на стабильные показатели работы — 1,5-2 года. Общая производительность установки 1-1,5 т перламутрового пигмента в месяц.

При этом затраты на создание пилотной установки составят 13 млн. руб. С учетом работы установки в среднем в течение 1 года затраты составят примерно 1 млн. руб. Планируемая средневзвешенная цена от реализации продукции составит примерно

300 тыс. руб./т. Планируемые объемы производства: за первый год — 50 тонн, за второй год — 100 тонн.

Первый этап планирования здесь подробно рассматриваться не будет; все внимание будет уделено второму этапу — получить прогноз возможности МИП достигнуть заданное целевое состояние.

Основные входные данные для работы программного комплекса принимают следующие значения:

1. Средняя заработная плата (40 тыс. руб.).
2. Затраты на сырье, материалы и электроэнергию (300 тыс. руб.).
3. Начальный капитал (50 млн. руб.).
4. Персонал (23 чел.).
5. Затраты на 1 тонну изделия (300 тыс. руб.).

В качестве целевого состояния было задано значение балансовой наличности предприятия в размере 73 млн. руб. Применение технологии производилось с третьей фазы развития, при этом для определения времени инвестирования было наложено ограничение на объем инвестиций (не более 15 млн. руб.), шаг инвестирования 1 млн. руб.

Работа с моделью позволила получить новые начальные значения для каждой фазы. Эту систему состояний представляем ориентированным графом, вершины которого взаимно однозначно соответствуют состояниям системы, дуги — управлениям, веса дуг — стоимостям соответствующих переходов (здесь вес дуги определяется по разности суммарного дохода предприятия в данной фазе развития и инвестиций, вложенных в данное предприятие).

Распределение весовых коэффициентов для каждой фазы, рассчитанное по приведенной выше формуле, отражено в таблице 2.

Таблица 2. Распределение весовых коэффициентов

Переход	Весовые коэффициенты	Переход	Весовые коэффициенты	Переход	Весовые коэффициенты
$x_0 \rightarrow x_1$	$w_{0,1} = 0$	$x_3 \rightarrow x_4$	$w_{3,4} = 48$	$x_6 \rightarrow x_{11}$	$w_{6,11} = 39$
$x_0 \rightarrow x_2$	$w_{0,2} = 0$	$x_3 \rightarrow x_7$	$w_{3,7} = 53$	$x_7 \rightarrow x_{10}$	$w_{7,10} = 42$
$x_0 \rightarrow x_3$	$w_{0,3} = 0$	$x_4 \rightarrow x_8$	$w_{4,8} = 44$	$x_8 \rightarrow x_{кон.}$	$w_{8,кон.} = 51$
$x_1 \rightarrow x_4$	$w_{1,4} = 45$	$x_5 \rightarrow x_9$	$w_{5,9} = 50$	$x_9 \rightarrow x_{кон.}$	$w_{9,кон.} = 48$
$x_1 \rightarrow x_5$	$w_{1,5} = 30$	$x_5 \rightarrow x_{10}$	$w_{5,10} = 36$	$x_{10} \rightarrow x_{кон.}$	$w_{10,кон.} = 46$
$x_2 \rightarrow x_6$	$w_{2,6} = 47$	$x_6 \rightarrow x_9$	$w_{6,9} = 40$	$x_{11} \rightarrow x_{кон.}$	$w_{11,кон.} = 39$

В результате подсчета значений функции Беллмана для каждой промежуточной вершины и проведения синтеза оптимальной

траектории системы был получен оптимальный вариант развития предприятия (с наибольшей отдачей при низком инвестировании).

Анализ данных позволяет определить значения входных параметров на каждом этапе развития предприятия, а также размер капиталовложений и время инвестирования. Оптимальный вариант развития отражает необходимость вложения дополнительных средств в размере 14 млн. руб. (переход на графе  $x_0 \rightarrow x_3$ ). На следующем этапе (переход  $x_3 \rightarrow x_4$ ) необходимо ввести 10 млн. руб. через 6 мес. работы предприятия, при этом значение затрат на заработную плату и интеллектуальную собственность принимают минимальное значение, а цена на 1 изделие — максимальное. Граф оптимального управления отражает следующий переход  $x_4 \rightarrow x_8$  с весовым коэффициентом  $w_{4,8} = 44$ , при этом значение затрат на заработную плату принимает минимальное значение, а цена на 1 изделие и затраты на интеллектуальную собственность — максимальное. Инвестирование на данном этапе производится через 10 мес. в размере 12 млн. На заключительном этапе (достижение целевого состояния) происходит переход  $x_8 \rightarrow x_{\max}$ , при этом все входные параметры принимают максимальное значение, а инвестирование в размере 14 млн. производится через 8 мес.

**6. Заключение.** Разработанный проблемно-ориентированный программный комплекс поддержки стратегического планирования развития МИП является инструментом для повышения эффективности работы предприятия, обеспечивая реализацию технологии поддержки принятия решений по управлению развитием малого инновационного предприятия. Его использование позволяет провести анализ вариантов развития предприятия, выявить критические точки, требующие принятия управленческих решений в области организации функционирования МИП, а также путем обратного прогнозирования определить начальные условия и траекторию развития МИП, обеспечивающие достижение поставленных целей.

## Литература

1. Коваленко Г., Пономаренко А., Семенцева Г. Российские предприниматели в инновационном бизнесе // РЭЖ. 1997. № 4. С. 110–112.
2. Schoemaker P. Multiple Scenario Development: its conceptual and behavioral foundation // Strategic Management Journal. 1993. vol. 14. № 3. pp. 193–213.
3. Ансофф И. Новая корпоративная стратегия. СПб.: Питер Ком, 1999. 416 с.
4. Lindgren M., Bandhold H. Scenario Planning: The Link between Future and Strategy // Palgrave Macmillan, 2009. 216 p.
5. Облой К. Стратегия предприятия: в поисках устойчивого конкурентного преимущества // Минск: Гривцов Букс, 2013. 384 с.
6. Грюниг Р. Методы и средства стратегического планирования на фирме // Проблемы теории и практики управления. 1993. № 3. С.53–57.

7. *Винакуров В.В.* Организация стратегического управления на предприятии // М. Центр экономики и маркетинга, 1996. 160 с.
8. *Кныш В.А., Федорова Ю.С.* Стратегическое управление малыми инновационными предприятиями, созданными при университете для внедрения результатов интеллектуальной деятельности // Записки Горного Института. Геоэкономика и менеджмент. СПб. 2012. № 197. С. 113–117.
9. *Лукин Л.Н.* Разработка стратегии развития предприятия на основе принципов системного подхода // Проблемы и перспективы развития экономики и менеджмента в России и за рубежом: Материалы Шестой международной научно-практической конференции. 2014. С. 403–408.
10. Официальный сайт продукта MS Project. URL: <https://products.office.com/ru-ru/Project/project-pro-for-office-365> (дата обращения 15.04.2016).
11. Официальный сайт компании Expert Systems. URL: <https://www.expert-systems.com/financial/pe> (дата обращения 15.04.2016).
12. Официальный сайт компании Alt-invest. URL: <http://www.alt-invest.ru/index.php/ru/programmy/opisaniya/alt-prognoz> (дата обращения 15.04.2016).
13. Официальный сайт компании Oracle. URL: <https://www.oracle.com/applications/primavera/index.html> (дата обращения 15.04.2016).
14. *Путилов В.А., Горохов А.В.* Системная динамика регионального развития // М. Мурманск.: НИЦ «Пазори», 2002. 303 с.
15. *Горохов А.В., Абальмова Д.Н.* Simulation-based management of development for industrial enterprise // Journal of International Scientific Publication: Economy & Business. 2009. vol 3, part 2. pp. 44–54.
16. *Маслобоев А.В., Халиуллина Д.Н.* Технология и инструментальная система информационной поддержки стратегического планирования развития малого научно-инновационного предприятия // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. 2011. Вып. 14. №3. С. 611–620.
17. *Бланк И.А.* Антикризисное финансовое управление предприятием // Киев: Эльга, 2006. 117 с.
18. *Каплан Р.С., Нортон Д.П.* Сбалансированная система показателей // От стратегии к действию: пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2014. 314 с.
19. *Халиуллина Д.Н.* Технология управления финансовыми вложениями в инновационном предприятии // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. 2012. Вып. 3. С. 202–206.
20. *Максимов В.И., Корноушенко Е.К.* Аналитические основы применения когнитивного подхода при решении слабоструктурированных задач // Труды ИПУ РАН. 1999. Т.2. М.: ИПУ РАН. С. 95–109.
21. *Кулинич А.А., Титова Н.В.* Интеграция нечетких моделей динамики и оценивания ситуаций // Тр. 5-й междунар. конф. “Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций” (CASC’2005). 2005. С. 107–126.
22. *Кульба В.В., Кононов Д.А., Косяченко С.А., Шубин А.Н.* Методы формирования сценариев развития социально-экономических систем // М.: СИНТЕГ, 2004. 296 с.
23. *Kosko B.* Fuzzy cognitive maps // International Journal of Man-Machine Studies. 1986. vol. 1. pp. 65–75.
24. *Axelrod R.* Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites // Princeton: Princeton University Press, 1976. 405 p.
25. *Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Гинис Л.А.* Когнитивный анализ и моделирование устойчивого развития социально-экономических систем // Ростов-на-Дону.: Изд-во Рост. ун-та, 2005. 288 с.
26. *Форрестер Д.* Мировая динамика // М.: АСТ, 2006. 379 с.
27. Официальный сайт компании AnyLogic. URL: <http://www.anylogic.com> (дата обращения 15.04.2016)

28. Кустерева Е.В. Справочник экономиста по ценообразованию // Профессиональное издательство. 2008. 136 с.
29. Бочаров В.В. Комплексный финансовый анализ // СПб.: Питер, 2005. 432 с.

## References

1. Kovalenko G., Ponomarenko A., Sementseva G. [Russian entrepreneurs in innovative business]. *Rossijskij jekonomicheskij zhurnal – Russian Economic Journal*. 1997. no. 4. pp. 110–112. (In Russ.).
2. Schoemaker P. Multiple Scenario Development: its conceptual and behavioral foundation. *Strategic Management Journal*. 1993. vol. 14. no. 3. pp. 193–213. (In Russ.).
3. Ansoff I. *Novaja korporativnaja strategija* [The new corporate strategy]. Spb.: Piter-Kom, 1999. 416 p. (In Russ.).
4. Lindgren M., Bandhold H. *Scenario Planning: The Link between Future and Strategy*. Palgrave Macmillan, 2009. 216 p.
5. Obloj K. *Strategija predpriyatija: v poiskah ustojchivogo konkurentnogo preimushhestva* [Enterprise strategy: in search of a sustainable competitive advantage]. Minsk: Grivcov Buks, 2013. 384 p. (In Russ.).
6. Grunig R. [Methods and tools for strategic planning at the company]. *Problemy teorii i praktiki upravlenija – Problems of the theory and practice of management*. 1993. no. 3. pp. 53–57. (In Russ.).
7. Vinakurov V.V. *Organizacija strategicheskogo upravlenija na predpriyatii* [Organization of strategic management in the enterprise]. M.: Centr jekonomiki i marketinga Publ., 1996. 160 p. (In Russ.).
8. Knysh V.A., Fedorova Ju.S. [Strategic management of the small innovative enterprises created at university for introduction of results of intellectual activity]. *Zapiski Gornogo Instituta. Geojekonomika i menedzhment – Notes of Mining Institute Geoeconomy and management*. SPb, 2012. no. 197. pp. 113–117. (In Russ.).
9. Lukin L.N. *Razrabotka strategii razvitija predpriyatija na osnove principov sistemnogo podhoda* [Development of strategy of the enterprise development on the basis of the system approach principles]. *Problemy i perspektivy razvitija jekonomiki i menedzhmenta v Rossii i za rubezhom: Materialy Shestoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Problem and prospect of development of economy and management in Russia and abroad: Collected papers]. 2014. pp. 403–408. (In Russ.).
10. Oficial'nyj sajt produkta MS Project [Official web site of MS Project]. Available at: <https://products.office.com/ru-ru/Project/project-pro-for-office-365>. (In Russ.).
11. Oficial'nyj sajt kompanii Expert Systems [Official web site of company Expert Systems]. Available at: <https://www.expert-systems.com/financial/pe>. (In Russ.).
12. Oficial'nyj sajt kompanii Alt-invest [Official web site of company Alt-invest]. Available at: <http://www.alt-invest.ru/index.php/ru/programmy/opisaniya/alt-prognoz>. (In Russ.).
13. Oficial'nyj sajt kompanii Oracle [Official web site of company Oracle]. Available at: <https://www.oracle.com/applications/primavera/index.html>. (In Russ.).
14. Putilov V.A., Gorokhov A.V. *Sistemnaja dinamika regional'nogo razvitija* [System dynamics of regional development]. M. Murmansk: SPC «Pazori», 2002. 303 p. (In Russ.).
15. Gorokhov A.V., Abalymova D.N. Simulation-based management of development for industrial enterprise. *Journal of International Scientific Publication: Economy & Business*. 2009. vol. 3. part 2. pp. 44–54.
16. Masloboev A.V., Khaliullina D.N. [Technology and instrumental system for information support of strategic planning of development of small research innovative enterprise]. *Vestnik MGTU: Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta – Vestnik MSTU: Proceedings of the Murmansk State Technical University*. 2011. vol. 14. no. 3. pp. 611–620. (In Russ.).

17. Blank I.A. *Antikrizisnoe finansovoe upravlenie predpriyatiem* [Crisis financial management by the enterprise]. Kiev: Jel'ga, 2006. 117 p. (In Russ.).
18. Kaplan R.S., Norton D.P. The balanced scorecard — Measures that drive performance. *Harvard Business Review*. 1992. vol. 70. no. 1. pp. 71–79. (Russ. ed.: Kaplan R.S., Norton D.P. *Balanced system of indicators. From strategy to action*. M., Olimp-Biznes. 2014. 314 p.)
19. Khaliullina D.N. [Technology for management of investments in an innovative enterprise]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Informacionnyye tehnologii. – Proceedings of the Kola Science Centre of RAS. Information Technology*. 2012. no. 3. pp. 202–206. (In Russ.).
20. Maksimov V.I., Kornoushenko E.K. [The analytical basis for the use of the cognitive approach in solving semistructured tasks]. *Trudy IPU RAN – Proceedings of ISC RAS*. 1999. vol. 2. pp. 95–109. (In Russ.).
21. Kulinich A.A., Titova N.V. [The integration of fuzzy models of the dynamics and evaluation situations]. *Tr. 5-j mezhdunar. konf. "Kognitivnyy analiz i upravlenie razvitiem situacij" (CASC'2005)* [Proceedings of the 5th Intern. Conf. "Cognitive analysis and development management situations" (CASC'2005)]. 2005. pp. 107–126. (In Russ.).
22. Kul'ba V.V., Kononov D.A., Kosjachenko S.A., Shubin A.N. *Metody formirovaniya scenariy razvitiya social'no-jekonomicheskikh sistem* [Methods of formation scenarios of socio-economic systems]. M.: SINTEG, 2004. 296 p. (In Russ.).
23. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1986. vol. 1. pp. 65–75.
24. Axelrod R. Structure of Decision. The Cognitive Maps of Political Elites. Ed. by R. Axelrod. Princeton: Princeton University Press, 1976. 405 p.
25. Gorelova G.V., Zaharova E.N., Ginis L.A. *Kognitivnyy analiz i modelirovanie ustojchivogo razvitiya social'no-jekonomicheskikh sistem* [Cognitive analysis and modeling of sustainable socio-economic systems]. Rostov-on-Don: Publishing House of the Rostov University Press, 2005. 288 p. (In Russ.).
26. Forrester D. World dynamics. Wright-Allen Press, 1971. 142 p. (Russ. ed.: Forrester D. *Mirovaya dinamika*. M.: AST, 2006. 384 p.)
27. Official'nyj sajt kompanii AnyLogic [Official web site of company AnyLogic]. Available at: <http://www.anylogic.com>. (In Russ.).
28. Kistereva E.V. *Spravochnik jekonomista po cenoobrazovaniju* [Directory of economist for price forming]. Professional publishing, 2008. 136 p. (In Russ.).
29. Bocharov V.V. *Kompleksnyj finansovyj analiz* [Comprehensive Financial Analysis]. Spb.: Piter, 2005. 432 p. (In Russ.).

**Халиуллина Дарья Николаевна** — младший научный сотрудник лаборатории информационных технологий управления региональным развитием, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт информатики и математического моделирования, технологических процессов Кольского научного центра Российской академии наук (ИИММ КНЦ РАН). Область научных интересов: имитационное моделирование, прогнозирование развития социально-экономических систем. Число научных публикаций — 34. [khaliullina@iimm.ru](mailto:khaliullina@iimm.ru); ул. Ферсмана, 24А, Апатиты, 184209; p.т.: +79211712072.

**Khaliullina Darya Nikolaevna** — junior researcher information technologies of regional development management laboratory, Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the Kola Science Center of Russian Academy of Sciences (IIMM KSC RAS). Research interests: simulation, forecasting the development of socio-economic systems. The number of publications — 34. [khaliullina@iimm.ru](mailto:khaliullina@iimm.ru); 24A, Fersman St., Apatity, 184209, Russia; office phone: +79211712072.

## РЕФЕРАТ

*Халиуллина Д.Н.* **Проблемно-ориентированный программный комплекс поддержки стратегического планирования развития малых инновационных предприятий.**

Рассматриваемый в статье программный комплекс обеспечивает поддержку стратегического планирования развития малого инновационного предприятия. Автором предлагается двухэтапная технология поддержки стратегического планирования, которая дает возможность получить прогноз развития предприятия по различным сценариям (на первом этапе), а также произвести «обратное» планирование (на втором этапе), по результатам которого можно определить исходные условия, обеспечивающее достижение поставленной цели.

Особенностью программного комплекса является наличие графического редактора для работы с концептуальной моделью разрабатываемого предприятия. Данный редактор позволяет не только построить когнитивную карту МИП, но и провести синтез непараметризованной СД-модели.

## SUMMARY

*Khaliullina D.N.* **A Problem-Oriented Program Complex to Support Strategic Planning of Development of Small Innovative Enterprises.**

The program complex provides support for strategic planning of development of small innovation enterprises. The author proposes a two-step strategic planning support technology that gives an opportunity to obtain the forecast of the enterprise development for different scenarios (the first phase). It is also possible to produce a "reverse" planning (the second stage), the results of which allow defining the initial conditions ensuring the achievement of this goal.

A feature of the program complex is a graphical editor for working with the conceptual model of the enterprise. This editor allows building a cognitive map of the small innovative enterprise and carrying out the synthesis of a non-parameterized simulation model.

В. А. ГОНЧАРЕНКО  
**КОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ  
АППРОКСИМАЦИОННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ С  
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ ФУНКЦИЕЙ**

---

*Гончаренко В.А. Композиционный метод формирования аппроксимационных распределений с произвольной фазовой функцией.*

**Аннотация.** В статье рассмотрен подход к представлению распределений вероятностей в виде двухуровневой композиции интегрального ядра и фазовой функции, являющейся обобщением понятия плотности распределения случайного параметра. Показаны возможности гипердельтной аппроксимации фазовой функции, а также ее взаимосвязь с формированием распределений фазового типа. Предложен метод формирования аппроксимационных распределений на основе произвольной фазовой функции методом производных.

**Ключевые слова:** интегральное ядро, случайный параметр, гипердельтное распределение вероятностей, обобщенная функция, гиподельтная функция, распределение фазового типа, равномерно-экспоненциальное распределение, аппроксимация, метод моментов, метод производных, фазовая функция.

*Goncharenko V.A. Composite Method of Forming Approximating Distributions with an Arbitrary Phase Function.*

**Abstract.** In this article we consider an approach to representation of distributions of probabilities in the form of the two-level composition of an integral kernel and a phase function which is generalization of the concept of density of random parameter distribution. Possibilities of hyper-delta approximation of the phase function and its interrelation with the formation of phase-type distributions are shown. The method of approximating distributions formation on the basis of the arbitrary phase function by the method of derivatives is offered.

**Keywords:** integral kernel; random parameter; hyper-delta probability distribution; generalized function; hypo-delta function; phase-type distribution uniformly exponential distribution; approximation; method of the moments; method of derivatives; phase function.

---

**1. Введение.** В исследованиях сложных систем для аппроксимации произвольных распределений случайных величин часто используют распределения фазового типа [1], описывающие случайные процессы в виде совокупности последовательных и/или параллельных экспоненциальных фаз. Этот метод фаз, предложенный А. Эрлангом, был развит Д. Коксом [2], М. Ньютом [3] и другими учеными [4-6], найдя широкое применение в теории надежности и теории очередей при расчете немарковских систем [7-11]. Использование распределений фазового типа (Эрланга, Кокса, Ньюта и др.) позволяет разложить немарковские случайные процессы на совокупность фиктивных экспоненциальных фаз и существенно упростить расчет моделей.

Так, в [7] описан итерационный метод расчета немарковских многоканальных систем с гиперэкспоненциальными распределениями, а в [8] обобщены подходы к расчету систем массового обслуживания с

фазовыми распределениями. В [9] предложен метод расчета немарковских сетей массового обслуживания на основе гиперэкспоненциальной аппроксимации распределений с произвольным числом начальных моментов. В [10] рассматривается двухмоментная аппроксимация с использованием фазовых распределений. В [11] фазовые распределения используются при расчете нестационарных моделей обслуживания с конечным источником заявок. Важными при этом являются и вопросы точности аппроксимации распределениями фазового типа [12].

Другой подход к расчету систем с распределениями фазового типа предполагает использование не дискретных, а *непрерывных фаз* [13-15]. При этом аппроксимирующее распределение представляется в виде композиции экспоненциального ядра и фазовой функции, в частном случае выступающей плотностью распределения случайного параметра экспоненциального ядра.

Также развиваются подходы на основе фазовых распределений с неэкспоненциальными фазами. Метод представления распределений в виде совокупности параллельных *детерминированных фаз* был использован в так называемой *гипердельтной аппроксимации* [16] на основе смеси дельта-функций Дирака и развит в работе [17].

В статье рассматривается композиционный подход для общего случая, когда произвольные распределения могут быть аппроксимированы фазовыми распределениями с *произвольной фазовой функцией*, в том числе и на основе гипердельтной аппроксимации.

**2. Общий подход к аппроксимации распределений с использованием фазовой функции.** Случайные пуассоновские процессы с интенсивностью, являющейся случайной величиной, исследованы Хинчиным [18]. Они представляют собой совокупность обычных пуассоновских потоков со случайными значениями параметра и называются *обобщенными пуассоновскими потоками*.

В [19] рассмотрен формальный аппарат представления случайных процессов со случайными параметрами. Функция распределения  $F(x, \hat{\Theta})$ , усредненная по случайным параметрам  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_m$ , может быть использована для представления процессов восстановления:

$$M[F(x, \hat{\Theta})] = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} F(x, \theta_1, \dots, \theta_m) h(\theta_1, \dots, \theta_m) d\theta_1 \dots d\theta_m, \quad (1)$$

где  $h(\theta_1, \dots, \theta_m)$  — совместная плотность распределения случайных параметров  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_m$ . В общем случае  $h(\cdot)$  может служить оператором преобразования функции  $F$  с учетом неопределенности параметров.

В [20] предложены два подхода к моделированию случайных потоков со случайными параметрами: на основе случайности параметров распределений случайных величин и на основе случайности интенсивностей случайных потоков; также высказана идея о возможности использования усредненных по случайным параметрам распределений для аппроксимации произвольных распределений.

Рассмотрим обобщенный композиционный подход к формированию аппроксимирующих распределений с использованием так называемой *фазовой функции*. Для этого без потери общности будем использовать представление (1) с одномерной функцией  $h(\cdot)$ .

Под *фазовой функцией* будем понимать произвольную дифференцируемую функцию, принадлежащую пространству *основных и обобщенных функций* [21], описывающую структуру фазового построения распределения вероятностей фазового типа. В частных случаях фазовая функция выступает в качестве плотности распределения случайного (дискретного или непрерывного) параметра распределения.

*Гипотеза. Плотность распределения случайной величины  $t$  для  $\forall t$  может быть представлена в виде уравнения Фредгольма 1-го рода как композиция интегрального ядра  $f(t, \lambda)$  и фазовой функции  $h(\lambda)$ :*

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \lambda) h(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Интегральное ядро  $f(t, \lambda)$  может задаваться степенной, экспоненциальной, гиперболической, логарифмической, тригонометрической и другими функциями. Наибольшее количество известных аппроксимирующих распределений, описанных ниже, может быть представлено при *экспоненциальном интегральном ядре*. В частном случае  $f(t, \lambda)$  может являться условной плотностью распределения вероятностей, случайный параметр которой  $\hat{\lambda}$  принимает значение  $\lambda$ .

Фазовая функция  $h(\lambda)$  в общем случае служит *оператором преобразования* функции  $f(t, \lambda)$  к функции  $f(t)$  и может не иметь физического смысла плотности распределения [13], являясь, например, производной от обобщенной функции. Может иметься информация о ее качественных свойствах, функциональном виде, области определения и т.д. В частном случае, при интерпретации  $h(\lambda)$  в качестве ПР случайного параметра, используются как *обобщенные* (например, гипердельтовое распределение [16, 17]), так и *основные* [21] функции (например, равномерное, нормальное, экспоненциальное распределения [20]).

**3. Гипердельтная аппроксимация фазовой функции.** Наиболее подходящей и естественной аппроксимацией по методу моментов для распределения случайного параметра  $\hat{\lambda}$  можно считать гипердельтную аппроксимацию (ГДА) [16]. Аппроксимирующая гипердельтная ПР случайного параметра имеет вид

$$h_a(\lambda) = \sum_{i=1}^n C_i \delta(\lambda - \lambda_i), \quad (3)$$

где  $C_i$  — вероятности, удовлетворяющие условию  $\sum_{i=1}^n C_i = 1$ , а  $\delta(\lambda)$  — дельта-функция Дирака.

ГДА довольно проста, лучше других приспособлена для использования реальной статистической информации или экспертных оценок, позволяет аппроксимировать как дискретные, так и непрерывные функции, может описывать как случайные, так и детерминированные величины. Кроме того, случайный параметр  $\hat{\lambda}$  не является прямо измеряемой или наблюдаемой величиной, а определяется косвенно через наблюдения за интервалами между событиями или за количеством событий, наступающих на заданном интервале времени. Поэтому исходные данные могут выражаться в виде взвешенной суммы фиксированных наблюдений, т.е. в гипердельтном представлении.

При ГДА фазовой функции  $h(\lambda)$ , подставляя (3) вместо  $h(\lambda)$  во (2), получим *гиперпредставление* ПР случайной величины  $t$ :

$$f(t) = \sum_{i=1}^n C_i f(t, \lambda_i). \quad (4)$$

При *экспоненциальном интегральном ядре*  $f(t, \lambda_i)$  получим известную *гиперэкспоненциальную плотность распределения*, часто используемую для аппроксимации реальных распределений в теории очередей и теории надежности:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n C_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}. \quad (5)$$

Таким образом, ГДА ПР случайного параметра экспоненциального распределения аналогична гиперэкспоненциальной аппроксимации распределения времени между событиями. Однако здесь имеются некоторые отличия. В случае гиперэкспоненциальной аппроксимации распределений времени обеспечивается равенство начальных моментов аппроксимирующего и аппроксимируемого распределения. В слу-

чае же ГДА распределения случайного параметра обеспечивается равенство начальных моментов распределений параметров, а не распределений времени между событиями. Для последних же будет обеспечиваться равенство их производных в точке  $t=0$ , что соответствует аппроксимации по методу производных [22].

Рассмотрим ГДА некоторых известных распределений по начальным моментам при различных ограничениях. При  $n=2$  параметры  $C_i$  и  $\lambda_i$  для выражения (3), аппроксимирующего известные распределения, можно получить аналитически:

1) для равномерного распределения с параметрами  $a$  и  $b$ :

$$C_1 = C_2 = 1/2; \lambda_{1,2} = \frac{a+b}{2} \mp \frac{b-a}{2\sqrt{2}};$$

2) для нормального распределения с параметрами  $m$  и  $\sigma$ :

$$C_1 = C_2 = 1/2; \lambda_{1,2} = m \mp \sigma;$$

3) для экспоненциального распределения  $f(\lambda) = \theta \cdot \exp(-\theta\lambda)$ :

$$C_{1,2} = \frac{1 \pm 5/\sqrt{2}}{2}; \lambda_{1,2} = \frac{2 \mp \sqrt{2}}{\theta}.$$

Если вид аппроксимируемого распределения неизвестен, но известны  $k$  его начальных моментов  $\gamma_i$ ,  $i = 1 \div k$ , то параметры  $C_i$  и  $\lambda_i$  однозначно выражаются через  $\gamma_i$ . Для  $n=2$  согласно [16] имеем:

$$\lambda_{1,2} = \frac{\gamma_3 - \gamma_2\gamma_1 \mp \sqrt{(\gamma_3 - \gamma_2\gamma_1)^2 - 4(\gamma_3\gamma_1 - \gamma_2^2)(\gamma_2 - \gamma_1^2)}}{2(\gamma_2 - \gamma_1^2)}; \quad (6)$$

$$C_{1,2} = \frac{1}{2} \left[ 1 \pm \frac{3\gamma_2\gamma_1 - \gamma_3 - 2\gamma_1^2}{\sqrt{(\gamma_3 - \gamma_2\gamma_1)^2 - 4(\gamma_3\gamma_1 - \gamma_2^2)(\gamma_2 - \gamma_1^2)}} \right]. \quad (7)$$

Однако использование аппроксимации при  $n=2$  (2 пика дельта-функции) может оказаться недостаточным по точности аппроксимации. При  $n>2$  необходимо использовать численные методы. Так, для  $n=3$  система уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} C_1 + C_2 + C_3 &= 1 \\ C_1\lambda_1 + C_2\lambda_2 + C_3\lambda_3 &= \gamma_1 \\ C_1\lambda_1^2 + C_2\lambda_2^2 + C_3\lambda_3^2 &= \gamma_2 \\ C_1\lambda_1^3 + C_2\lambda_2^3 + C_3\lambda_3^3 &= \gamma_3 \\ C_1\lambda_1^4 + C_2\lambda_2^4 + C_3\lambda_3^4 &= \gamma_4 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Но можно найти параметры аппроксимации и аналитически, если имеется дополнительная информация об аппроксимируемом распределении. Так, если известно, что  $h(\lambda)$  — симметричная функция, то система уравнений упрощается, поскольку  $C_1 = C_3 = C$ ,  $(\lambda_1 + \lambda_3)/2 = \lambda_2$ , откуда  $C_2 = 1 - 2C$  и  $\lambda_2 = \gamma_1$ . Упрощенная система уравнений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 + \lambda_3 &= 2\gamma_1 \\ C(\lambda_1^2 + \lambda_3^2) &= \gamma_2 - \gamma_1^2 + 2C\gamma_1^2 \\ C(\lambda_1^3 + \lambda_3^3) &= \gamma_3 - \gamma_1^3 + 2C\gamma_1^3 \\ C(\lambda_1^4 + \lambda_3^4) &= \gamma_4 - \gamma_1^4 + 2C\gamma_1^4 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

После решения системы уравнений (9) находим параметры аппроксимации:

$$\lambda_{1,3} = \gamma_1 \left[ 1 \mp \sqrt{\frac{3\gamma_2\gamma_1 - 5\gamma_3 + 2\gamma_4/\gamma_1}{\gamma_3 - \gamma_2\gamma_1}} \right]; \quad \lambda_2 = \gamma_1; \quad (10)$$

$$C = \frac{(\gamma_2 - \gamma_1^2)(\gamma_3 - \gamma_2\gamma_1)}{2\gamma_1(3\gamma_2\gamma_1^2 - 5\gamma_3\gamma_1 + 2\gamma_4)}.$$

Если вид аппроксимируемого симметричного распределения известен, можно выразить параметры аппроксимации через параметры распределения. Так, для *равномерного закона*:

$$\lambda_{1,3} = \frac{a+b}{2} \mp \frac{(b-a)\sqrt{3}}{2\sqrt{5}}; \quad \lambda_2 = \frac{a+b}{2}; \quad C_1 = C_3 = 5/18; \quad C_2 = 4/9.$$

Для *нормального закона*:

$$\lambda_{1,3} = m \mp \frac{\sigma\sqrt{3}}{2}; \quad \lambda_2 = m; \quad C_1 = C_3 = 6; \quad C_2 = 3.$$

Интересно отметить, что аппроксимация  $h(\lambda)$  при  $n=2$  завышает значение первого момента  $v_1$  распределения  $f(t)$  времени между событиями, а при  $n=3$ , наоборот, занижает, хотя получаемые значения более точны. Поэтому можно использовать гипердельтную аппроксимацию распределения случайного параметра в качестве верхней и нижней оценки распределения  $f(t)$  времени между событиями.

**4. Аппроксимация распределением с произвольной фазовой функцией методом производных.** Для аппроксимации распределения случайного параметра могут, помимо гипердельтной аппроксимации, использоваться и другие распределения, например, гиперэкспоненци-

альные и гипоекспоненциальные [4], нормальные, треугольные и др. Однако часто в условиях неопределенности исходных данных нет возможности использовать слишком подробные многопараметрические распределения. В этом случае в качестве аппроксимирующего можно использовать *равномерное распределение*, характеризующее максимальную степень неопределенности (по мере устранения неопределенности гипотеза о виде распределения может быть скорректирована). Параметры аппроксимации в этом случае определяются первыми двумя начальными моментами  $\gamma_1, \gamma_2$ :

$$a = \gamma_1 - \sqrt{3D} = \gamma_1 - \sqrt{3(\gamma_2 - \gamma_1^2)}; b = \gamma_1 + \sqrt{3D} = \gamma_1 + \sqrt{3(\gamma_2 - \gamma_1^2)}. \quad (11)$$

Таким образом, после выделения экспоненциального ядра в формуле (2) для представления условной ПР времени между событиями потока основная задача формирования аппроксимирующего распределения сводится к нахождению ПР  $h(\lambda)$  случайного параметра и ее начальных моментов. Однако очевидно, что для представления произвольного распределения  $f(t)$  в виде (2) функция  $h(\lambda)$  по физическому смыслу может и не быть функцией плотности вероятности.

*Пример.* По аналогии с гипердельтным и гипоекспоненциальными распределениями введем понятие *гиподельтной функции* для аппроксимации фазовой функции:

$$h_u(\lambda) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i \delta(\lambda - \lambda_i). \quad (12)$$

Аппроксимирующая гиподельтная функция (12) не является плотностью распределения. Однако, подставляя (12) в (3), получаем *гипоекспоненциальную* ПР случайной величины  $t$ :

$$f(t) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}. \quad (13)$$

Рассмотрим задачу аппроксимации произвольного распределения распределением с *произвольной фазовой функцией*. За основу возьмем метод производных [22], при котором аппроксимация производится на основе равенства производных аппроксимирующей и аппроксимируемой функций в нулевой точке. Покажем взаимосвязь между аппроксимацией *методом производных* произвольной ПР и аппроксимацией *методом моментов* фазовой функции этой плотности.

*Лемма. Аппроксимация методом производных произвольной плотности распределения случайной величины, представленной формулой (3), соответствует аппроксимации методом моментов фазовой функции этой плотности.*

*Доказательство:* Пусть известна исходная ПР  $f(t)$ , удовлетворяющая условию непрерывности. Представим ее в виде ряда Тейлора:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(0)t^k}{k!}. \quad (14)$$

Преобразование Лапласа-Стилтьеса от  $f(t)$  :

$$F^*(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(0)}{s^{k+1}}.$$

При замене  $s=1/z$  получим:

$$\frac{F^*(1/z)}{z} = \sum_{k=0}^{\infty} f^{(k)}(0)z^k.$$

Тогда справедливо выражение:

$$\lim_{z \rightarrow 0} \left[ \frac{F^*(1/z)}{z} \right]^{(k)} = f^{(k)}(0) = f_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

что и требовалось доказать.

При экспоненциальности интегрального ядра  $f(t, \lambda)$  ПР  $f(t)$  согласно (3) определяется фазовой функцией (оператором)  $h(\lambda)$ :

$$f(t) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} h(\lambda) d\lambda. \quad (15)$$

На основе формулы (15) при различных фазовых функциях можно получить целый ряд выражений для распределений времени между событиями. В таблице 1 приведены различные ПР  $f(t)$  и соответствующие им согласно (15) фазовые функции, в частных случаях представляющие собой ПР случайного параметра  $\hat{\lambda}$  (в таблице функция  $\mathbf{1}(\lambda)$  — единичная ступенчатая функция Хевисайда).

Таблица 1. Представление распределений с произвольной фазовой функцией

Распределение	Плотность распределения	Фазовая функция
экспоненциальное	$\lambda_0 e^{-\lambda_0 t}$	$\delta(\lambda - \lambda_0)$
обобщенно-экспоненциальное	$C_1 \delta(t) + (1 - C_1) \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}$	$\frac{C_1 \delta(t)}{\lambda e^{-\lambda t} d\lambda} + (1 - C_1) \delta(\lambda - \lambda_0)$
гипер-экспоненциальное	$\sum_{i=1}^n C_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}$	$\sum_{i=1}^n C_i \delta(\lambda - \lambda_i)$
гипо-экспоненциальное	$\sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}$	$\sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} C_i \delta(\lambda - \lambda_i)$
обобщенное Эрланга 2-го порядка	$\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$	$\frac{\lambda_2 \delta(\lambda - \lambda_1) - \lambda_1 \delta(\lambda - \lambda_2)}{\lambda_2 - \lambda_1}$
простое Эрланга 2-го порядка	$\lambda_0^2 t e^{-\lambda_0 t}$	$\frac{\lambda_0^2 \cdot d\delta(\lambda - \lambda_0)}{\lambda d\lambda}$
равномерно-экспоненциальное	$\frac{(1 + at)e^{-at} - (1 + bt)e^{-bt}}{(b - a)t^2}$	$\frac{\mathbf{1}(\lambda - a) \cdot \mathbf{1}(b - \lambda)}{b - a}$
гиперравномерно-экспоненциальное	$\sum_{i=1}^n C_i \frac{(1 + a_i t)e^{-a_i t} - (1 + b_i t)e^{-b_i t}}{(b_i - a_i)t^2}$	$\sum_{i=1}^n C_i \frac{\mathbf{1}(\lambda - a_i) \cdot \mathbf{1}(b_i - \lambda)}{b_i - a_i}$
Кокса 2-го порядка	$C_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \frac{(1 - C_1) \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$	$C_1 \delta(\lambda - \lambda_1) + (1 - C_1) * \frac{\lambda_2 \delta(\lambda - \lambda_1) - \lambda_1 \delta(\lambda - \lambda_2)}{\lambda_2 - \lambda_1}$
Парето 1-го порядка	$\theta / (t + \theta)^2$	$\theta e^{-\theta \lambda}$

Для нахождения начальных моментов  $h(\lambda)$  или в общем случае интегралов вида:

$$\gamma_k = \int_0^{\infty} \lambda^k h(\lambda) d\lambda.$$

сформулируем следующее теорему.

*Теорема. Начальные моменты случайного параметра  $\hat{\lambda}$  случайного экспоненциального распределения  $f(t, \hat{\lambda})$  определяются значениями усредненной по параметру плотности  $f(t)$  и ее производных в точке  $t=0$ :*

$$\gamma_k = (-1)^{k-1} f^{(k-1)}(0).$$

*Доказательство:* Возьмем  $(k-1)$ -ю производную от усредненной плотности распределения  $f(t) = \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} h(\lambda) d\lambda$  в точке  $t=0$ :

$$\begin{aligned} f^{(k-1)}(0) &= \lim_{t \rightarrow 0} \left[ \int_0^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} h(\lambda) d\lambda \right]^{(k-1)} = \lim_{t \rightarrow 0} \int_0^{\infty} h(\lambda) [\lambda e^{-\lambda t}]^{(k-1)} d\lambda \\ &= (-1)^{k-1} \int_0^{\infty} \lambda^k h(\lambda) d\lambda = (-1)^{k-1} \gamma_k. \end{aligned}$$

Следовательно,  $\gamma_k = (-1)^{k-1} f^{(k-1)}(0)$ , что и требовалось доказать.

**5. Заключение.** Таким образом, в случае отсутствия сведений о характере изменения параметров модели исходят из их максимально возможной неопределенности, и расчет системы проводится при допущении о равномерном распределении случайного параметра  $\hat{\lambda}$ . Для аппроксимации распределения  $\hat{\lambda}$  можно воспользоваться формулой (11) и исследовать характеристики потока аналитическими методами, разработанными в [19, 20]. Если выдвигается гипотеза о другом виде распределения случайного параметра  $\hat{\lambda}$  (например, нормальном) либо имеется информация о начальных моментах случайных параметров или о начальных значениях производных от исходных распределений, то характеристики потока находятся на основе предлагаемого аппроксимационного метода.

Также предложенный метод позволяет использовать единое представление для распределений случайных величин в виде композиции интегрального ядра и фазовой функции, даже если последняя по физическому смыслу не является плотностью распределения [13]. При построении фазовых функций используется математический аппарат обобщенных функций, представляющих собой линейные непрерывные функционалы на пространстве основных функций [21].

Дальнейшее исследование моделей обслуживания будет определяться сформированными исходными данными. Применение описанного композиционного метода формирования аппроксимирующих распределений позволяет использовать известные модели систем массового обслуживания с известными распределениями фазового типа [5, 6, 7], а также разрабатывать новые модели с произвольными фазовыми функциями. Кроме того, при наличии возмущений или неопределенности параметров распределений метод может быть использован для коррекции моделей в соответствии с гипотезами о распределениях возмущенных параметров [20].

## Литература

1. *Buchholz P., Kriege J., Felko I.* Input Modeling with Phase-Type Distributions and Markov Models // Theory and Applications. 2014. 127 p.
2. *Cox D.R.* A use of complex probabilities in theory of stochastic processes // Proc. Camb. Phil. Soc. 1955. vol. 51. no 2. pp. 313–319.
3. *Neuts M.F.* Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models: an Algorithmic Approach. Chapter 2: Probability Distributions of Phase Type // Baltimore: Johns Hopkins University Press. 1981. 352 p.
4. *Смагин В.А.* Об одном методе исследования немарковских систем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1983. № 6. С. 31–36.
5. *Рыжиков Ю.И.* Имитационное моделирование. Теория и технологии // СПб.: КОРОНА принт; М.:Альтекс-А, 2004. 384 с.
6. *Reinecke P., Horváth G.* Phase-type distributions for realistic modelling in discrete-event simulation // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques. 2012. pp. 283–290.
7. *Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д.* Итерационный метод расчета многоканальных систем с произвольным законом обслуживания // Проблемы управления и теории информации. 1980. № 3. С. 203–213.
8. *Бочаров П.П., Литвин В.Г.* Методы анализа и расчета систем массового обслуживания с распределениями фазового типа // Автоматика и телемеханика. 1986. № 5. С. 5–23.
9. *Смагин В.А., Филimoniхин Г.В.* Аппроксимационный метод расчета разомкнутых сетей массового обслуживания // Автоматика и вычислительная техника. 1986. № 4. С. 28–33.
10. *Алиев Т.И.* Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2(84). С. 88–93.
11. *Бубнов В.П., Тырва А.В., Еремин А.С.* Комплекс моделей нестационарных систем обслуживания с распределениями фазового типа // Труды СПИИРАН. 2014. Вып. 37. С. 61–71.
12. *Vatamidou E., Vlasiou M., Adan I.J.B.F., Zwart B.* On the accuracy of phase-type approximations of heavy-tailed risk models // Scandinavian Actuarial Journal. 2014. no. 6. pp. 510–534.
13. *Кочегаров В.А., Фролов Г.А.* Проектирование систем распределения информации. Марковские и немарковские модели. М.: Радио и связь. 1991. 216 с.
14. *Гончаренко В.А., Смагин В.А.* О влиянии неопределенности параметров распределений на характеристики узла сети // Изв. высш. учебн. заведений. Приборостроение. 1993. № 7–8. С.39–45.
15. *Гончаренко В.А.* Анализ реактивности узла вычислительной сети в условиях интервальной неопределенности // Изв. высш. учебн. заведений. Приборостроение. 2008. № 7. С. 34–39.
16. *Смагин В.А., Филimoniхин Г.В.* О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 1. С. 25–31.
17. *Смагин В.А.* Коррекция гипердельтного распределения в теории случайных процессов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2015. №2. С 26–31.
18. *Хинчин А.Я.* Работы по математической теории массового обслуживания // М.: Физматгиз. 1963. 236 с.
19. *Гончаренко В.А.* Формальный аппарат представления случайных процессов обслуживания с возмущающими воздействиями и неопределенностью параметров // Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. 2015. Вып. 648. С. 13–18.

20. Гончаренко В.А. Моделирование и оценивание характеристик случайных потоков событий в компьютерных сетях при параметрической неопределенности // Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. 2015. Вып. 649. С. 16–22.
21. Гельфанд И.М., Шилов Г.Е. Пространства основных и обобщенных функций // Обобщенные функции. М.: Физматгиз. 1958. Вып. 2. 307 с.
22. Смагин В.А. К аппроксимации законов распределений методом производных // Изв. высш. учебн. заведений. Приборостроение. 1993. № 2. С. 16–21.

## References

1. Buchholz P., Kriege J., Felko I. Input Modeling with Phase-Type Distributions and Markov Models. Theory and Applications. 2014. 127 p.
2. Cox D.R. A use of complex probabilities in theory of stochastic processes. *Proc. Cambr. Phil. Soc.* 1955. vol. 51. no. 2. pp. 313–319.
3. Neuts M.F. Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models: an Algorithmic Approach. Chapter 2: Probability Distributions of Phase Type. Baltimore: Johns Hopkins University Press. 1981. 352 p.
4. Smagin V.A. [About one method of research of non-Markovian systems]. *Izv.AN SSSR. Tehnicheskaja kibernetika – Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR*. 1983. no. 6. pp. 31–36. (In Russ.).
5. Ryzhikov Ju. I. *Imitacionnoe modelirovanie. Teorija i tehnologii*. [Imitating modeling. Theory and technologies]. SPb.: CORONA print; M.:Altex-A. 2004. 384 p. (In Russ.).
6. Reinecke P., Horváth G. Phase-type distributions for realistic modelling in discrete-event simulation. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques. 2012. pp. 283–290.
7. Ryzhikov Ju.I., Khomonenko A.D. [Iterative method for analysis of multichannel queuing systems with general service time distribution]. *Problemy upravlenija i teorii informacii – Problems of Control and Information Theory*. 1980. No 3. pp. 203–213. (In Russ.).
8. Bocharov P.P., Litvin V.G. [Analysis and calculation methods of queuing systems with phase-type distributions]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Telemekhanics*. 1986. no. 5. pp. 5–23. (In Russ.).
9. Smagin V.A., Filimonihin G.V. [Approximation method of calculation of open queuing networks]. *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika – Automation and Computer Engineering*. 1986. no. 4. pp. 28–33. (In Russ.).
10. Aliev T.I. [Approximation of probability distributions in queuing models]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki – Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2013. no. 2(84). p. 88–93. (In Russ.).
11. Bubnov V.P., Tyrva A.V., Eremin A.S. [Complex of models of non-stationary queuing systems with phase-type distributions]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2014. vol. 37. pp. 61–71. (In Russ.).
12. Vatamidou E., Vlasiou M., Adan I.J.B.F., Zwart B. On the accuracy of phase-type approximations of heavy-tailed risk models. *Scandinavian Actuarial Journal*. 2014, no. 6, pp. 510–534.
13. Kocheгарov V.A., Frolov G.A. *Proektirovanie sistem raspredelenija informacii. Markovskie i nemarkovskie modeli*. [Designing of systems of information distribution. Markovian and non-Markovian models]. M.: Radio i svjaz', 1991. 216 p. (In Russ.).
14. Goncharenko V.A., Smagin V.A. [About influence of uncertainty of parameters of distributions on the characteristics of the network node]. *Izv. vyssh. ucbebn. Zavedeni.: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions. Instrumentation*. 1993. no 7–8. pp 39–45. (In Russ.).

15. Goncharenko V.A. [Analysis of the reactivity of computer network node in conditions of interval uncertainty]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation*. 2008. no 7. pp 34–39. (In Russ.).
16. Smagin V.A., Filimonihin G.V. [About modelling of stochastic processes on a basis of hyperdelta distribution]. *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika – Automation and Computer Engineering*. 1990. no. 1. pp. 25–31. (In Russ.).
17. Smagin V.A. [Correction of the hyperdelta distribution in the theory of stochastic processes]. *Intellectual'nye tehnologii na transporte – Intellectual Technologies on Transport*. 2015. no. 2. pp. 26–31. (In Russ.).
18. Hinchin A.Ja. *Raboty po matematicheskoj teorii massovogo obsluzhivaniya*. [Works on the mathematical queueing theory]. M.: Fizmatgiz. 1963. 236 p. (In Russ.).
19. Goncharenko V.A. [The formal apparatus of representation of stochastic processes of service with the disturbance and uncertainty parameters]. *Trudy VKA imeni A.F.Mozhajskogo – Proceedings of Military Space Academy named A.F.Mozhaysky*. 2015. vol. 648. pp. 13–18. (In Russ.).
20. Goncharenko V.A. [Modelling and estimation of characteristics of random flows of events in computer networks under parametric uncertainty]. *Trudy VKA imeni A.F.Mozhajskogo – Proceedings of Military Space Academy named A.F.Mozhaysky*. 2015. vol. 649. pp. 13–18. (In Russ.).
21. Gel'fand M.I., Shilov G.I. *Prostranstva osnovnyh i obobshhennyh funkcij. Obobshhennye funkcii* [Spaces of the test and generalized functions. Generalized functions]. M.: Fizmatlit. 1958. vol 2. 307 p. (In Russ.).
22. Smagin V.A. [To the approximation of the laws of distributions by the method of the derivatives] *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Proceedings of the higher educational institutions: Instrumentation*. 1993. no. 2. pp. 16–21. (In Russ.).

**Гончаренко Владимир Анатольевич** — к-т техн. наук, доцент, профессор кафедры информационно-вычислительных систем и сетей, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (ВКА им. А.Ф. Можайского). Область научных интересов: теория очередей, математическое моделирование, информационная безопасность, устойчивость компьютерных систем. Число научных публикаций — 71. vlango@mail.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; p.t.: +7(812)347-95-24.

**Goncharenko Vladimir Anatolievich** — Ph.D., associate professor, professor of information and computing systems and networks department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: queueing systems with uncertainty, mathematical modeling, stability of computer networks. The number of publications — 71. vlango@mail.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812)347-95-24.

## РЕФЕРАТ

*Гончаренко В.А.* **Композиционный метод формирования аппроксимационных распределений с произвольной фазовой функцией.**

В статье рассматривается обобщенный подход к представлению распределений вероятностей фазового типа в виде двухуровневой композиции интегрального ядра и произвольной фазовой функции. Под фазовой функцией понимается произвольная функция, принадлежащая пространству основных и обобщенных функций, описывающая структуру фазового построения распределения вероятностей фазового типа, в частных случаях являющаяся плотностью распределения случайного параметра.

Показаны возможности гипердельтной аппроксимации фазовой функции и ее место в формировании распределений фазового типа. Проводится взаимосвязь между гипердельтной аппроксимацией распределения случайного параметра экспоненциального распределения и гиперэкспоненциальной аппроксимацией распределения времени между событиями.

Предложен метод аппроксимации произвольного распределения распределением с фазовой функцией на основе метода производных. Показана взаимосвязь между аппроксимацией методом производных плотности распределения и аппроксимацией методом моментов фазовой функции. Выведены формулы для фазовых функций различных распределений времени между событиями. Получено выражение для нахождения начальных моментов фазовой функции.

## SUMMARY

*Goncharenko V.A.* **Composite Method of Forming Approximating Distributions with an Arbitrary Phase Function.**

The article discusses the generalized approach to representation of phase-type probabilities distributions in the form of two-level composition of an integral kernel and an arbitrary phase function. The phase function is understood as the arbitrary generalized function which belongs to the space of the main and generalized functions, describes the structure of phase construction of phase-type probabilities distribution, and in special cases is the density of distribution of a random parameter.

Possibilities of hyper-delta approximation of the phase function and its place in the formation of distributions of phase type are shown. The interrelation between hyper-delta approximation of distribution of a random parameter of exponential distribution and the hyperexponential approximation of distribution of time between events is carried out.

The method of approximation of an arbitrary distribution by distribution with the phase function on the basis of a method of derivatives is offered. The interrelation between approximation by method of derivatives of distribution density and approximation by method of the moments of phase function is shown. Formulas for phase functions of various distributions of time between events are derived. Expression for finding the initial moments of the phase function is obtained.

А.М. ЖУКОВА

**НАВИГАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ПЛОСКОГО  
ШАРНИРНОГО МНОГОУГОЛЬНИКА**

---

*Жукова А. М. Навигационный алгоритм для плоского шарнирного многоугольника.*

**Аннотация.** Улучшены существующие навигационные алгоритмы для плоского шарнирного многоугольника общего вида. Представленный алгоритм строит путь между двумя произвольными конфигурациями шарнирного многоугольника, состоящий из не более чем восьми шагов.

**Ключевые слова:** полигональный шарнирный механизм, пространство модулей, клеточный комплекс, навигационный алгоритм.

*Zhukova A. M. Navigation Algorithm for a Planar Polygonal Linkage.*

**Abstract.** An improvement of existing navigation algorithms for a generic polygonal linkage is presented. Our algorithm constructs a path between two arbitrary configurations of a polygonal linkage. This path contains at most eight steps.

**Keywords:** polygonal linkage, moduli space, cell complex, navigation algorithm.

---

**1. Введение.** Конфигурационные пространства шарнирных многоугольников естественным образом возникают в топологии роботостроения и хорошо изучены [1–3]. В данной статье описан навигационный алгоритм для этих пространств. Некоторые подходы к навигации обсуждались в [4–6]. В [7] был построен навигационный алгоритм, работающий за  $O(n)$  шагов, где  $n$  – число сторон многоугольника.

Результат, представленный в этой статье, является улучшением результата, полученного в [8]. В ней был построен алгоритм с не более чем 17 шагами. Он основан на разбиении пространства модулей шарнирного многоугольника на клетки, построенном в [9], а точнее, на 1-остове этого разбиения. Иными словами, существует некоторый граф  $\Gamma$ , вложенный в пространство модулей шарнирного многоугольника. Путь по пространству модулей выглядит следующим образом: от произвольной конфигурации многоугольника мы достигаем некоторой подходящей вершины графа, затем движемся по ребрам, пока не достигнем подходящей вершины, расположенной недалеко от произвольной финальной конфигурации, переход к которой является последним шагом построения пути. При этом в статье [8] был предложен алгоритм прокладывания пути между двумя произвольными вершинами графа  $\Gamma$  за не более чем 15 переходов по ребрам графа. В данной статье этот результат улучшен за счет использования особых вершин графа  $\Gamma$ , описанных в Утверждении 1. Оказывается, что на границе любой клетки

максимальной размерности найдется по крайней мере одна такая вершина. В данной статье предложен алгоритм, строящий путь между двумя произвольными особыми вершинами.

При этом алгоритм обладает следующими свойствами:

1. Число шагов по графу (т. е. число пройденных ребер) не превосходит шести. Таким образом, этот алгоритм имеет константную длину.
2. Тем не менее нахождение некоторых из этих шести шагов может потребовать линейного времени  $O(n)$ , где  $n$  – число ребер многоугольника.
3. Каждый шаг по ребру графа реализуется с помощью изгибания некоторого выпуклого шарнирного четырехугольника. Отметим, что изгибания четырехугольников уже хорошо изучены [8].
4. Каждый шаг может быть реализован непосредственно механическим способом с помощью добавления нескольких дополнительных ребер, что приводит к шарнирному механизму с одной степенью свободы [8].

В данной статье мы строим только алгоритм навигации по графу  $\Gamma$ . Алгоритмы для непосредственной реализации переходов по ребрам графа в виде изгибания многоугольника на плоскости были построены в [8].

**2. Пространства модулей плоских шарнирных многоугольников.** Шарнирным  $n$ -угольником называется последовательность положительных чисел  $L = (l_1, \dots, l_n)$ . Ее следует понимать как набор жестких стержней с длинами  $l_i$ , соединенных циклически с помощью вращающихся шарниров.

Мы предполагаем, что выполняется условие замыкания: длина каждого стержня меньше суммарной длины остальных стержней.

Конфигурацией шарнирного многоугольника  $L$  на плоскости  $\mathbb{R}^2$  называется последовательность точек  $R = (p_1, \dots, p_n)$ ,  $p_i \in \mathbb{R}^2$ , такая, что  $l_i = |p_i, p_{i+1}|$ , и  $l_n = |p_n, p_1|$ .

*Определение 1. Множество всех конфигураций, профакторизованное по действию группы изометрий плоскости, сохраняющих ориентацию, называется пространством модулей, или конфигурационным пространством  $M(L)$  шарнирного многоугольника  $L$ .*

*Определение 2. Также  $M(L)$  можно определить следующим эквивалентным образом:*

$$M(L) = \{(u_1, \dots, u_n) \in (S^1)^n : \sum_{i=1}^n l_i u_i = 0\} / SO(2).$$

Из второго определения видно, что  $M(L)$  не зависит от порядка длин ребер  $l_i$ . Для удобства мы считаем стороны многоугольника упорядоченными по убыванию длин:

$$l_1 \geq l_2 \geq \dots \geq l_n.$$

Если никакая конфигурация  $L$  не лежит на одной прямой, то пространство  $M(L)$  – гладкое многообразие размерности  $n - 3$  [3]. В этом случае говорят, что шарнирный многоугольник имеет *общий вид*. Мы будем рассматривать только шарнирные многоугольники общего вида.

*Определение 3. Подмножество  $I \subset [n]$  называется длинным, если*

$$\sum_{i \in I} l_i > \sum_{i \notin I} l_i.$$

*Иными словами*

$$\sum_{i \in I} l_i > \frac{|L|}{2},$$

где  $|L|$  – периметр многоугольника. Если множество  $I$  является в  $[n]$  дополнением к длинному, то оно называется коротким.

Для шарнирных многоугольников общего вида любое подмножество ребер является либо длинным, либо коротким.

*Определение 4. Разбиение множества  $[n]$  называется допустимым, если все его элементы – непустые и короткие подмножества.*

Например, для шарнирного пятиугольника  $L = (1, 1, 1, 1, 1)$  разбиение  $(\{1, 2\} \{4\} \{3, 5\})$  является допустимым, а разбиение  $(\{1\} \{2, 3, 4, 5\})$  – нет.

На пространстве  $M(L)$  может быть введена структура регулярного клеточного разбиения.

*Теорема 1. [9] На конфигурационном пространстве  $M(L)$  шарнирного многоугольника  $L$  общего вида существует структура регулярного CW-комплекса  $\mathcal{K}(L)$ . Его полное комбинаторное описание выглядит следующим образом:*

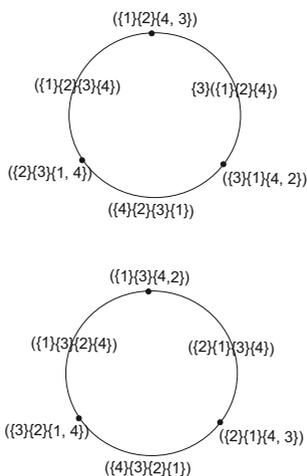


Рис. 1. Клеточное разбиение пространства модулей четырехугольника  $(1, 1, 1, 0.5)$

1.  $k$ -мерные клетки комплекса  $\mathcal{K}(L)$  помечены циклически упорядоченными допустимыми разбиениями множества  $[n] = \{1, 2, \dots, n\}$  на  $(n - k)$  непустые части.
2. Клетка  $C$  лежит на границе другой замкнутой клетки  $C'$  в том и только в том случае, если ее метка  $\lambda(C)$  получается измельчением метки  $\lambda(C')$ .

*Замечание.* Для удобства мы записываем циклически упорядоченное разбиение в виде линейной последовательности множеств, не забывая при этом о циклическом порядке. Еще раз отметим, что в разбиении порядок элементов внутри множеств неважен, однако важен порядок самих этих множеств. Например:

$$(\{1\} \{3\} \{4, 2, 5, 6\}) \neq (\{3\} \{1\} \{4, 2, 5, 6\}) = (\{3\} \{1\} \{2, 4, 5, 6\}).$$

*Пример.* Пусть  $n = 4$ ,  $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ ,  $l_4 = 0.5$ . Известно [1], что пространство  $M(L)$  – объединение двух дизъюнктивных окружностей. Клеточный комплекс  $\mathcal{K}(L)$  приведен на рисунке 1.

Нас особенно интересует *вершинно-реберный граф*  $\Gamma$  клеточного комплекса  $\mathcal{K}(L)$ , то есть его 1-остов, рассмотренный как (комбинатор-

ный) граф. Следующее следствие из Теоремы 1 полностью описывает комбинаторику графа  $\Gamma$ .

*Следствие 1. Метки на вершинах графа  $\Gamma$  являются всеми циклическими разбиениями множества  $[n]$  на три непустых коротких множества, а метки на ребрах являются всеми циклическими разбиениями множества  $[n]$  на четыре непустых коротких множества. Две вершины с метками  $\lambda$  и  $\lambda'$  соединены ребром тогда и только тогда, когда метка  $\lambda$  может быть получена из метки  $\lambda'$  перемещением некоторых элементов из одного множества в другое.*

*Пример.* Вершины с метками

$$(\{1, 2, 5, 6\} \{3, 4\} \{7, 8\}) \text{ и } (\{1, 2\} \{3, 4, 5, 6\} \{7, 8\})$$

соединены ребром, помеченным

$$(\{1, 2\} \{5, 6\} \{3, 4\} \{7, 8\}).$$

Граф  $\Gamma$  можно рассматривать как дискретное приближение пространства модулей. Его вложение в  $M(L)$  описано в явном виде в [8].

**3. Алгоритм навигации на графе  $\Gamma$ .** Общий алгоритм навигации выглядит следующим образом.

Пусть даны две конфигурации плоского шарнирного многоугольника общего вида (без сонаправленных ребер). Точки многообразия  $M(L)$ , соответствующие этим конфигурациям, находятся внутри некоторых клеток клеточного разбиения  $\mathcal{K}(L)$ . На границе этих клеток можно найти вершины особого вида, описанные в Утверждении 1. Способ прокладывания путей от произвольных конфигураций до вершин на границе мы не обсуждаем.

В этом разделе построен алгоритм для прокладывания пути между двумя особыми вершинами графа  $\Gamma$ .

### *3.1. Особые вершины графа $\Gamma$*

*Утверждение 1. В клеточном комплексе  $M(L)$  на границе любой клетки  $\alpha$  максимальной размерности найдется хотя бы одна вершина  $\alpha'$ , такая что:*

- 1. В метке вершины  $\alpha'$  элементы 1, 2, 3 находятся в разных множествах;*
- 2. Одно из множеств метки вершины  $\alpha'$  – одноэлементное (то есть, учитывая пункт 1, является одним из множеств  $\{1\}$ ,  $\{2\}$ ,  $\{3\}$ ).*

*Доказательство.* Пусть в метке клетки  $\alpha$  элементы 1, 2, 3 расположены по возрастанию по часовой стрелке (другой случай рассматривается аналогично). Метка имеет вид  $(\{1\} a \{2\} b \{3\} c)$ , где  $a, b, c$  – некоторые последовательности одноэлементных множеств. Рассмотрим два возможных случая:

1.  $\{1, c\}$  и  $\{2, b\}$  – короткие множества. Пусть  $a'$  – некоторое (возможно, пустое) максимальное по включению подмножество множества  $a$  такое, что множество  $\{1, c, a'\}$  – короткое. Тогда либо  $a = a'$ , либо для любого  $i \in a'' = a \setminus a'$  множество  $\{1, c, a', i\}$  – длинное, а значит, множество  $\{1, c, a', 3\}$  – тоже длинное. В обоих случаях  $\{2, b, a''\}$  – короткое. Значит, следующее разбиение является допустимым:

$$(\{1, c, a'\} \{2, b, a''\} \{3\}).$$

2. Одно из множеств  $\{1, c\}$  и  $\{2, b\}$  – длинное (оба одновременно быть длинными не могут, т. к. их сумма должна быть меньше периметра многоугольника). Пусть это будет множество  $\{1, c\}$ . Тогда рассмотрим два случая:

- (a)  $\{1, a\}$  – короткое. Кроме того,  $\{3, b\}$  – тоже короткое, поскольку  $\{1, c\}$  – длинное. Повторяя рассуждения из первого пункта, получаем подходящее допустимое разбиение:

$$(\{1, a, c'\} \{2\} \{3, b, c''\}).$$

- (b)  $\{1, a\}$  – длинное. Тогда  $\{3, b, c\}$  – короткое. Кроме того,  $\{2, a\}$  – короткое, поскольку  $\{1, c\}$  – длинное. Значит, следующее разбиение является допустимым:

$$(\{1\} \{2, a\} \{3, b, c\}).$$

Мы построим путь по ребрам графа  $\Gamma$  между двумя произвольными вершинами, подходящими под условия Утверждения 1. Каждый шаг пути – это переход по одному ребру графа.

Для пары  $i, j \in \{1, 2, 3\}$  обозначим через  $i_j$  множество тех элементов, которые в метке первой вершины находятся в одном множестве с элементом  $i$ , а в метке второй вершины – в одном множестве с элементом  $j$ . При этом мы не включаем  $i$  в множество  $i_i$ .

В течение путей мы будем иногда разбивать такие множества, например, мы представим  $2_3 = 2'_3 \cup 2''_3$  и перенесем  $2'_3$  в другое подмножество метки. При этом каждый раз переносимое множество  $i'_j$  является некоторым (возможно, пустым) максимальным по включению множеством, которое можно перенести (так, чтобы разбиение оставалось допустимым).

### 3.2 Алгоритм построения пути, не меняющего ориентацию старшей тройки ребер

Пусть в начальной и конечной вершине искомого пути элементы 1, 2 и 3 идут в одном и том же циклическом порядке. Пусть они расположены по возрастанию по часовой стрелке (второй случай обрабатывается аналогично). Рассмотрим два возможных случая.

- Одноэлементное множество в метках обеих вершин одно и то же. Пусть оно будет  $\{1\}$  (остальные случаи обрабатываются аналогично). Тогда метка первой вершины выглядит так:

$$(\{1\} \{2, 2_2, 2_3\} \{3, 3_2, 3_3\}).$$

Путь между вершинами строится следующим образом:

1. Вторая вершина пути:

$$(\{1, 2'_3\} \{2, 2_2, 2''_3\} \{3, 3_2, 3_3\}).$$

2. Имеем либо для любого  $i \in 2''_3$   $\{1, 2'_3, i\}$  – длинное, а значит, либо  $\{1, 2'_3, 3\}$  – длинное, либо  $2''_3 = \emptyset$ . В обоих случаях множество  $\{2_2, 2''_3, 3_2\}$  – короткое. Третья вершина пути:

$$(\{1, 2'_3\} \{2, 2_2, 2''_3, 3_2\} \{3, 3_3\}).$$

3. Множество  $\{3, 3_3, 2''_3\}$  – короткое, так как оно – подмножество одного из множеств финальной метки. Четвертая вершина пути:

$$(\{1, 2'_3\} \{2, 2_2, 3_2\} \{3, 3_3, 2''_3\}).$$

4. Пятая, конечная вершина пути:

$$(\{1\} \{2, 2_2, 3_2\} \{3, 3_3, 2_3\}).$$

- Одноэлементные множества клеток различны. Пусть в первой вершине это  $\{1\}$ , а во второй –  $\{2\}$  (остальные случаи обрабатываются аналогично). Тогда метка первой вершины выглядит так:

$$(\{1\} \{2, 2_1, 2_3\} \{3, 3_1, 3_3\}).$$

Путь между вершинами строится следующим образом:

1. Вторая вершина пути:

$$(\{1, 3_1\} \{2, 2_1, 2_3\} \{3, 3_3\}).$$

2. Третья вершина пути:

$$(\{1, 3_1\} \{2, 2_1\} \{3, 3_3, 2_3\}).$$

3. Четвертая, конечная вершина пути:

$$(\{1, 2_1, 3_1\} \{2\} \{3_3, 2_3\}).$$

Таким образом, путь, не меняющий ориентации тройки  $(1, 2, 3)$ , требует не больше четырех переходов по ребрам графа.

*3.3 Алгоритм построения пути, меняющего ориентацию старшей тройки ребер*

Пусть в начальной и конечной вершине искомого пути элементы 1, 2 и 3 идут в различном циклическом порядке. Для определенности пусть в первой вершине они идут по возрастанию по часовой стрелке. Известно [1], что эти вершины находятся в одной компоненте связности пространства  $M(L)$  тогда и только тогда, когда множество  $\{2, 3\}$  – короткое. Если оно является длинным, путей между этими вершинами нет. Пусть оно короткое.

Возможны четыре различных случая.

- Одноэлементные множества этих вершин совпадают и не равны  $\{1\}$ . Пусть эти множества равны  $\{2\}$  (второй случай рассматривается аналогично). Тогда метка первой вершины выглядит так:

$$(\{1, 1_1, 1_3\} \{2\} \{3, 3_1, 3_3\}).$$

Путь между вершинами строится следующим образом:

1. Вторая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 1_3, 3'_1, 3'_3\} \{2\} \{3, 3''_1, 3''_3\}).$$

2. Заметим, что  $\{3''_1, 3''_3\} \neq \emptyset$ , так как иначе первое множество было бы длинным. Третья вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 1_3, 3'_1, 3'_3\} \{2, 3\} \{3''_1, 3''_3\}).$$

3. Для любого  $i \in \{3''_1, 3''_3\}$  имеем  $\{1, 1_1, 1_3, 3'_1, 3'_3, i\}$  – длинное, следовательно, и  $\{1, 1_1, 1_3, 3'_1, 3'_3, 3\}$  – тоже длинное, а значит,  $\{2, 3''_1, 3''_3\}$  – короткое. Четвертая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 1_3, 3'_1, 3'_3\} \{3\} \{2, 3''_1, 3''_3\}).$$

4. Пятая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 3'_1\} \{3, 1_3, 3'_3\} \{2, 3''_1, 3''_3\}).$$

5. Шестая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 3'_1\} \{3, 1_3, 3_3\} \{2, 3''_1\}).$$

6. Седьмая, конечная вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 3_1\} \{3, 1_3, 3_3\} \{2\}).$$

- Одноэлементные множества этих вершин различны и не равны  $\{1\}$ . Пусть у первой вершины одноэлементное множество –  $\{2\}$  (второй случай – обрабатывается обращением аналогичного пути для другой ориентации старшей тройки ребер). Тогда метка первой вершины выглядит так:

$$(\{1, 1_1, 1_2\} \{2\} \{3, 3_1, 3_2\}).$$

Путь между вершинами строится следующим образом:

1. Вторая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 1_2, 3'_1, 3'_2\} \{2\} \{3, 3''_1, 3''_2\}).$$

2. Заметим, что  $\{3'_1, 3''_2\} \neq \emptyset$ , так как иначе первое множество было бы длинным. Третья вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 1_2, 3'_1, 3'_2\} \{2, 3\} \{3''_1, 3''_2\}).$$

3. Для любого  $i \in \{3''_1, 3''_2\}$  имеем  $\{1, 1_1, 1_3, 3'_1, 3'_2, i\}$  – длинное, следовательно, и  $\{1, 1_1, 1_3, 3'_1, 3'_2, 3\}$  – тоже длинное, а значит,  $\{2, 3''_1, 3''_2\}$  – короткое. Четвертая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 1_2, 3'_1, 3'_2\} \{3\} \{3''_1, 3''_2, 2\}).$$

4. Поскольку  $l_3 \leq l_2$ , множество  $\{3, 1_2, 3'_2\}$  не превосходит  $\{2, 1_2, 3'_2\}$ , а значит, является коротким. Пятая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 3'_1\} \{3, 1_2, 3'_2\} \{2, 3''_1, 3''_2\}).$$

5. Шестая вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 3_1\} \{3, 1_2, 3'_2\} \{2, 3''_2\}).$$

6. Седьмая, конечная вершина пути:

$$(\{1, 1_1, 3_1\} \{3\} \{2, 1_2, 3_2\}).$$

- Одноэлементные множества вершин различны, и ровно одно из них –  $\{1\}$ . Пусть оно будет во второй вершине, а одноэлементное множество первой вершины будет  $\{2\}$  (второй случай обрабатывается обращением аналогичного пути для другой ориентации старшей тройки ребер). Тогда метка первой вершины выглядит так:

$$(\{1, 1_2, 1_3\} \{2\} \{3, 3_2, 3_3\}).$$

Путь между вершинами строится следующим образом:

1. Вторая вершина пути:

$$(\{1, 1_2, 1_3, 3'_2, 3'_3\} \{2\} \{3, 3''_2, 3''_3\}).$$

2. Заметим, что  $\{3''_2, 3''_3\} \neq \emptyset$ , так как иначе  $\{1, 1_2, 2_3, 3'_2, 3'_3\}$  было бы длинным. Третья вершина пути:

$$(\{1, 1_2, 2_3, 3'_2, 3'_3\} \{2, 3\} \{3''_2, 3''_3\}).$$

3. Для любого  $i \in \{3'_1, 3''_2\}$  имеем  $\{1, 1_2, 1_3, 3'_1, 3'_2, i\}$  – длинное, следовательно, и  $\{1, 1_2, 1_3, 3'_1, 3'_2, 3\}$  – тоже длинное, а значит,  $\{2, 3''_1, 3''_2\}$  – короткое. Четвертая вершина пути:

$$(\{1, 1_2, 1_3, 3'_1, 3'_2\} \{3\} \{2, 3''_2, 3''_3\}).$$

4. Пятая вершина пути:

$$(\{1, 1_2, 1_3, 3'_1, 3'_2\} \{3, 3''_3\} \{2, 3''_2\}).$$

5. Шестая вершина пути:

$$(\{1, 1_3, 3'_1\} \{3, 3''_3\} \{2, 1_2, 3_2\}).$$

6. Седьмая, конечная вершина пути:

$$(\{1\} \{3, 1_3, 3_3\} \{2, 1_2, 3_2\}).$$

- Одноэлементные множества обеих вершин равны  $\{1\}$  Тогда метка первой вершины выглядит так:

$$(\{1\} \{2, 2_2, 2_3\} \{3, 3_2, 3_3\}).$$

Рассмотрим два случая:

1'. Множество  $\{1, 3_2, 3_3\}$  – короткое. Тогда вторая вершина пути:

$$(\{1, 3_2, 3_3\} \{2, 2_2, 2_3\} \{3\}).$$

2'. Множество  $\{2_2, 2_3\} \neq \emptyset$ , поскольку иначе  $\{1, 3_2, 3_3\}$  было бы длинным. Третья вершина пути:

$$(\{1, 3_2, 3_3\} \{2_2, 2_3\} \{3, 2\}).$$

3'. Поскольку  $\{2, 2_2, 2_3\}$  – короткое, то  $\{3, 2_2, 2_3\}$  – тоже короткое. Четвертая вершина пути:

$$(\{1, 3_2, 3_3\} \{3, 2_2, 2_3\} \{2\}).$$

4'. Пятая вершина пути:

$$(\{1, 3_3\} \{3, 2_2, 2_3\} \{2, 3_2\}).$$

5'. Шестая вершина пути:

$$(\{1, 3_3\} \{3, 2_3\} \{2, 2_2, 3_2\}).$$

6'. Седьмая, конечная вершина пути:

$$(\{1\} \{3, 2_3, 3_3\} \{2, 2_2, 3_2\}).$$

1". Множество  $\{1, 3_2, 3_3\}$  – длинное. Значит,  $\{2, 3, 2_2, 2_3\}$  – короткое. Вторая вершина пути:

$$(\{1\} \{2, 3, 2_2, 2_3\} \{3_2, 3_3\}).$$

2". Третья вершина пути:

$$(\{1, 3'_3\} \{2, 3, 2_2, 2_3\} \{3_2, 3''_3\}).$$

3". Либо  $3''_3 = \emptyset$ , либо для  $i \in 3''_3$  множество  $\{1, 3'_3, i\}$  – длинное, а значит,  $\{1, 3'_3, 3\}$  – тоже длинное. В обоих случаях множество  $\{2, 2_2, 3_2, 3''_3\}$  – короткое. Пятая вершина пути:

$$(\{1, 3'_3\} \{3, 2_3\} \{2, 2_2, 3_2, 3''_3\}).$$

4". Шестая вершина пути:

$$(\{1\} \{3, 2_3, 3'_3\} \{2, 2_2, 3_2, 3''_3\}).$$

5". Седьмая, конечная вершина пути:

$$(\{1\} \{3, 2_3, 3_3\} \{2, 2_2, 3_2\}).$$

Таким образом, путь, меняющий ориентацию тройки  $(1, 2, 3)$ , требует не больше шести переходов по ребрам графа.

**4. Заключение.** Граф  $\Gamma$  является комбинаторным приближением пространства модулей  $M(L)$  шарнирного многоугольника  $L$ . Предлагаемый алгоритм строит путь между двумя произвольными вершинами графа  $\Gamma$ , подходящими под условия Теоремы 1. Путь состоит из не более чем четырех шагов в случае, когда ориентации старшей тройки ребер в конфигурациях, определяемых этими вершинами, одинаковы, и из не более чем шести шагов в случае, когда ориентации старшей тройки ребер в этих конфигурациях различны.

## Литература

1. Farber M., Schuetz D. Homology of planar polygon spaces // *Geom. Dedicata*. 2007. no. 125. pp. 75–92.
2. Farber M., Hausmann J.-C., Schuetz D. On the conjecture of Kevin Walker // *Journal of Topology and Analysis*. 2009. no. 1. pp. 65–86.
3. Kapovich M. and Millson J. On the moduli space of polygons in the Euclidean plane // *J. Diff. Geom.* 1995. no. 42. pp. 430–464.
4. Aichholzer O., Demaine E. D., Erickson J., Hurtado F., Overmars M., Soss M., Toussaint G. Reconfiguring convex polygons // *Computational Geometry*. 2001. no. 20. pp. 85–95.
5. Hausmann J.-C. Controle des bras articulés et transformations de Mobius // *L'Enseignement Mathématique*. 2005. no. 51 pp. 87–115.
6. Khimshiashvili G., Panina G., Siersma D. Coulomb control of polygonal linkages // *J. of Dynamical and Control Systems*. 2014. vol. 4. no. 20. pp. 491–501.
7. Lenhart W. J., Whitesides S. H. Reconfiguring closed polygonal chains in Euclidean  $d$ -space // *Discrete and Computational Geometry*. 1995. vol. 1. no. 13. pp. 123–140.
8. Panina G., Siersma D. Motion planning and control of a planar polygonal linkage // arXiv:1401.7860. to appear in *J. Symb. Comp.*
9. Panina G. Moduli space of planar polygonal linkage: a combinatorial description // arXiv:1209.3241.

## References

1. Farber M., Schuetz D. Homology of planar polygon spaces. *Geom. Dedicata*. 2007. no. 125. pp. 75–92.
2. Farber M., Hausmann J.-C., Schuetz D. On the conjecture of Kevin Walker. *Journal of Topology and Analysis*. 2009. no. 1. pp. 65–86.
3. Kapovich M. and Millson J. On the moduli space of polygons in the Euclidean plane. *J. Diff. Geom.* 1995. no. 42. pp. 430–464.
4. Aichholzer O. et al. Reconfiguring convex polygons. *Computational Geometry*. 2001. no. 20. pp. 85–95.
5. Hausmann J.-C. Controle des bras articulés et transformations de Mobius. *L'Enseignement Mathématique*. 2005. no. 51. pp. 87–115.
6. Khimshiashvili G., Panina G., Siersma D. Coulomb control of polygonal linkages. *J. of Dynamical and Control Systems*. 2014. vol. 4. no. 20. pp. 491–501.
7. Lenhart W. J., Whitesides S. H. Reconfiguring closed polygonal chains in Euclidean  $d$ -space. *Discrete and Computational Geometry*. 1995. vol. 1. no. 13. pp. 123–140.

8. Panina G., Siersma D. Motion planning and control of a planar polygonal linkage. arXiv:1401.7860. to appear in *J. Symb. Comp.*
9. Panina G. Moduli space of planar polygonal linkage: a combinatorial description. arXiv:1209.3241.

**Жукова Алена Михайловна** – к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры проблем конвергенции естественных и гуманитарных наук факультета свободных искусств и наук, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ). Область научных интересов: шарнирные механизмы, теория Морса, пространства модулей, комбинаторная геометрия. Число научных публикаций – 7. a.zhukova@spbu.ru; Университетская наб. д. 7/9, Санкт-Петербург, 199034; р.т.: 8-931-239-59-13.

**Zhukova Alena Mikhailovna** – Ph.D., senior lecturer of the problems of convergence in natural sciences and humanities department of liberal arts and sciences faculty, Saint Petersburg State University (SPbSU). Research interests: linkages, Morse theory, moduli spaces, combinatorial geometry. The number of publications – 7. a.zhukova@spbu.ru; 7/9, Universitetskaya nab., Saint-Petersburg, 199034, Russia; office phone: 8-931-239-59-13.

**Поддержка исследований.** Работа осуществлена при частичной финансовой поддержке конкурса "Молодая математика России". Автор благодарна Г. Ю. Паниной за постановку задачи.

**Acknowledgements.** The work is partly supported by the contest «Young Russian Mathematics», the author is thankful to G. Yu. Panina for formulating the problem.

## РЕФЕРАТ

### **Жукова А. М. Навигационный алгоритм для плоского шарнирного многоугольника.**

Мы работаем с конфигурациями плоских шарнирных многоугольников. Такой многоугольник лежит на плоскости и может двигаться на ней, изменяя углы между своими сторонами. При этом разрешены самопересечения и самонакрытия. Пространство конфигураций такого многоугольника, профакторизованное по действию группы движений плоскости, сохраняющих ориентацию, называется *пространством модулей*, или *конфигурационным пространством шарнирного многоугольника*.

Несмотря на то, что число степеней свободы растет с увеличением ребер шарнирного многоугольника, управление его движениями оказывается нетривиальной задачей, так как растет и топологическая сложность его конфигурационного пространства.

В статье предложен быстрый алгоритм, строящий путь между двумя произвольными конфигурациями шарнирного многоугольника общего вида. Полученный путь содержит не более восьми шагов. Этот результат является улучшением результатов Г. Паниной и Д. Сирсмы (семнадцать шагов алгоритма в худшем случае). Мы используем вершинно-реберный граф  $\Gamma$  клеточного разбиения конфигурационного пространства, введенного Г. Паниной. Реализация переходов по ребрам этого графа равносильна изгибаниям на плоскости некоторых шарнирных четырехугольников, решение этой задачи построили Г. Панина и Д. Сирсма. Мы выбираем особые вершины этого графа и доказываем, что на границе произвольной клетки разбиения максимальной размерности найдется такая особая вершина. В статье мы конструируем путь по ребрам этого графа между двумя произвольными особыми вершинами за не более чем шесть переходов. Еще два шага нужны для соединения точек, соответствующих произвольным конфигурациям с этими особыми вершинами, что выходит за пределы данной статьи.

## SUMMARY

### *Zhukova A. M.* **Navigation Algorithm for a Planar Polygonal Linkage.**

We work with configurations of polygonal linkages. A polygonal linkage can be considered as a polygon in the plane that can bend by changing its angles. Self-intersections and self-overlappings of the edges and vertices of the polygon are allowed. The space of all possible configurations of such a polygon factorized by the action of orientation-preserving isometries is called the moduli space or the configuration space of a polygonal linkage.

Although the number of the degrees of freedom increases with the number of edges of a polygon, the navigation problem is not a simple one, since the topological complexity of its moduli space increases as well.

We present a fast algorithm that constructs a path between two arbitrary configurations of a generic polygonal linkage. The constructed path consists of at most eight steps. This result is an improvement of the earlier results of G. Panina and D. Siersma (seventeen steps in the worst case).

We use the vertex-edge graph  $\Gamma$  of a cellular complex on the configuration space, introduced by G. Panina. The mechanical realisation of the move along an edge of this graph is a bending of some quadrilateral linkage. The algorithm for this realisation was constructed by G. Panina and D. Siersma. In our algorithm we use a special kind of the vertices of  $\Gamma$ . We prove that there is at least one vertex of such kind on the boundary of every cell of maximal dimension. We give the construction of a path between two vertices of this special kind along the edges of  $\Gamma$  that contains at most six edges. Two more steps are needed to connect two points on the moduli space, that correspond to two arbitrary configurations, with two special vertices, which goes beyond the scope of this paper.

## РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ



Вып. 3(46)

ТРУДЫ СПИИРАН  
proceedings.spiiras.nw.ru

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных, так как это значительно ускорит процесс оформления метаданных к новым статьям.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. Объем основного текста – от 5 до 20 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

Не допускается использования цветных шрифтов, цветных выделений и цветных рисунков. Статьи должны быть полностью готовы к черно-белой печати.

Основная часть текста статьи разбивается на разделы, среди которых являются обязательными: введение, хотя бы один «содержательный» раздел и заключение. Допускается также мотивированное содержанием и структурой материала выделение подразделов.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

ISSN 2078-9181



9 772078 918785 >

С-Пб  
2016