

*Intellectual Technologies  
on Transport  
No 4*



*Интеллектуальные технологии  
на транспорте  
№ 4*

*Санкт-Петербург  
St. Petersburg  
2015*

# Интеллектуальные технологии на транспорте

## № 4, 2015

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет.  
Публикует статьи на русском и английском языках с результатами исследований и практических достижений  
в области интеллектуальных технологий и сопутствующих им научных исследований

Журнал основан в 2015 году

---

### Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВПО ПГУПС)

---

### Сопредседатели редакционного совета

Илларионов А. В., вице-президент ОАО «РЖД», Москва, РФ  
Панычев А. Ю., ректор ПГУПС, С-Петербург, РФ

### Главный редактор

Хомоненко А. Д., проф., С-Петербург, РФ

---

### Редакционный совет

Глухов А. П., зам. нач. Деп. без. ОАО «РЖД», Москва, РФ  
Дудин А. Н., д. т. н., проф., БГУ, Минск, Белоруссия  
Корниенко А. А., проф., ПГУПС, С-Петербург, РФ  
Ковалец П., проф., Тех. Унив-тет, Варшава, Польша  
Лыков Р. Ю., нач. ГВЦ ОАО «РЖД», Москва, РФ  
Меркурьев Ю. А., проф., РТУ, Рига, Латвия

Нестеров В. М., проф., ген. дир. ЦР EMC2, С-Петербург  
Пустарнаков В. Ф., ген. дир. «Газинформсервис»,  
С-Петербург, РФ  
Титова Т. С., проф., прорект. ПГУПС, С-Петербург, РФ  
Федоров А. Р., ген. дир. «ДигДез», С-Петербург, РФ  
Юсупов Р. М., проф., чл.-корр. РАН, С-Петербург, РФ

---

### Редакционная коллегия

Бубнов В. П., проф., С-Петербург, РФ – зам. гл. ред.  
Ададулов С. Е., проф., С-Петербург, РФ  
Атилла Элчи, проф., университет Аксарай, Турция  
Безродный Б. Ф., проф., МАДИ, Москва, РФ  
Благовещенская Е. А., проф., С-Петербург, РФ  
Булавский П. Е., д. т. н., доц., С-Петербург, РФ  
Василенко М. Н., проф., С-Петербург, РФ  
Гуда А. Н., проф., Ростов-на-Дону, РФ  
Железняк В. К., проф., ПГУ, Белоруссия  
Заборовский В. С., проф., С-Петербург, РФ  
Зегжда П. Д., проф., С-Петербург, РФ  
Канаев А. К., д. т. н., доц., С-Петербург, РФ  
Когут А. Т., проф., Омск, РФ  
Котенко А. Г., д. т. н., доц., С-Петербург, РФ  
Куренков П. В., проф., Москва, РФ  
Лецкий Э. К., проф., Москва, РФ

Мирзоев Т. асс. проф., Джорджия, США  
Наседкин О. А., доц., С-Петербург, РФ  
Никитин А. Б., проф., С-Петербург, РФ  
Охтилев М. Ю., проф., С-Петербург, РФ  
Соколов Б. В., проф., С-Петербург, РФ  
Таранцев А. А., проф., С-Петербург, РФ  
Утепбергенов И. Т., проф., Алма-Аты, Казахстан  
Филипченко С. А., доц., Москва, РФ  
Фозилов Ш. Х., проф., Ташкент, Узбекистан  
Фу-Ниан Ху, проф, Джангсу, Китай  
Хабаров В. И., проф., Новосибирск, РФ  
Ходаковский В. А., проф., С-Петербург, РФ  
Чехонин К. А., проф., Хабаровск, РФ  
Яковлев В. В., проф., С-Петербург, РФ  
Ялышев Ю. И., проф., Екатеринбург, РФ

---

### Адрес редакции

190031 Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ПГУПС  
email: [itt-pgups@yandex.ru](mailto:itt-pgups@yandex.ru), сайт: <http://itt-pgups.ru/>

---

ISSN 2413-2527

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,  
свидетельство Эл №ФС77-61707 от 07 мая 2015 г.

Журнал зарегистрирован в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

Все выпуски журнала представлены в электронной библиотеке «CyberLeninka»  
<http://cyberleninka.ru/journal/n/intellektualnye-tehnologii-na-transporte>

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 2015.  
Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе периодиче-  
ского издания-журнала «Интеллектуальные технологии на транспорте» статей по текущим экономическим, политическим,  
социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием автора статьи и сетевого электронного научного  
периодического издания журнала «Интеллектуальные технологии на транспорте»

До 05.02.2016 г. идёт приём статей для 1-го номера журнала

# Intellectual Technologies on Transport

## Issue № 4, 2015

Network electronic scientific journal, open access. It publishes articles in Russian and English with the results of research and practical achievements in the field of intelligent technologies and associated research

Founded in 2015

---

### Founder and Publisher

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education  
«Petersburg State Transport University»

---

### Co-chairs of the Editorial Council

Illarionov A. V., Vice-President of JSC «Russian Railways», Moscow, Russia  
Panychev A. Yu., rector of PSTU, St. Petersburg, Russia

### Editor-in-Chief

Khomonenko A. D., Prof., St. Petersburg, Russia

---

### Editorial Council Members

Glukhov A. P., deputy. beg. Dep. no. JSC «Russian Railways», Moscow, Russia	Nesterov V. M., Prof., director general at Russian EMC2 development center, St. Petersburg
Dudin A. N., Prof., BSU, Minsk, Belarus	Pustarnakov V. F., CEO at «Gazinformservice» LTD., St. Petersburg, Russia.
Kornienko A. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia	Titova T. S., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia
Kovalets P., Prof., Tech. University, Warsaw, Poland	Fedorov, CEO at «Digital Design» LTD., St. Petersburg, Russia
Lykov R. Yu., director at MCC – branch of JSC «Russian Railways», Russia	Yusupov R. M., Prof., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia
Merkuryev Yu. A., Prof., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia	

---

### Editorial Board Members

Bubnov V. P., Prof., St. Petersburg, Russia – Deputy Editor-in-Chief	Letsky Ad. K., Prof., Moscow, Russia
Adadurov S. E., Prof., St. Petersburg, Russia	Mirzoev T. Ass. Prof., Georgia, USA
Attila Elci, Prof., Aksaray, Turkey	Nasedkin O. A., Ass. Prof., St. Petersburg, Russia
Bezrodny B. F., Prof., Moscow, Russia Blagoveshenskaya E. A., Prof., St. Petersburg, Russia	Nikitin A. B., St. Petersburg, Russia
Bulavsky P. E., Dr. Sc., Ass. Prof., St. Petersburg, Russia	Okhtilev M. Yu., Prof., St. Petersburg, Russia
Vasilenko M. N., Prof., St. Petersburg, Russia	Sokolov B. V., Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
Guda A. N., Prof., Rostov-on-Don, Russia	Tarantsev A. A., Prof., St. Petersburg, Russia
Geleznyak V. K., Prof., ПГУ, Белоруссия	Utepbergenov I. T., Prof., Alma-Ata, Khazakhstan
Zaborovsky V. S., Prof., St. Petersburg, Russia	Filipchenko S. A., Ass. Prof., Moscow, Russia
Zegzda P. D., Prof., St. Petersburg, Russia	Fozilov S. Kh., Prof., Tashkent, Uzbekistan
Kanayev A. K., Ass. Prof., St. Petersburg, Russia	Fu-Nian Hu, Prof., Jiangsu, China
Kogut A. T., Prof., Omsk, Russia	Khabarov V. I., Prof., Novosibirsk, Russia
Kotenko A. G., Dr. Sc., Ass. Prof., St. Petersburg, Russia	Khodakosky V. A., Prof., St. Petersburg, Russia
Kurenkov P. V., Prof., Moscow, Russia	Chekhonin K. A., Prof., Khabarovsk, Russia
	Jakovlev V. V., Prof., St. Petersburg, Russia
	Jalyshev Yu. I., Prof., Ekaterinburg, Russia

---

### Adress

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, 2–108  
email: [itt-pgups@yandex.ru](mailto:itt-pgups@yandex.ru), <http://itt-pgups.ru/>

---

ISSN 2413-2527

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications and Mass Media, EL №FS77-61707 testimony from May 7, 2015

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

All issues of the journal are presented in electronic library «CyberLeninka»  
<http://cyberleninka.ru/journal/n/intellektualnye-tehnologii-na-transporte>

© Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Petersburg State Transport University», 2015.  
The reproduction in the press, as well as a message broadcast or cable published as part of the periodical – journal «Intellectual Technologies on Transport» articles on current economic, political, social and religious issues with the obligatory indication of the author, and the network of electronic scientific periodical journal «Intellectual Technologies on Transport»

Articles for the 1st issue of the journal are received until 05.02.2016

## Содержание

<i>Соловьев В. П., Корнев Д. А.</i> Вычислительный комплекс системы управления движением поездов . . . . .	5
<i>Теселкин А. А., Теселкина К. В.</i> Оценка параметров модели транспортных корреспонденций по данным сотовых операторов . . . . .	10
<i>Денисов А. В., Демин А. В., Летуновский А. В.</i> Опτικο-цифровые системы и комплексы космического назначения . . . . .	16
<i>Еремин А. С.</i> Система массового обслуживания с детерминированным временем задержки начала обслуживания. . . . .	23
<i>Бубнов В. П., Никитчин А. А., Сергеев С. А.</i> Программный комплекс автоматизированного геодезического мониторинга искусственных сооружений для высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Казань – Екатеринбург» . . . . .	27
<i>Рыжиков Ю. И., Уланов А. В.</i> Применение гиперэкспоненциальной аппроксимации в задачах суммирования потоков . . . . .	34
<i>Кулешов С. В., Зайцева А. А., Марков В. С.</i> Ассоциативно-онтологический подход к обработке текстов на естественном языке. . . . .	40
<i>Козлов В. В., Абдурахимов А. А.</i> Структурно-параметрический синтез комплекса обеспечения живучести структурной технической системы . . . . .	46
<i>Жигалко Е. Ф.</i> Особенность асимптотических свойств интегральных инвариантов . . . . .	55

## Contents

<i>Solowjov V. P., Kornev D. A.</i> Computing Complex of Train Control System . . . . .	5
<i>Tesselkin A. A., Tesselkina K. V.</i> Estimation of the Parameters of an Origin-Destination Movement Model from Cellular Operator Data. . . . .	10
<i>Denisov A. V., Demin A. V., Letunovskiy A. V.</i> Optical Digital Systems and Complexes for Space Applications . . . . .	16
<i>Eremin A. S.</i> A Queueing System with Determined Delay in Starting the Service . . . . .	23
<i>Bubnov V. P., Nikitchin A. A., Sergeev S. A.</i> Software for Automated Geodetic Monitoring of Artificial Structures for High-speed Railway “Moscow – Kazan – Yekaterinburg” . . . . .	27
<i>Ryzhikov Yu. I., Ulanov A. V.</i> Using Hyperexponential Approximation in the Summation of Flows Problems. . . . .	34
<i>Kuleshov S. V., Zaytseva A. A., Markov V. S.</i> Associative-Ontological Approach to Natural Language Texts Processing . . . . .	40
<i>Kozlov V. V., Abdurakhimov A. A.</i> Structural-Parametrical Synthesis of a Complex of Survivability of the Structural Technical System. . . . .	46
<i>Zhigalko E. Th.</i> A Singularity of Integral Moment Invariants. . . . .	55

# Вычислительный комплекс системы управления движением поездов

Проф. Соловьев В. П.  
wsolowjow@gmail.com

Инж. Корнев Д. А.  
da.kornev@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» (МИИТ)  
Москва, Российская Федерация,  
ул. Образцова, 11с1, Москва, 127055  
8 (495) 684-24-32  
pk\_miit@mail.ru

**Аннотация.** Описан процесс разработки и проектирования виртуального вычислительного комплекса с учетом решаемых задач и нагрузки на аппаратное обеспечение в зависимости от количества обслуживаемых единиц подвижного состава.

**Ключевые слова:** вычислительный комплекс, система управления поездом, расчет нагрузки на вычислительный комплекс, виртуализация, мониторинг вычислительной системы, структура вычислительного комплекса.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для непрерывного контроля поездной ситуации на участке железной дороги (ж. д.) и управления движением используется система диспетчерской централизации (ДЦ). Получившая наибольшее распространение система ДЦ «Сетунь» состоит из современной системы телемеханики с высокоскоростным обменом информацией между центральным распорядительным постом (ЦП) и линейными исполнительными пунктами (ЛП) и может контролировать участок ж. д. протяженностью до 1200 км (рис. 1). На ЦП располагаются автоматизированные рабочие места (АРМ) поездных диспетчеров ДЦ, сервер для хранения всей оперативной и справочной информации и компьютеры рабочих станций (РС) «Связь», объединенные в локальную вычислительную сеть (ЛВС). С помощью сервера ДЦ взаимодействуют с информационными системами. Рабочие станции «Связь» взаимодействуют с линейными пунктами ДЦ по линиям связи через встроенные в них модемы.

Одновременно с развитием систем ДЦ в последние десятилетия активно создавались системы автоведения поездов, в настоящее время ими оборудовано более пяти тысяч магистральных локомотивов и электропоездов (ВЛ10, ВЛ11, ВЛ80 С, ВЛ85, 2ЭС5 К 3ЭС5 К, ЭП20, ТЭП70 и др.) [1]. Система автоведения – это аппаратно-вычислительный комплекс, который рассчитывает оптимальный алгоритм следования поезда. Результаты мониторинга движения пассажирских поездов показали, что доля поездов, отклонявшихся от энергооптимального графика, при автоведении в 3–4 раза меньше, чем при ручном управлении, а экономия электроэнергии составляет в среднем от 3 до 10%.

Однако пока на территории России не применяются методы, позволяющие обеспечивать динамическое взаимодей-

ствие систем ДЦ с системами автоведения. Такое взаимодействие позволит повысить пропускную способность ж. д., снизить расход энергоресурсов и износ оборудования.

## АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ АВТОВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Структура системы автоведения тепловоза УСАВП-Т включает в себя (рис. 1): КМ – контроллер машиниста; АЛС – автоматическую локомотивную сигнализацию; МКС – модуль коммутации и сопряжения; БС – блок процессорный; БМС – блок мобильной связи; БПЛК – блок питания локомотивный; БИВМ – блок измерения высоковольтный модульный; БИД – блок измерения диагностический; БК – бортовой компьютер; БСГД – блок процессорный с графическим дисплеем; ВК – высоковольтную камеру; КЭО – электропневматический клапан тепловоза; ПМ – пневмомодуль; ДД1–ДД4 – датчики давления тормозной системы; ДТ1–ДТ3 – датчики топливной системы и температуры наружного воздуха.

УСАВП-Т снимает с датчиков и аппаратов каждой секции тепловоза более 100 сигналов: для величин, определяющих безаварийность работы систем, – с интервалом времени 10 мс; для величин, определяющих режим управления тепловозом, – с интервалом времени 100 мс [2].

Для интеграции системы автоведения локомотива в систему ДЦ «Сетунь» разработана структура системы, содержащей дополнительный вычислительный комплекс (ВК), который позволяет осуществлять текущее взаимодействие обеих систем при рациональном использовании вычислительных ресурсов (рис. 1). Вычислительный комплекс принимает, распределяет, обрабатывает и передает оперативную информацию между ЛВС ДЦ и системами автоведения локомотивов, находящихся на участке ж. д., контролируемом ДЦ. При этом ВК выполняет функции:

1) шлюза для получения входной информации от ЛВС ДЦ, системы автоведения локомотива, комплекса локомотивных устройств обеспечения безопасности (КЛУБ), а также передачи выходной информации соответствующим системам;

2) формирования базы данных о характеристиках участка ж. д., обслуживаемого данной системой ДЦ (о профилях и длине соответствующих участков), а также о постоянных и временных ограничениях скорости, текущей координате поезда;

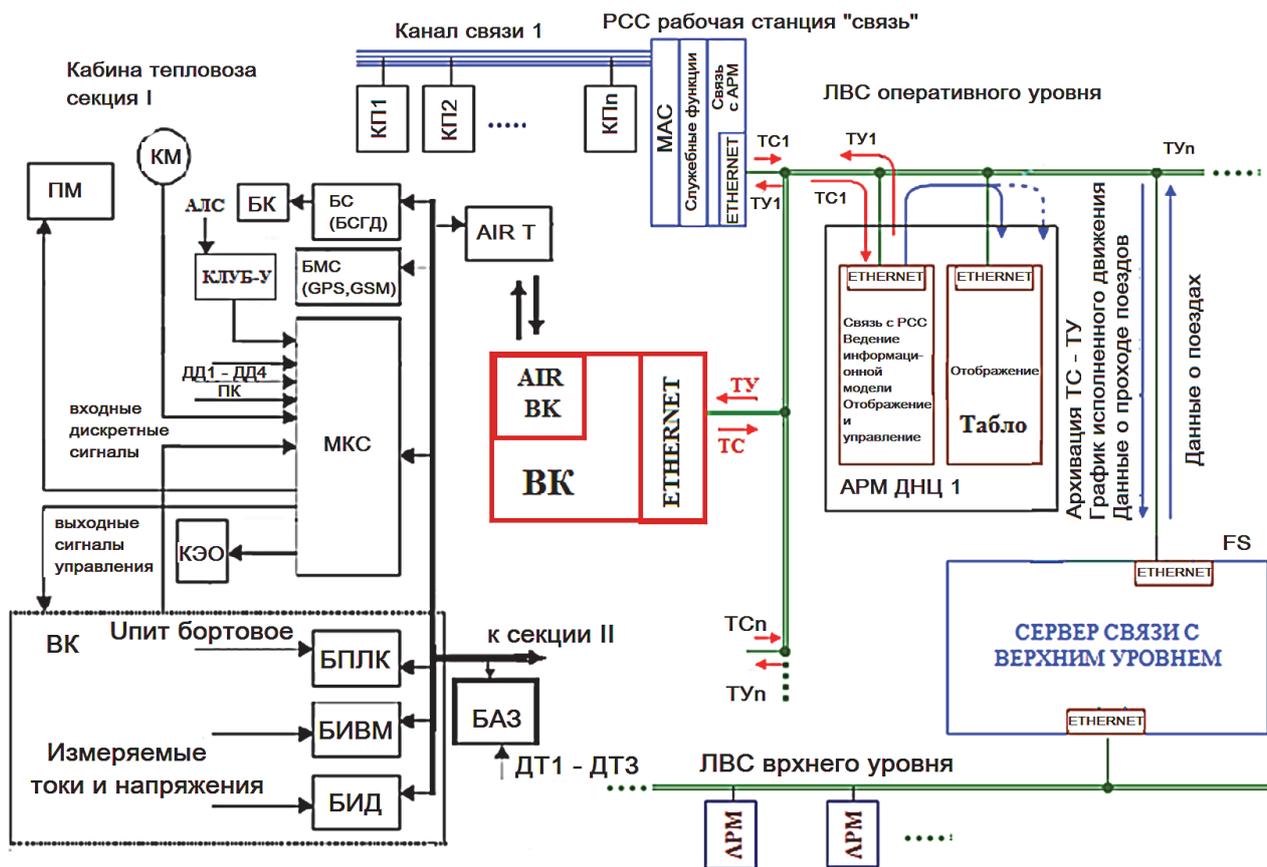


Рис. 1. Структура взаимодействия системы автоведения поезда и ВК на базе системы диспетчерской централизации «Сетунь»

- 3) формирования базы данных о параметрах поезда (типа, веса, ограничения режимов движения, числе локомотивов и вагонов поезда);
- 4) формирования базы данных кассеты регистрации КЛУБ;
- 5) формирования базы данных о срабатывании систем защиты локомотива;
- 6) формирования базы данных о значениях текущих параметров режимов работы локомотива; расчет прогнозируемой надежности систем и агрегатов локомотива;
- 7) расчета мощности, которая может быть реализована локомотивом;
- 8) решения задачи оптимального управления локомотивом;
- 9) мониторинга ВК.

Вся информация, сосредоточенная на ВК, должна быть доступна для сервера ДЦ или передаваться на него в режиме реального времени. Аналогичным образом вся оперативная информация, необходимая для управления локомотивом, должна передаваться на его бортовой компьютер. Взаимодействие системы автоведения локомотивов с ВК предлагается осуществлять по каналам спутниковой связи посредством блоков мобильной связи БМС и AIRT (тепловоза) – AIR ВК, а с сервером ДЦ – по локальной сети ETHERNET (рис. 1).

#### РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ВИРТУАЛЬНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Информация, передаваемая на ВК, должна позволять управлять каждым поездом по оптимальному алгоритму с

учетом поезда ситуации на всем участке ДЦ (а не только по показаниям ближайших напольных устройств сигнализации), что дает возможность минимизировать энергозатраты, диагностировать состояние каждого локомотива, находящегося в зоне действия ДЦ и прогнозировать его возможные отказы, контролировать состояние машиниста.

Внедрение комплексной системы управления движением поездов позволит повысить пропускную способность ж. д. за счет создания единого центра управления движением на участке ДЦ с возможностью расчета текущего оптимального графика движения. Практическая реализация такого графика не только обеспечит снижение времени следования поезда и его энергозатраты, но и повысит эффективность использования подвижного состава за счет рациональной организации работы службы ремонта.

С учетом разноплановости задач, решаемых ВК, его структуру целесообразно реализовывать с использованием средств виртуализации, предусмотрев возможность развертывания дополнительной ВМ в случае необходимости расширения функционала ВК или потери любой из существующих ВМ. Такая структура ВК позволяет:

- разделять задачи организации движения, управления локомотивами, контроля действий машинистов и диагностирования состояния локомотивов с целью разграничения доступа к информации и повышения безопасности движения;
- снижать вероятность потери информации;
- эффективно использовать ресурсы хоста как вычислительной среды.

В соответствии с решаемыми задачами структура ВК предусматривает наличие десяти ВМ (рис. 2).

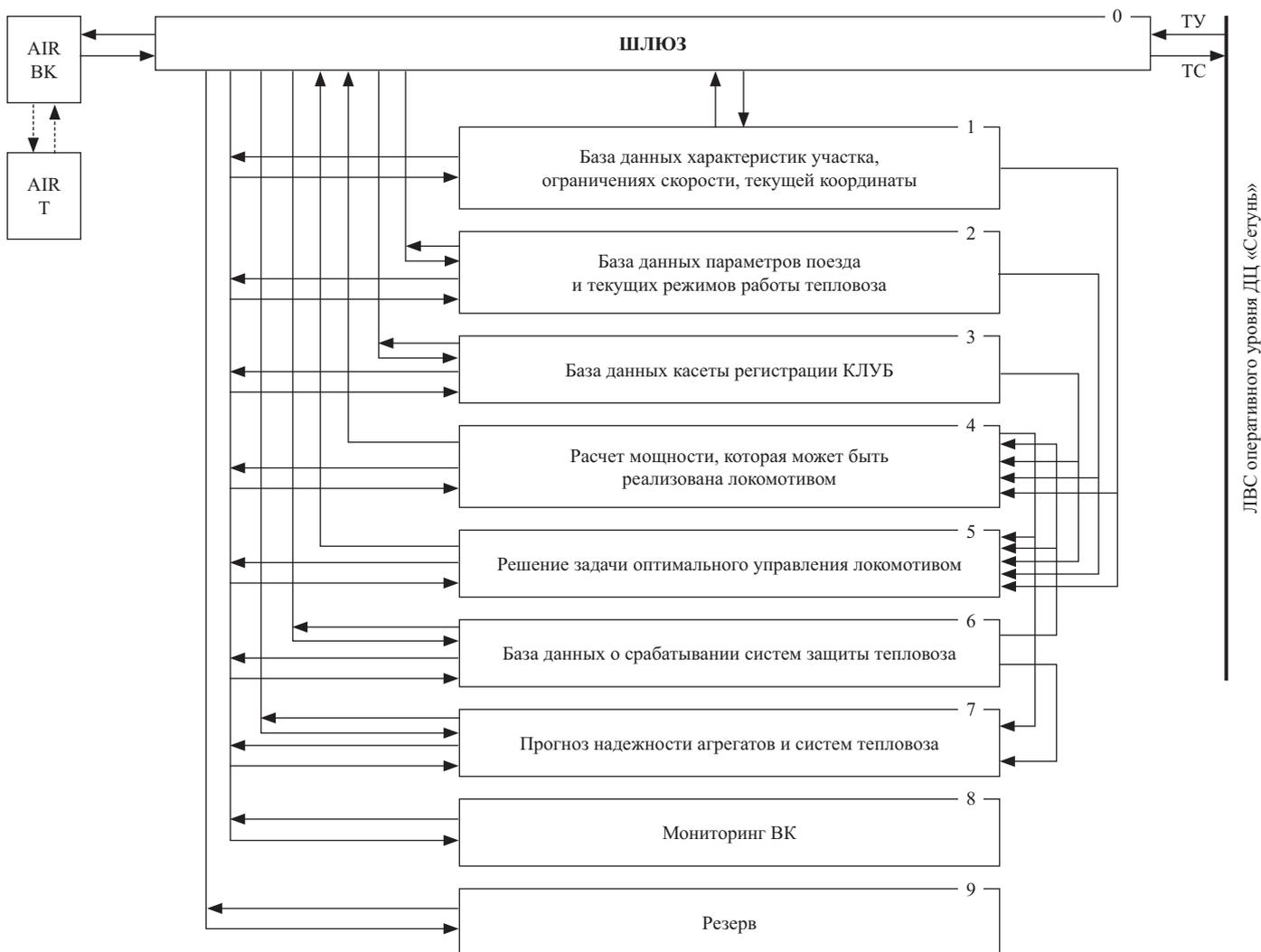


Рис. 2. Архитектура ВК системы управления движением поездов

Для расчета оптимального алгоритма управления локомотивом ВК должен иметь полную информацию о поездной ситуации на участке движения, поэтому по запросу ему должна передаваться информация о сигналах объектов контроля и объектов управления на участке.

В соответствии с Руководством, для программного обеспечения АРМ поездного диспетчера ДЦ «Сетунь» в пределах диспетчерского круга должно быть не более 20 РС «Связь»; при этом емкость канала управления (ТУ) составляет 1120 объектов, а емкость канала контроля (ТС) – 1380 объектов [3, 4]. Каждый сигнал управления представляется 19 импульсами, а каждый сигнал контроля – 20 импульсами. Таким образом, по запросу ВК от ДЦ ему должна передаваться информация о 2500 аналоговых сигналах с периодом  $T_2 = 100$  мс.

В соответствии с алгоритмом работы системы УСВП-Т вычислительный комплекс с периодом  $T_2 = 100$  мс должен принять и обработать 73 аналоговых и 60 дискретных сигналов.

Расчет требуемого ресурса ВК выполнялся исходя из алгоритмов функционирования ДЦ «Сетунь» и системы автоведения поезда. При определении нагрузки на ресурс принималось, что в соответствии с требованиями алгоритма работы системы автоведения поезда информация на ВК от каждой секции локомотива и от ДЦ «Сетунь» должна передаваться

пакетами данных с интервалом  $T_2 = 100$  мс [2]. Выяснилось, что при неблагоприятном распределении заявок на обслуживание локомотивов с учетом поддержания технологии виртуализации, резерва и функционирования системы диагностирования максимальный требуемый ресурс ВК должен составлять 6,2 ГБ.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ НА АППАРАТНЫЕ РЕСУРСЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Для моделирования процессов, происходящих в ВК, и определения вероятностных нагрузок на ресурс требовалось соблюдение двух принципиально важных условий: правдоподобной траектории нагрузки и надежной среды, в которой можно было бы проводить численные эксперименты [5]. Как отмечено в [6, 7], анализ динамики ресурсных потоков целесообразно выполнять с использованием аппарата сетей Петри.

Этот аппарат позволяет объединять преимущества графового представления и дискретной динамической модели системы, рассчитывать количественные показатели её работы, которые характеризуются параллельными и асинхронными процессами. В связи с этим для исследования работы ВК в

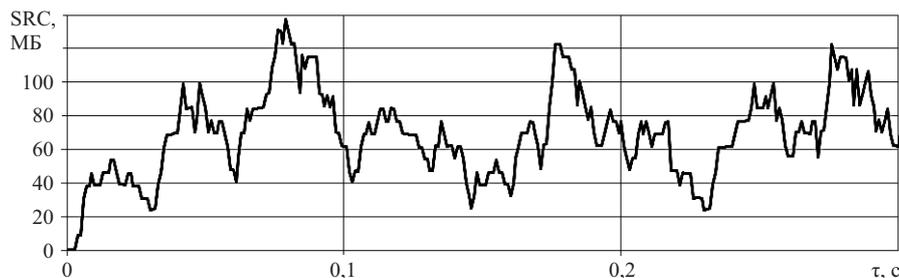


Рис. 3. Нагрузка на ресурс ВК от систем автоведения 68 поездов при поступлении заявок на обслуживание с равномерным распределением и случайным временем расчета режима работы с математическим ожиданием  $\tau_p = 15$  мс

терминах сетей Петри была разработана его динамическая модель, представленная 71 логическим уравнением.

Модель прошла верификацию при моделировании алгоритма взаимодействия системы УСАВП-Т с ДЦ «Сетунь», что подтвердило возможность ее использования для определения параметров ВК и анализа его работы.

При эксплуатации локомотивов в реальных условиях ж. д. следует ожидать, что заявки на обслуживание систем автоведения поездов будут поступать на ВК в разное время. Кроме того, необходимо учитывать, что характеристики профиля, поездная ситуация и режим работы локомотива каждые 100 мс не меняются, поэтому при расчете предполагалось, что массивы данных о параметрах и ограничениях движения могут в течение секунды многократно повторяться, что сокращает время использования ресурса ВК.

На рис. 3 приведены результаты расчета нагрузки на ресурс ВК при обслуживании заявок 68 поездов (в соответствии с допустимым интервалом двухпутного следования поездов на участке ж. д. протяженностью 1000 км). При расчетах предполагалось, что математическое ожидание времени работы ВК по обслуживанию заявки от одного локомотива на каждом периоде составляет  $\tau_p = 15$  мс, а поступление заявок на обслуживание от каждого локомотива носит случайный характер. Результаты показали, что при таких условиях максимальное значение требуемого ресурса ВК составляет 140 МБ.

При увеличении времени обработки заявок до максимального значения  $0 \leq \tau_p \leq 99$  мс и при случайном характере поступления заявок на обслуживание локомотивов нагрузка на ресурс возрастает до 320 МБ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что в среднем при эксплуатации ВК системы управления движением его ресурс только на обслуживание систем автоведения будет использоваться на 50%. Однако, учитывая нагрузку от системы мониторинга,

удельные показатели использования ресурса ВК возрастают до 73 % от рассчитанного ресурса.

Таким образом, разработана структура и метод расчета вычислительного ресурса комплексной системы управления движением поездов как единого информационно-коммуникационного пространства на основе средств цифровой связи со стандартизованными технологиями идентификации, навигации и позиционирования, обеспечивающей высокий уровень взаимодействия участников перевозочного процесса за счет интеграции их полномочий на базе вычислительного комплекса и позволяющей повысить эффективность и экономичность работы железных дорог.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Евсеев И. Система виртуализации OpenVZ. Ч. 1 / И. Евсеев. – URL : [http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-openvz\\_1/#authorN10021](http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-openvz_1/#authorN10021).
2. Williams J. G. Modeling External Consistency of Automated Systems / J. G. Williams and, L. J. LaPadula // J. High-Integrity Systems. – 1995. – Vol. 1, N 3. – P. 249–267.
3. Ширманов А. Безопасность виртуальной инфраструктуры / А. Ширманов // Открытые системы. СУБД. – 2009. – № 6. – С. 30–31.
4. Самойленко А. Защита виртуальной инфраструктуры VMware vSphere от специфических типов угроз с помощью решения vGate R2 / А. Самойленко. – URL : <http://www.vmgu.ru/articles/vgate-r2-against-treats> (дата обращения 29.07.2012).
5. Барсуков В. С. Современные технологии безопасности. Интегральный подход / В. С. Барсуков, В. В. Водолазкий. – М. : Нолидж, 2000. – 496 с.
6. Герасименко В. А. Защита информации в автоматизированных системах обработки данных : Кн. 1, 2 / В. А. Герасименко. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 576 с.
7. Герасименко В. А. Основы защиты информации / В. А. Герасименко, А. А. Малюк. – М. : МОПО РФ МГИФИ, 1997. – 500 с.

# Computing Complex of Train Control System

Vladimir Solowjov

Moscow State University Of Railway Engineering (MIIT)  
Moscow, Russian Federation  
wsolowjov@gmail.com

Dmitry Kornev

da.kornev@gmail.com

**Abstract.** The process of developing and designing the virtual computing system based on problems and capacity hardware depending of the number of serviced train units.

**Keywords:** computer system, train control system, the calculation of the capacity on the computer system, virtualization, monitoring computer system, computer system structure.

## REFERENCES

1. Evseev I. System virtualization OpenVZ: Part 1 [*Sistema virtualizatsii OpenVZ: Chast' 1*] Available at: [http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-openvz\\_1/#authorN10021](http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/l-openvz_1/#authorN10021).
2. Williams J. G., LaPadula L. J. Modeling External Consistency of Automated Systems. *High-Integrity Systems*, 1995, vol. 1, no 3, pp. 249–267.
3. Shirmanov A. Secure virtual infrastructure [*Bezopasnost' virtual'noi infrastruktury*]. *Open systems. SUBD*. [Otkrytye sistemy. SUBD]. 2009, no. 6, pp. 30–31.
4. Samoilenko A. Protecting Virtual Infrastructure VMware vSphere on the specific types of threats by solving vGate R2 [*Zashchita virtual'noi infrastruktury VMware vSphere ot spetsificheskikh tipov ugroz s pomoshch'iu resheniia vGate R2*]. Available at: <http://www.vmgu.ru/articles/vgate-r2-against-treats> (accessed 29.07.2012).
5. Barsukov V., Vodolazkiy V. Modern security technology. Integrated approach [*Sovremennye tekhnologii bezopasnosti. Integral'nyi podkhod*]. Moscow, Nolig, 2000. 496 p.
6. Gerasimenko V. Information protection in automated data processing systems: Book 1, 2 [*Zashchita informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh obrabotki dannykh: Kniga 1 i 2.*]. Moscow, Energoatomizdat, 1994. 576 p.
7. Gerasimenko V., Malyuk A. Fundamentals of information security [*Osnovy zashchity informatsii*]. Moscow, IATUO RF MGIFI, 1997. 500 p.

# Оценка параметров модели транспортных корреспонденций по данным сотовых операторов

Теселкин А. А., Теселкина К. В.  
Новосибирский государственный технический  
университет (НГТУ)  
Новосибирск, Россия  
a.tesselkin@gmail.com

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы оптимальной статистической оценки матрицы транспортных корреспонденций с использованием гравитационного метода. Предлагается итерационный метод оценки параметров гравитационной модели на основе наблюдаемых корреспонденций. Разработанный метод исследуется на модели транспортной сети г. Новосибирска. Исходные данные о корреспонденциях базируются на информации, предоставленной сотовыми операторами. Сравниваются различные функции предпочтения гравитационной модели.

**Ключевые слова:** матрица корреспонденции, гравитационный метод, метод наименьших квадратов, нелинейное оценивание, транспортная модель, функции предпочтения, группированные данные.

## ВВЕДЕНИЕ

В реалиях нынешнего дня стратегическое управление транспортным комплексом крупных городов и агломераций становится все более сложной задачей. Это вызвано не только ростом количества транспорта, развитием транспортной сети и связанной с ней инфраструктуры, но и возросшим уровнем качества транспортного обслуживания населения. Из-за этого разработка эффективной системы стратегического управления транспортным комплексом является приоритетной задачей для многих мегаполисов России. Ее создание невозможно без математической модели транспортной системы, которую необходимо точно идентифицировать.

Ключевой характеристикой модели транспортной системы является матрица корреспонденции, которая отражает общее число человек, переместившихся из одной точки транспортной сети в другую за определенное время. Известными в литературе методами построения таких матриц являются гравитационные и энтропийные методы [1, 2], которые предполагают использование априорной информации об объемах транспортного потока на основе социально-экономической статистики [3] и отличаются от статистических методов восстановления матриц [4, 5]. Наиболее распространен гравитационный метод [6], представленный в большинстве современных транспортных моделей.

В данной работе основное внимание уделено проблеме оценки параметров гравитационной модели на основе эффективных наблюдаемых данных, в частности, информации от сотовых операторов.

## ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ

Гравитационная модель оценки корреспонденций является аналогом физического закона всемирного тяготения: все тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. В случае транспортной сети аналогом тел выступают транспортные районы [7], порождающие/поглощающие потоки, за массу тела принимается суммарный объем выезжающего/въезжающего потока, в качестве расстояния взяты затраты на проезд (например, временные). Обозначим  $\rho_{ij}$  как размер корреспонденции из  $i$ -го в  $j$ -й район и запишем гравитационную модель для оценки транспортных корреспонденций [7]:

$$\rho_{ij} = k \cdot s_i \cdot d_j \cdot f(u_{ij}), \quad (1)$$

где  $s_i$  – общий объем выезжающих из транспортного района  $i$ ;  $d_j$  – общий объем въезжающих в транспортный район  $j$ ;  $u_{ij}$  – удельные затраты на передвижение из  $i$  в  $j$ ;  $k > 0$  – калибровочный коэффициент. При этом  $f(u_{ij})$  есть функция «предпочтения», зависящая от затрат. Также требуется учесть следующие ограничения:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \rho_{ij} &= s_i; \\ \sum_{i=1}^n \rho_{ij} &= d_j; \\ \rho_{ij} &\geq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения считаются системой только тогда, когда суммарные объемы по выезду и въезду равны:

$$\sum_i s_i = \sum_j d_j. \quad (3)$$

Поскольку  $\forall i, j$  величины  $s_i, d_j$  определяются априорными данными, то для построения адекватной матрицы корреспонденции необходимо правильно выбрать функцию  $f(u_{ij})$ . Выбор этой функции можно разделить на два этапа. На первом необходимо определить вид функции, на втором – идентифицировать ее параметры.

В общем, в качестве функции предпочтения  $f$  может быть выбрана любая функция, удовлетворяющая следующим условиям [8]:

- 1)  $f$  неотрицательно определена для всех неотрицательных значений аргумента;
- 2)  $\lim_{u_{ij} \rightarrow \infty} f(u_{ij}) = 0$ ;
- 3) на всей области определения  $f(u_{ij}) \leq 1$ .

Далее приведем некоторые основные функции предпочтения, которые применяются в большинстве мировых программных комплексов [9, 10], используемых для решения задач построения равновесных моделей. Параметры этих функций  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$  далее обозначены латинскими буквами  $a, b, c, \dots$ :

- 1) Логит-функция

$$f(u_{ij}) = e^{c \cdot u_{ij}}; \quad (4)$$

- 2) функция Кирхгоффа

$$f(u_{ij}) = u_{ij}^b; \quad (5)$$

- 3) функция Вох-Сох

$$f(u_{ij}) = e^{\frac{c \cdot u_{ij}^b - 1}{b}}; \quad (6)$$

- 4) комбинированная функция

$$f(u_{ij}) = a \cdot u_{ij}^b \cdot e^{c \cdot u_{ij}}. \quad (7)$$

Первые две функции являются частными случаями комбинированной функции. Их применяют на практике только для получения некоего начального варианта матрицы корреспонденций в отсутствие необходимой исходной информации.

Очевидным недостатком функции Вох-Сох является условие монотонного убывания на всей области определения. Это означает, что функция предпочтения принимает максимальное значение при затратах, равных нулю.

Комбинированная функция наиболее точно описывает распределение корреспонденций в зависимости от временных затрат, что будет показано ниже. Данный факт обусловлен тем, что в крупных городах наиболее часты поездки с ненулевыми затратами, соответственно, функция предпочтения имеет экстремум в ненулевой точке.

#### МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Исходными данными к предлагаемому методу является некоторая выборка  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  наблюдений за размером корреспонденции. Поскольку корреспонденция осуществляется между двумя точками, обозначим элементы выборки как  $\rho_{ij}$ ;  $i, j = 1, \dots, n$ .  $\rho_{ij}$  может быть образована лишь некоторой репрезентативной выборкой, а не всей генеральной совокупностью поездок. Будем считать, что для каждой рассматриваемой корреспонденции известны априорные затраты на передвижение между точками  $u_{ij}$  (могут быть рассчитаны на основе предварительной модели транспортной системы).

Оцениваются параметры функции предпочтения. Согласно следующей формуле, вытекающей из формулы (1), для каждой корреспонденции вычисляются значения  $g_{ij}$ :

$$g_{ij} = f(u_{ij}) = \frac{\rho_{ij}}{k \cdot s_i \cdot d_j}, \quad (8)$$

где

$$s_i = \sum_{j=1}^n \rho_{ij};$$

$$d_j = \sum_{i=1}^n \rho_{ij}.$$

Для исследования стоит брать лишь те  $g_{ij}$ , для которых  $s_i \gg n$  и  $d_j \gg n$ . В противном случае распределение корреспонденций будет статистически незначимо.

Можно считать, что  $g_{ij}$  зависят от  $u_{ij}$ . Все пары значений  $(g_{ij}, u_{ij})$  образуют точечную выборку. Поскольку затраты на передвижение между точками неотрицательны и конечны, разобьем  $[0, u_{\max}]$  на  $m$  равновеликих интервалов  $\mu = \{[u_l, u_{l+1}] | l = 0, \dots, m-1\}$ . Тогда  $\forall i, j$  сгруппируем выборку по интервалам  $\mu$ . Вопросы оптимального группирования в данной статье не рассматриваются. Группированные данные заносятся в табл. 1.

Таблица 1

Пример результата обработки матриц

Интервал $\mu$			$G_k = \sum_{u_{ij} \in \mu_k} g_{ij}$	Доля $G$ от максимума, $\tilde{G}$
Начало	Конец	Середина ( $\bar{u}_k$ )		
0	10	5	0,04325896	0,447
10	20	15	0,0087757	0,091

Доля  $G$  от максимального числа вычисляется простым соотношением

$$\tilde{G}_k = \frac{G_k}{\max_k(G_k)}. \quad (9)$$

$G_k$  были нормированы, чтобы привести их в соответствие функции предпочтения  $f$ , которая, как было сказано выше, меньше либо равна 1 на всей области определения.

Тогда вектор параметров гравитационной модели  $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_N)$  можно оценить по сгруппированным данным по методу наименьших квадратов (МНК для нелинейной регрессии):

$$\|\tilde{G}_k - f(\bar{u}_k)\|^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

В качестве  $u_{ij}$  перед первым шагом необходимо выбрать некоторое исходное приближение, которое соответствует затратам при начальном наборе параметров. Интервалы выбирают в зависимости от количества полученных данных и временных затрат между районами. Таким образом, итерационный процесс оценки параметров выглядит так:

- 1) для всех пар районов  $\forall i, j$  и  $i \neq j$  вычисляют значения  $g_{ij}$ ;

2) выбирают начальное приближение вектора параметров  $\theta = \theta^{(0)}$ ;

3) для набора параметров  $\theta^{(q)}$  вычисляют матрицу корреспонденций в соответствии с выбранной функцией предпочтения, а затем перераспределяют на сеть с помощью некоторой процедуры (например, обучающей [9]). Для полученного распределения потоков рассчитывают затраты  $u_{ij}$ ;

4) группируют данные по выбранным интервалам. Вычисляют  $\tilde{G}_k$ ;

5) вектор параметров  $\hat{\theta}^{(q)}$  оценивают по методу наименьших квадратов (10);

6) если  $\frac{\|\hat{\theta}^{(q)} - \hat{\theta}^{(q-1)}\|}{\|\hat{\theta}^{(q-1)}\|} < \varepsilon$ , где  $q$  – шаг итерации, а  $\varepsilon$  – наперед заданное маленькое число, то выход из итерационного процесса, иначе переход на шаг 3.

### Исходные данные

Исследование проводили на сети г. Новосибирска. Вся транспортная сеть была разделена на 397 транспортных районов [11], т.е. размерность оцениваемых матриц корреспонденций равна 397 на 397. Распределение транспортных потоков рассчитывали в комплексной транспортной модели г. Новосибирска, созданной в программном комплексе PTV Vision Visum.

Выборка, состоящая из объемов корреспонденций между районами, получена на основе исходных данных, предоставленных сотовыми операторами и описанных ниже.

Для некоторого периода наблюдения разбивали время наблюдения на интервалы  $T_1, T_2, \dots, T_N$ . Сотовый оператор предоставил следующую выборку: номер абонента; в течение временного интервала  $T_k$  номер района, в котором абонент пробыл большую часть времени. Заметим, что интерес представляют только те наблюдения, в которых район абонента менялся (т.е. совершалась корреспонденция). Таким образом, если абонент в интервал времени  $T_k$  принадлежал району  $i$ , а в интервал  $T_{k+1}$  – району  $j$ , значит, в некий момент времени  $[T_k, T_{k+1}]$  элемент матрицы корреспонденции  $M_{ij}^{[T_k, T_{k+1}]}$  увеличился на единицу. Таким образом, после обработки выборки всех абонентов можно получить множество матриц корреспонденций для каждого момента времени  $[T_k, T_{k+1}]$ .

Для исследования были выбраны утренние часы пик с 7.00 до 10.00. Общий объем выборки (количество абонентов) составил 200 000 абонентов. Для данной работы взят временной интервал для группирования данных 10 мин.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Исследование проводили только для комбинированной функции предпочтения (7) и функции Вох-Сох (6). Функции (4) и (5) не рассматривали, так как они являются частными случаями комбинированной функции. Стоит отметить, что для перераспределения матриц корреспонденции на транспортную сеть использовали обучающую процедуру программного комплекса PTV Vision Visum [9], для оценки параметров гравитационной модели – программный пакет SPSS компании IBM [12]. Всё остальное исследование проводили на разработанном авторами ПО [13].

По оси абсцисс отложены значения затрат  $\bar{u}_k$ , по оси ординат – значения  $\tilde{G}_k$ . Красным цветом на рисунках отмечена аппроксимация комбинированной функции, зеленым – аппроксимация Вох-Сох; фиолетовым – значения  $\tilde{G}_k$ . В качестве критерия близости функции к измеренным значениям использовали скорректированный коэффициент детерминации  $R_{adj}^2$  [14]. Результат оценки параметров на первой итерации представлен на рис. 1 и в табл. 2.

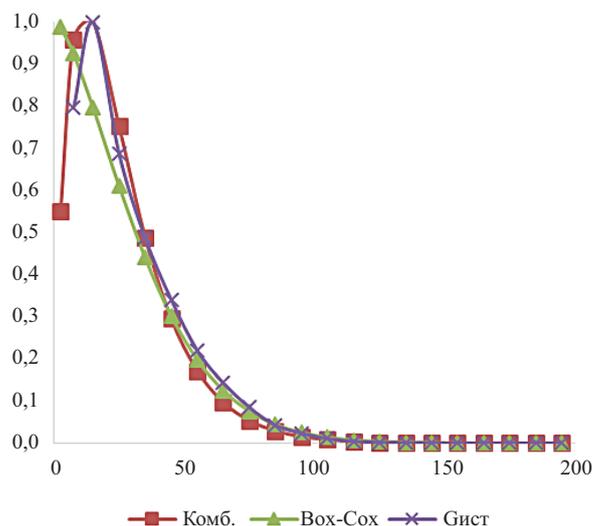


Рис. 1. Оценка функции предпочтения на первой итерации

Таблица 2  
Значения группированных данных на первой итерации

$\bar{u}_k$	$\tilde{G}_k$
5	0,796210
15	1
25	0,687598
35	0,487424
45	0,341071
55	0,220324
65	0,143156
75	0,085177
85	0,042535
95	0,023692
105	0,010749
115	0,004612
125	0,002117
135	0,000967
145	0,000267
155	0,000222

Для комбинированной функции:

$$a = 0,307;$$

$$b = 0,83;$$

$$c = -0,071;$$

$$R^2_{adj} = 0,994.$$

Для функции Вох-Сох:

$$b = 1,498;$$

$$c = -0,006;$$

$$R^2_{adj} = 0,965.$$

Таким образом, на первой итерации немного предпочтительнее комбинированная функция с оцененными параметрами. Далее было проведено 23 итерации. На рис. 2 и в табл. 3 приведены результаты последней итерации.

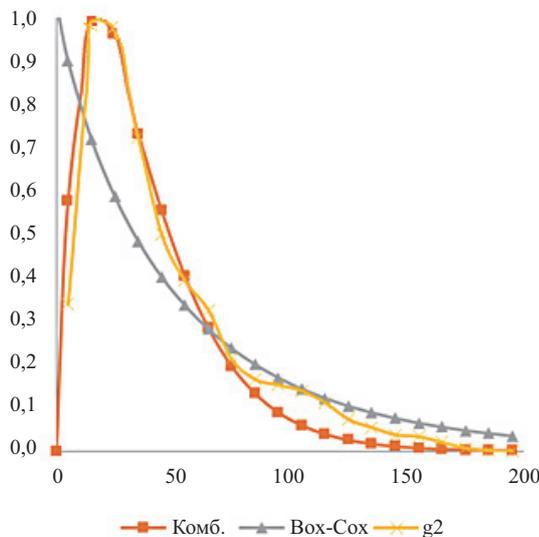


Рис. 2. Оценка функции предпочтения на последней итерации

Для комбинированной функции:

$$a = 0,176;$$

$$b = 0,893;$$

$$c = -0,05;$$

$$R^2_{adj} = 0,957.$$

Для функции Вох-Сох:

$$b = 0,87;$$

$$c = -0,03;$$

$$R^2_{adj} = 0,595.$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что комбинированная функция точнее описывает параметры модели по собранным наблюдениям.

Для корректной оценки параметров необходима репрезентативная выборка наблюдаемых корреспонденций для каждого транспортного района города. Также важен адекватный набор параметров на нулевом шаге, в противном случае количество итераций может быть велико.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы различные виды функции предпочтения гравитационной модели. Оценены параметры этих

Таблица 3  
Значения группированных данных на последней итерации

$\bar{u}_k$	$\tilde{G}_k$
5	0,370654
15	1
25	0,995466
35	0,792444
45	0,549566
55	0,430661
65	0,356619
75	0,232622
85	0,181297
95	0,167158
105	0,152223
115	0,122436
125	0,080007
135	0,059730
145	0,041242
155	0,036322

функций на основе данных, предоставленных сотовыми операторами. Новый метод оценки параметров был протестирован на существующей сети г. Новосибирска.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гасников А. В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский и др. ; под ред. А. В. Гасникова. – М. : МФТИ, 2010. – 360 с.
2. Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем / А. Дж. Вильсон. – М. : Наука, 1978. – 248 с.
3. Ortuzar J. D. Modeling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen. – John Wiley & Sons Ltd, 2001. – 594 p.
4. Хабаров В. И. Марковская модель транспортных корреспонденций / В. И. Хабаров, Д. О. Молодцов, С. В. Хомяков // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1, ч. 1. – С. 113–117.
5. Хабаров В. И. Планирование экспериментов для оценки матрицы транспортных корреспонденций / В. И. Хабаров, А. А. Теселкин, К. П. Косолапов // Докл. АН ВШ РФ. – 2015. – № 3 (28). – С. 109–116.
6. Васильева Е. М. Нелинейные транспортные задачи на сетях / Е. М. Васильева, Б. Ю. Левит, В. Н. Лившиц. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 104 с.
7. Швецов В. И. Математическое моделирование транспортных потоков / В. И. Швецов // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 11. – С. 3–46.
8. Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов : моногр. / М. Р. Якимов. – М. : Логос, 2013. – 188 с.

9. VISUM 11.0 Основы : Руководство пользователя. – СПб. : Изд-во политехнич. ун-та, 2010. – 858 с.

10. Якимов М. Р. Транспортное планирование: практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision® VISUM : моногр. / М. Р. Якимов, Ю. А. Попов. – М. : Логос, 2014. – 200 с.

11. Теселкин А. А. Методы восстановления матриц корреспонденций по данным натурных обследований / А. А. Теселкин, В. И. Хабаров // Политранспортные системы : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. в рамках года науки Россия – ЕС. – Новосибирск, 2015. – С. 418–423.

12. Бююль А. SPSS : Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей / А. Бююль, П. Цёфель ; пер. с нем. – СПб. : ДиаСофтЮП, 2005. – 608 с.

13. Еремин С. В. Интеллектуальная система для стратегического управления пассажирским комплексом Красноярска и агломерации / С. В. Еремин, А. А. Теселкин, К. В. Хабарова, В. И. Хабаров // Бюл. транспортной информации. – 2013. – № 2 (212). – С. 9–13.

14. Электронный учебник по статистике. – М. : StatSoft, 2012. – URL : <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения 10.10.2015).

# Estimation of the Parameters of an Origin-Destination Movement Model from Cellular Operator Data

Tesselkin A. A., Tesselkina K. V.  
Novosibirsk State Technical University  
NSTU  
Novosibirsk, Russia  
a.tesselkin@gmail.com

**Abstract.** The issues of an optimal statistical origin-destination (OD) transport matrix estimation using a gravity method are considered. An iterative method for estimating the gravity model parameters is proposed based on observed OD movements. The developed method is tested on the model of Novosibirsk transport network. Input data on the OD movements are formed based on the information provided by the cellular operators. A comparison of different preference functions of the gravity model is provided.

**Keywords:** origin-destination matrix, gravity method, least squares method, nonlinear estimation, transport model, preference functions, grouped data.

## REFERENCES

1. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminskii E. A., Kholodov Ya. A., Shamrai N. B., Blank M. L., Gasnikova E. V., Zamyatin A. A., Malyshev V. A., Kolesnikov A. V., Raigorodskii A. M. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov* [Introduction to the mathematical modelling of traffic flows]. Moscow, MFTI Publ., 2010. 360 p.
2. Wilson A. J. *Entropiinye metody modelirovaniia slozhnykh sistem* [Entropy methods of complicated systems modelling]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 248 p.
3. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. *Modeling Transport*. John Wiley & Sons Ltd, 2001. 594 p.
4. Khabarov V. I., Molodtsov D. O., Khomyakov S. V. Markovskaya model' transportnykh korrespondentsii [Model Markov chains for transport correspondence]. *Doklady TUSUR* [Proc. TUSUR], 2012, no.1, part 1, pp. 113–117.
5. Khabarov V. I., Tesselkin A. A., Kosolapov K. P. Planirovanie eksperimentov dlia otsenki matritsy transportnykh korrespondentsii [Design of experiments for transport correspondence matrix estimation]. *Doklady Akademii Nauk Vysheii Shkoly Rossiiskoi Federatsii* [Proc. of the Russian Higher School Acad. of Sci.], 2015, no. 28 (3), pp. 109–116.
6. Vasil'eva E. M., Levit B. Iu., Livshits V. N. *Nelineinye transportnye zadachi na setiakh* [Nonlinear transport problems on networks]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1981. 104 p.
7. Shvetsov V. I. *Matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov* [Mathematical modelling of transport flows]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 2003, no. 11, pp. 3–46.
8. Iakimov M. R. *Transportnoe planirovanie: sozdanie transportnykh modelei gorodov: monogr.* [Transport planning: the development of urban transport models: monogr.]. Moscow, Logos, 2013. 188 p.
9. *VISUM 11.0 Osnovy: Rukovodstvo pol'zovatel'ia* [VISUM 11.0 Basics: User Guide. St. Petersburg, Polytechnical Univ. Publ., 2010. 858 p.
10. Iakimov M. R., Popov Iu. A. *Transportnoe planirovanie: prakticheskie rekomendatsii po sozdaniiu transportnykh modelei gorodov v programnom komplekse PTV Vision® VISUM: monogr.* [Transport planning: practical advice for the development of urban transport models in PTV Vision® VISUM system: monogr.], Moscow, Logos, 2014. 200 p.
11. Tesselkin A. A., Khabarov V. I. Methods of OD matrix recovery from field surveys [Metody vosstanovleniia matritsy korrespondentsii po dannym naturnykh obsledovaniu], *Poli-transportnye sistemy: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii v ramkakh goda nauki Rossiia – ES*. Novosibirsk, 2015, pp. 418–423.
12. Biuiul' A., Ts'ofel' P. *SPSS: Iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovlenie skrytykh zakonomernostei: Per. s nem.* [SPSS: Data processing craft. Analysis of statistical data and restore hidden patterns. Translated from German]. St. Petersburg, DiaSoftUUP, 2005. 608 p.
13. Eremin S. V., Tesselkin A. A., Khabarova K. V., Khabarov V. I. Intellektual'naia sistema dlia strategicheskogo upravleniia passazhirskim kompleksom Krasnoiarska i aglomeratsii [Intellectual System in strategic management of the public transport complex of Krasnoyarsk and the agglomeration]. *Biulleten' transportnoi informatsii* [The Bul. Transp. Inform.], 2013, no. 2 (212), pp. 9–13.
14. *Elektronnyi uchebnyk po statistike*. Electronic textbook on statistics. Moscow, StatSoft, 2012, available at: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (accessed 10 Oct. 2015).

# Optical Digital Systems and Complexes for Space Applications

Denisov Andrew, Demin Anatoly  
Saint-Petersburg national research University  
of information technologies, mechanics and optics  
St. Petersburg, Russia  
www.denisoff@mail.ru, dav\_60@mail.ru

Letunovskiy Alexandr  
Mozhaisky Military Space Academy  
St. Petersburg, Russia

**Abstract.** The optical digital systems and the Earth remote sensing from space complexes main directions development trend is considered according to public sources. The most important areas analyzes – remote sensing and astrometry. The main performance characteristics in use of space systems\*.

**Keywords:** optical digital systems and complexes for space applications, remote sensing of the Earth, astrometry, linear ground resolution, spacecraft.

## INTRODUCTION

The control augmentation of scientific-technical and technological processes related to different lines of research in the national economy and the country's defense interests, as well as near and far space research, challenges the remote sensing of the Earth (RSE) usage and capabilities such line of research as astrometry. We define principal directions of constructions for solving practical tasks, which stand in front of optical digital systems and complexes (ODSaC) installing on the spacecraft board with mass 100–2000 kg [1–23].

Remote sensing of the Earth:

- The linear ground resolution is not worse than 0.5 m for the panchromatic channel and less than 3 m for multispectral;
- The swath is about 20 km;
- The ratio signal/noise is not worse than 150;
- The modulation transfer function on the valid frequency is not worse than 0.2.

Astrometry:

- It is creation of high precision (the accuracy is not worse than  $25 \cdot 10^{-6}$  arc seconds) directory provisions (the precision of positions and proper motions is not worse than  $1 \cdot 10^{-3}$  arc seconds; the precision of parallax determining is approximately  $4 \cdot 10^{-5}$  arc seconds for stars, which size is 16 m; the photometry precision is 0.01–0.10 m for the wavelength of 0.2–10  $\mu\text{m}$ , the spectral bands number is 10–16) and the proper motions of celestial objects up to 18 m;
- The creation of a spectral energy distributions (R~1/2000) stars catalogue is up to 12 m (optional up to 16–18 m) and radial velocities of all stars are up to 18–19 m of 4–6 independent-interval intervals of the spectrum.

Consider the first of these areas. The usage of the remote sensing of the Earth in the optical range of wavelengths allows to obtain information about both geographical and geophysical parameters of its, and anthropogenic processes, occurring on the Earth's surface. It increases the value of this information.

\* The article was published in Russian in the Scientific and technical journal "Izvestiya vuzov. Instrument-making", 2010, is. 3, pp. 51–59.

ERS, depending on tasks for solving which it is intended, is carried out by the shuttle, object, stereoscope, static, dynamic, topographic and spectrometric shooting methods. Remote sensing in the optical range is carried out by using ODSaC, which established on the spacecraft board (SC). The development of space ODSaC is on the way of circuit solutions and information technology package creation, that allows to develop and create complexes with unique combination of information, energy, accuracy and dimensional parameters.

According to conception of building a new generation space complexes for various purposes it is planned to create ODSaC, providing:

- The Earth's surface monitoring with high spatial and energy resolution;
- The receiving information for describing the Earth's surface and its topography with high precision;
- The problem solving of astrometry with high precision;
- The carrying out astrophysical studies (including spectroscopy) with high precision and validity.

Also, it is necessary for further researches:

- The consideration of the information technologies possible areas for improvement in the ground segment with the purpose of increasing its productivity for consumers satisfaction;
- The improving of the space research technology and methodology with the purpose of improving the reliability and validity for detection of a variety mobile and motionless objects on a complex background.

New design and technological solutions for creation of advanced ODSaC should be based on the following directions:

- The development of large-aperture optical systems with the ability to change the configuration depending on the required spatial and energy resolution;
- The creation of multimodal optical systems with active control of the form wave front;
- The reducing of mass-dimensional characteristics based on the usage of new construction materials, production technologies, electronic elements and photodetectors.

The rapid development of ODSaC for space-based RSE at the end of 20th century has led to appearance of systems with the linear resolution on the surface (the pixel projection on the Earth's surface) around 1–2 m under the entrance pupil of lens diameter around 0.35 to 0.7 mm and the mass of the SC 250–1000 kg. For this class of systems fits: IKONOS-2 (USA, 1999); QuickBird-2 (USA, 2001); OrbView-3 (USA, 2002); Spot-5 (France, 2002); Eros-A (Israel, 2000); Cartosat-1 (India, 2005); Kopsat-1 (Korea, 1999); Formosat-RocSat-2 (Taiwan, 2004).

Further development of the commercial species production market, associated with the appearance of demand on high qual-

ity information of sub-meter resolution, which is necessary for the development of high precision detailed maps and the Earth's digital terrain models, provides push to the development of technical means. The offers to put into orbit about 700 km dual-use device GeoEye-1 (2008) and WirlView-II (2009) from American operator companies Digital Globe and Geo Eye are appeared by the end of the 21th century first decade [21].

ODSaC with the linear ground resolution (LGR) about 0.5 m are fixed on these SC, and its video information proposed to be used both performing commercial orders, and in the interests of imagery space intelligence. These SC can provide video information reception from LGR to 0.25 m and high speed to transfer it to the customer under certain conditions. However, the USA's legal system imposes restrictions on the supply of specific materials for customers outside the USA/Information must be supplied with the resolution about 0.5 m and with the time delay no less than 24 hours. These circumstances create an extra incentive for the development of such space ODSaC for RSE in other countries, including Russia.

One of the main trend of world development SC RSE is realized in the USA's super satellites described above. It is creation of heavy SC (with weight more than 2000 kg), that host the large-sized device with the entrance pupil diameter about 1.0–1.5 m and the fine-grained multi-element photodetector matrixes (FPZS) with pixel size about 6–8 microns, which allows to achieve very high resolution.

Super satellites GeoEye-1 and WirlView-II provides a view of the Earth's underlying surface with the pixel projection in panchromatic channel of 0.41 and 0.46 m, properly, the first is in the swath width of 15.2 km, and the second one is 16.4 m, with the height of the orbit 684 and 770 km, properly. The mass of the first SC is 1955, and the second one is 2800 kg, the telescope entrance pupil diameter is 1.1 m for both SC, the effective length of the line multi-element receiver is about 36 000 pixels. The observation is performed in panchromatic (HC) and multispectral (MS) spectral ranges simultaneously. The number of spectral ranges MS channel in the first SC is 4 and in the second one is 8.

As shows the development analysis of SC RSE, in order for further multiply expansion of the specific products using possibilities, it is necessary to improve dual-using sub-meter resolution super satellites, increasing the video materials information content, the accuracy of gridding, increasing shooting productivity and efficiency of video delivery to the consumer.

The table shows data about ODSaC, which work on the space orbit nowadays (D is the diameter of the entrance pupil, F is the focal length,  $\alpha$  is the field angle).

#### THE COMPOSITION OF THE SPACECRAFT AND MAIN TACTICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS

The SC for RSE consists of two parts: ODSaC and multifunctional container unit, which provide data processing and transmission, thermal control, energy production and distribution for the spacecraft.

Fig. 1 shows the orbital configuration of the SC series Pleiadas [19], and Fig. 2 shows the circuit-design solution ODSaC for RSE series Pleiadas (the lens is located in the carbon case), which is actually generic for all SC, solving the RSE problem.

ODSaC main components are the lens and the system of reception and transformation of information (SRTI), which contains FPZS with electronic components, and unit for data

conversion and compression. Wavelet algorithm is used in SC series Pleiadas for compressing information. It allows to realize the seven-time compression instead of the standard four for video data about 4 Gbps. Star sensor and fiber optic gyroscope provide required position ODSaC on orbit in relation to the Earth's surface together with the SC propulsion system.

FPZS allows to generate information about the Earth's surface in panchromatic shooting mode 0.4–0.9 microns and in multispectral mode. Multispectral (or spectrozonal) the images are presented in the individual spectral canals signals form, which can be used for imagery in future. Alternative synthesis of individual signals in natural or artificial colors allows to solve different subject tasks, and helps to disscramble of low-contrast images.

ODSaC storage capacity reaches 600 GB and higher; data transfer design speed is about 600 Mbit/s. Maximum input speed of the video data in the storage device is 1.5 Gb/s.

High image quality in ODSaC is a regulatory requirement. So modulation transfer function of the panchromatic channel has to be better than 0.1 on the working spatial frequency, and the ratio signal/noise under the normal Earth's radiance should be about 100. The evaluation precision of the image positioning without using the ground data should reach 20 m, and when using the supporting characters on the Earth, separated from each other by 80 km – 0.5 m.

On the next phase the data is encoded according to the scheme of trellis code modulators type 8-PSK, which have their own solid-state power amplifiers. Then the data are compressed and transmitted to Earth via the X-band antenna. It is installed on universal double cardanic suspension, it ensures data transmission during movement. During the registration period image, this mechanism is not used to minimise dynamic distortion. The special suggestive antenna orients the transmitting antenna in satellite motion so that the receiving station always stay in its range. Thus, data transmission from space happens under the unobstructed sight ground receiving station conditions.

Basic optical diagrams using in space ODSaC are shown in figures 3–6 (Fig. 3 – the Ritchie-Chretien diagram with field aberrations corrector, Fig. 4 – mirror optical system – Korsh diagram, Fig. 5 – optical scheme with a two-mirror field aberrations corrector – four-mirror diagram, Fig. 6 – three-mirror off-axis diagram – Cook three-mirror triplet).

The primary objective of astrometric researches, in spite of the catalog of positions and celestial objects proper motions at the microsecond level of accuracy, is:

- The definition of stars multiplicity;
- The definition of orbital motions in double and multiple systems;
- The searching of unseen satellites to stars;
- The study of star clusters dynamics and kinematics;
- The calculation of trigonometric parallaxes (for finding distances to stars);
- The specification of the interstellar distances scale;
- The investigation of the non-stationary gravitational field of galaxy effect at coordinate-time measurements;
- The specification of the Universe size and age.

These problems are solved, for example, using an optical stellar interferometer, which is placed on an artificial satellite.

Fig. 7 shows the optical scheme of the stellar interferometer (which was performed in the framework of the Gaiae project), which provide the position of two optical radiations in the focal

System	Country of origin	Spacecraft mass, kg	ISIC weight, kg	The orbit height, km	The type of the optical system	Settings	Spectral range, $\mu\text{m}$	The angular of the pixel, MK radians	Swath width, km	The projection of the pixel on the Ground, m
KH-12 (2000)	USA	12000	2800	350–550	Ritchey-Chretien	$\varnothing$ 2.3 m	0.5–0.8	0.3	4	0.144
						F = 40 m				
						$\nu = 0.6^\circ$				
IKONOS-2 (1999)	USA	700	170	683	Korsch	$\varnothing$ 0.7 m	0.45–0.9	1.2	11	0.84
						F = 10 m	0.45–0.52			
						$\nu = 1^\circ$	0.52–0.6 0.63–0.69 0.76–0.9			
EROS-AI (2000)	Israel	250	70	480	Ritchey-Chretien	$\varnothing$ 0.3 m	0.45–0.9	3.43	12.8	1.65
						F = 3.5 m				
						$\nu = 1.5^\circ$				
						F = 8 m				
QUICK-BIRD (2001)	USA	980	300		Mirror off-axis	$\varnothing$ 0.6 m	0.45–0.9	1.36	22	0.8 3.2
						F = 8.84 m	0.45–0.52			
						$\nu = 2.1^\circ$	0.52–0.6 0.63–0.69 0.76–0.9			
SPOT-5 (2002)	France	3000	955,5	822	Scheme Schmidt	$\varnothing$ 0.16 m	0.49–0.69	4.6 9.2	2x57.5	3.8 7.6
						F = 1.082 m	0.43–0.47			
						$\nu = 4^\circ$	0.49–0.61 0.61–0.68 0.68–0.89 1.58–1.75			
Pleiadas (2007)	France	980	300	695	Korsch	$\varnothing$ 0.65 m	0.49–0.69	1 4	20	0.7 2.8
						F = 12.9 m	0.43–0.47			
						$\nu = 4^\circ$	0.49–0.61 0.61–0.68 0.68–0.89			
WorldView 2 (2009)	USA	2800	<1000	759–776	Three mirror	$\varnothing$ 1.1 m	0.4–0.8	0.6 2.4	16.4	0.46 1.85
						F = 13.3 m	0.45–0.51 0.51–0.58			
						$\nu = 1.28^\circ$	0.63–0.69 0.77–0.895			

Note:  $\varnothing$  is the diameter of the entrance pupil; F – focal length;  $\nu$  – is the angle of the field of view.

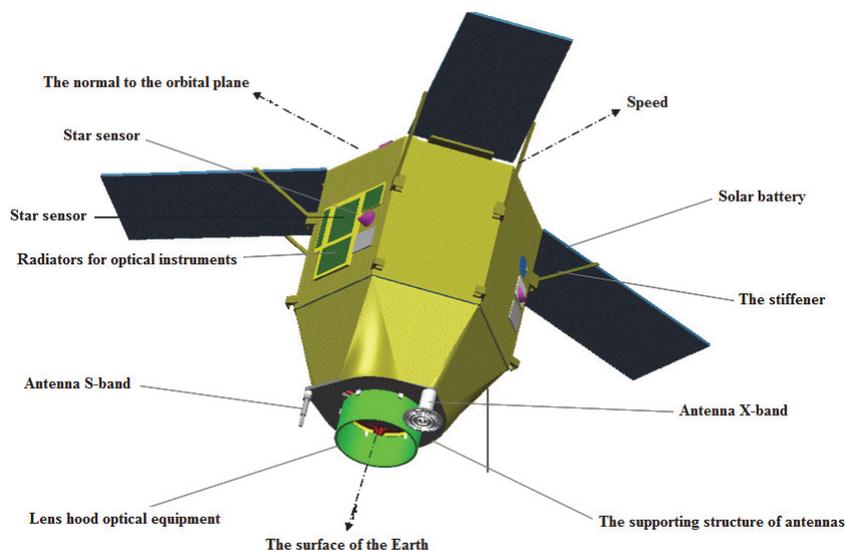


Fig. 1. The orbital configuration of the spacecraft series Pleiadas

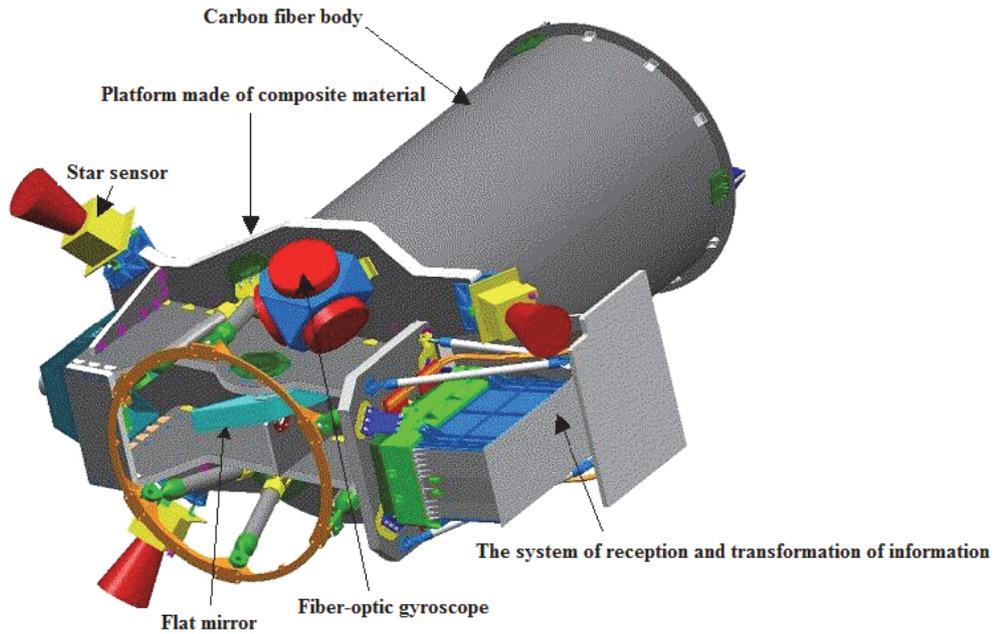


Fig. 2. Circuit-design solution ODSaC made for the SC series Pleiadas

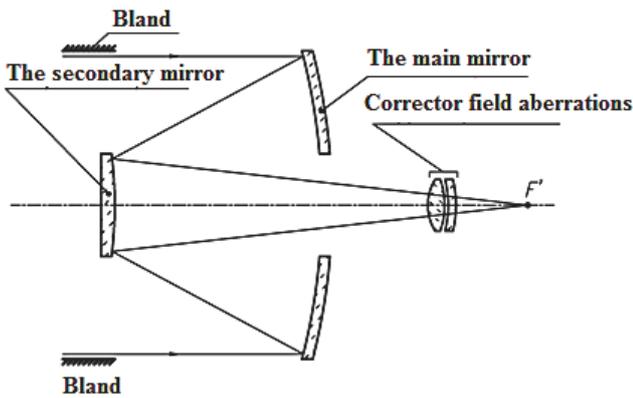


Fig. 3. Diagram of the Ritchey-Chrétien telescope with corrector field aberrations

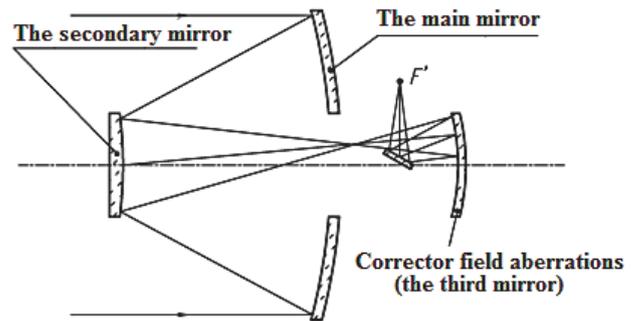


Fig. 4. Mirror optical system diagram Korsch

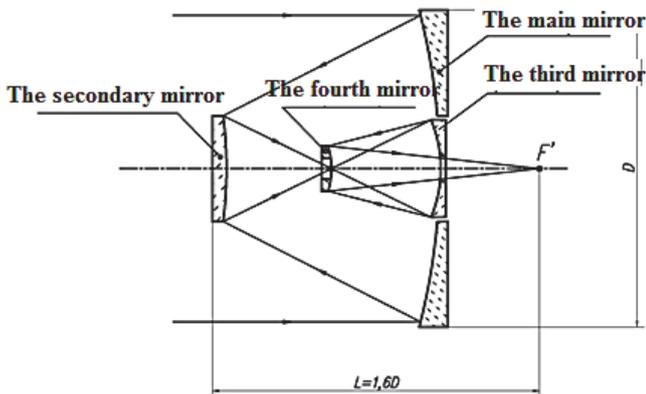


Fig. 5. Optical layout with two-mirror corrector field aberrations – chetyrehstennoy scheme

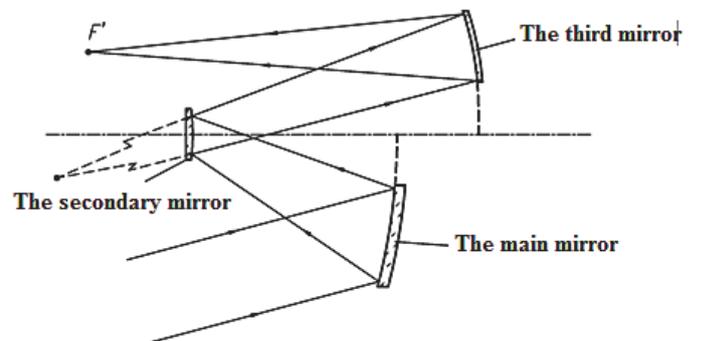


Fig. 6. Transitella off-axis scheme – trehsharnimye triplet Cook

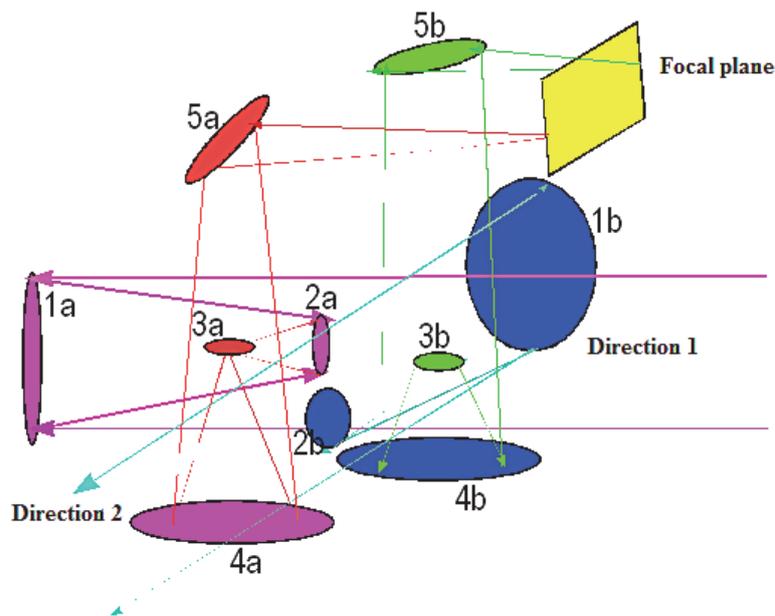


Fig. 7. Shows the optical scheme of a stellar interferometer

plane, extending in directions 1 and 2. Each optical radiation follows through its own optical system, which consists of the mirrors 1A, 2A, 3A, 4A, 5A and 1b, 2b, 3b, 4b, 5b, respectively. The interference pattern of two optical radiations interaction forms in the focal plane. This stellar interferometer has the following parameters and characteristics [22]:

- The diameter of main mirrors telescopes interferometer is 1–1.5 m;
- The focal length of the telescope lens is about 30–45 m;
- The field of telescope view is 1–1.5°;
- FPZS dimensions are 0.5×0.5 m;
- FPZS back-illuminated of the interferometer contains the 40×40 mosaic of matrices, 1000×1000 pixels each. The size of the pixel matrix is 12 microns, which corresponds to the angular telescope resolution 0.08”;
- The apparent angular size of the star is 0.3 to 0.4” at a wavelength of 800 nm;
- The random error of the 14th magnitude star position measurement is on the one CCD matrix, which angular size is 0.003”.

### CONCLUSION

Thus, the analysis of the status and development trends of the two main areas ODSaC allows draw following conclusions.

1. The current state of foreign remote sensing systems and prospects of their development testify that there is a wide range of spacecraft for remote sensing and astrometry, according with the wide range of targets, solving in the interests of economics and defense. For example, by limiting ground resolution, provides in PH-range, it is possible to separate four basic directions of development for ODSaC for RSE: system ultra high resolution – 0,2–0,5; high – 0,5–1,0; medium 2–3; small – 10–20 m.

2. With the aim of improving information, power, accuracy and mass-dimensional ODSaC parameters for space imagery and astrometry, it is necessary to solve the following main tasks of scientific-technical and technological character:

- The creation of space telescopes with the main mirror aperture 1–1,5 m and above. In particular, development of the manufacturing technology and composite mirrors in orbit control is one of the ways of high aperture telescope with diameter of main mirror about 2.5 m creation. If is afford to reduce the weight of the telescope significantly [3, 11];
- The development of composite materials for space systems technology;
- The development of a new generation of actuators, in particular of the drives;
- The creation of the large-format FPZS with pixel size up to 6–9 μm, which operate in modes time delay and accumulation, and time delay and integration;
- The creation of digital high-speed circuits for information processing at the SC board (compression, encoding);
- The creation of storage devices of large capacity (up to 10.13 bits);
- The creation of a space radio link with the transmission speed from 700 Mbps and above.

### REFERENCES

1. Adrov V.N., Karionov Yu.I., Titarov P.S., Chekurin A.D. Criteria for selecting remote sensing data for topograficas who mapping [*Kriterii vybora dannykh DZZ dlya topograficheskogo kartografirovaniya*]. Moscow, 2004.
2. Beletsky V.S. Essays on the motion of cosmic bodies [*Ocherki o dvizhenii kosmicheskikh tel*]. Moscow, Nauka, 1977.
3. Vasiliev V.N., Demin A.V., Gogolev Yu.A., Oleinikov L.W. Optical-electronic complexes of space home [*Optiko-elektronnye komplekсы kosmicheskogo bazirovaniya*]. Proc. third St. Sci. Conf. the space forces. St. Petersburg, 2007. Pp. 127–133.
4. Vasiliev V.N., Demin A.V., Gogolev Yu. A., Nikiforov V.O. Optical-electronic complexes of space home – perspectives of development [*Optiko-elektronnye komplekсы kosmicheskogo bazirovaniya – perspektivy razvitiya*]. Proc. Dokl. Int. Sci.-Techn. Conf. “Development space industry of Russia and

prospects of its further integration into the international system economic relations". St. Petersburg, 2007. Pp. 163–165.

5. Garbuk S. V., Gershenzon V. E. Space systems of Earth remote sensing [*Kosmicheskie sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli*]. Moscow, A and B, 1997. 297 p.

6. Grechishev A. V., Likhachev Yu. A. Space system of remote sounding of the Earth [*Kosmicheskie sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli*]. Annual rev. Vol. 4. Moscow, GIS-Association, 1999. Pp. 83–92.

7. Danilov V. A., Demin A. V., Nikiforov V. O., Savitsky A. M., Sokolsky M. N. Multispectral optical electronic system for microsatellites [*Mnogospektral'nye optiko-elektronnye sistemy dlya mikrosputnikov*]. Mat. Sci.-Techn. Conf. "Surveillance, monitoring and remote sensing of the Earth". Moscow, MNTORES em. A. S. Popova, 2008. Pp. 34–38.

8. Danilov V. A., Demin A. V., Nikiforov V. O., Savitsky A. M., Sokolsky M. N. Opto-electronic complexes for MCA [*Optiko-elektronnye komplekсы dlya MKA*]. Mat. Sci.-Techn. Conf. "Surveillance, monitoring and remote sensing of the Earth". Moscow, MNTORES em. A. S. Popova, 2008. Pp. 65–68.

9. Demin A. V., Denisov A. V., Ietunovskiy A. V. Optical-digital systems for space applications [*Optiko-tsifrovye sistemy i komplekсы kosmicheskogo naznacheniya*]. Izvestiya vuzov. Priborostroeniye. 2010, is. 3, pp. 51–59.

10. Demin A. V., Kanaev I. I., Seregin A. G., Smirnov A. P. The Pair of star Fizeau interferometer with a review depicting a telescope [*Sopryazhenie zvezdnogo interferometra Fizo s obzornym izobrazhayushchim teleskopom*]. Izvestiya vuzov. Priborostroeniye, 2006, vol. 49, no. 1, pp. 48–52.

11. Demin A. V., Umbitaliev A. A., Syculin A. K. Prospects of development of space monitoring systems with adaptive optics [*Perspektivy razvitiya kosmicheskikh sistem nablyudeniya s adaptivnoy optikoy*]. Proc. Dokl. Intern. Sci.-Techn. Conf. "Development of space industry of Russia and prospects of its further integration into the system of international economic relations". 2007. Pp. 166–169.

12. Demin A. V., Gorbunov G. G., Nikiforov V. O., Savitsky A. M., Skvortsov Yu. S., Sokolsky M. N. Hyperspectral sensors

for remote sensing of the Earth [*Giperspektral'naya apparatura dlya distantsionnogo zondirovaniya Zemli*]. Optical mice. Phys., 2009, Vol. 76, no. 10, pp. 75–82.

13. Image of Earth from space: application examples [*Izobrazheniya Zemli iz kosmosa: primery primeneniya*]. Moscow, R & d CENTER, 2005.

14. Kucheiko A. A. New satellite VHR data from monitoring [*Novyy sputnik sverkhdetal'nogo nablyudeniya*]. News of cosmonautics, 2009, Vol. 19, no. 12, p. 323.

15. Kucheiko A. A. remote sensing of the Earth: results of 2008 [*Kosmicheskoe zondirovanie Zemli: itogi 2008*]. R&D. Cnews, 2009.

16. Konechny G. issues of digital mapping [*Tendentsii tsifrovogo kartografirovaniya*]. Hannover, Germany, 2007.

17. Titarov P. S. Practical aspects of photogrammetric processing of scanner space imagery high resolution [*Prakticheskie aspekty fotogrammetricheskoy obrabotki skanernykh kosmicheskikh snimkov vysokogo razresheniya*]. Inform. Bul. of GIS Association, 2004, no. 3–4.

18. Chernyavskaya G. M. Space technology in monitoring the Earth [*Kosmicheskie sredstva pri monitoringe Zemli*]. Earth and universe, 2004, no. 5, pp. 3–12.

19. Chertok B. E. Astronautics today and tomorrow [*Kosmonavtika segodnya i zavtra*]. The Military-industrial rev. Arsenal, 2009, no. 3.

20. European system of remote sensing high resolution "Pleiades" [*Evropeyskaya sistema distantsionnogo zondirovaniya vysokogo razresheniya «Pleyady»*], available at: <http://www.sovzond.ru/dzz/publications/541/3037.html>.

21. Images GeoEye-1 [*Snimki GeoEye-1*], available at: <http://www.ra-curs.ru/>, page=456.

22. The project Gaia [*Proekt Gaia*], available at: [http://www.safran.ru/article.php3id\\_article=621](http://www.safran.ru/article.php3id_article=621).

23. Tr. III st. sci. Conf. space forces [*Trudy tret'ey voenno-nauchnoy konferentsii Kosmicheskikh voysk*], 2007.

24. Fender J. Future Trends in Large Space Optics. Proc. SPIE, 2000, Vol. 4013, pp. 682–686.

# Опτικο-цифровые системы и комплексы космического назначения

Денисов А. В., Демин А. В.

Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет информационных  
технологий, механики и оптики  
Санкт-Петербург, Россия  
www.denisoff@mail.ru, dav\_60@mail.ru

Летуновский А. В.

Военно-космическая академия  
им. А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** На основе данных из общедоступных источников рассматривается тенденция развития основных направлений оптико-цифровых систем и комплексов дистанционного зондирования Земли из космоса. Анализируются наиболее важные направления – дистанционное зондирование Земли и астрометрия. Представлены основные тактико-технические характеристики находящихся в эксплуатации космических систем.

**Ключевые слова:** оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения, дистанционное зондирование Земли, астрометрия, линейное разрешение на местности, космический аппарат.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адров В. Н. Критерии выбора данных ДЗЗ для топографического картографирования / В. Н. Адров, Ю. И. Карионов, П. С. Титаров, А. Д. Чекурин. – М. : Ракурс, 2004.
2. Белецкий В. С. Очерки о движении космических тел / В. С. Белецкий. – М. : Наука, 1977. – 360 с.
3. Васильев В. Н. Оптико-электронные комплексы космического базирования / В. Н. Васильев, А. В. Демин, Ю. А. Гоголев, Л. Ш. Олейников // Тр. III воен.-науч. конф. космических войск. – СПб., 2007. – С. 127–133.
4. Васильев В. Н. Оптико-электронные комплексы космического базирования – перспективы развития / В. Н. Васильев, А. В. Демин, Ю. А. Гоголев, В. О. Никифоров // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Особенности развития космической отрасли России и перспективы её дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей». – СПб., 2007. – С. 163–165.
5. Гарбук С. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон. – М. : А и Б, 1997. – 297 с.
6. Гречищев А. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли / А. В. Гречищев, Ю. А. Лихачев // Ежегод. обзор. – Вып. 4 (1998). – М. : ГИС-Ассоциация, 1999. – С. 83–92.
7. Данилов В. А. Многоспектральные оптико-электронные системы для микроспутников / В. А. Данилов, А. В. Демин, В. О. Никифоров и др. // Материалы науч.-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – М. : МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2008. – С. 34–38.
8. Данилов В. А. Оптико-электронные комплексы для МКА / В. А. Данилов, А. В. Демин, В. О. Никифоров и др. // Материалы науч.-техн. конф. «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – М. : МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2008. – С. 65–68.
9. Демин А. В. Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения / А. В. Демин, А. В. Денисов, А. В. Летуновский // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. Вып. 3. – С. 51–59.
10. Демин А. В. Сопряжение звездного интерферометра Физо с обзорным изображающим телескопом / А. В. Демин, И. И. Канаев, А. Г. Серегин, А. П. Смирнов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 1. – С. 48–52.
11. Демин А. В. Перспективы развития космических систем наблюдения с адаптивной оптикой / А. В. Демин, А. А. Умбиталиев, А. К. Цыцулин // Тез. докл. «Особенности развития космической отрасли России и перспективы её дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей» междунар. науч.-техн. конф. – СПб., 2007. – С. 166–169.
12. Демин А. В. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли / А. В. Демин, Г. Г. Горбунов, В. О. Никифоров и др. // Оптик. журн. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 75–82.
13. Изображения Земли из космоса: примеры применения, научно-популярное издание. – М. : ООО Инж.-технол. центр «СКАНЭКС», 2005.
14. Кучейко А. А. Новый спутник сверхдетального наблюдения / А. А. Кучейко // Новости космонавтики. – 2009. – Т. 19, № 12. – С. 323.
15. Кучейко А. А. Космическое зондирование Земли : итоги 2008 / А. А. Кучейко // R&D. CNews, 2009.
16. Конечны Г. Тенденции цифрового картографирования / Г. Конечны. – Ганновер. унив., Германия, 2007.
17. Титаров П. С. Практические аспекты фотограмметрической обработки сканерных космических снимков высокого разрешения / П. С. Титаров // Инф. бюл. ГИС-Ассоциации. 2004. – № 3–4.
18. Чернявский Г. М. Космические средства при мониторинге Земли / Г. М. Чернявский // Земля и Вселенная. – 2004. – № 5. – С. 3–12.
19. Черток Б. Е. Космонавтика сегодня и завтра / Б. Е. Черток // Военно-промышленное обозр. Арсенал. – 2009. – № 3.
20. Европейская система дистанционного зондирования высокого разрешения «Плеяды». – URL : <http://www.sovzond.ru/dzz/publications/541/3037.html>.
21. Снимки GeoEye-1. – URL : <http://www.racurs.ru/>, page=456.
22. Проект Gaia. – URL : [http://www.safran.ru/article.php?id\\_article=621](http://www.safran.ru/article.php?id_article=621).
23. Труды третьей воен.-науч. конф. космических войск : в 4 т. Т. 4. СПб., 2007.
24. Fender J. Future Trends in Large Space Optics // SPIE. – 2000. – Vol. 4013. – P. 682–686.

# A Queueing System with Determined Delay in Starting the Service

Alexey S. Eremin

Saint-Petersburg State University

7/9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russia

a.eremin@spbu.ru

**Abstract.** A one-server queueing system with general distribution of service time is considered. An approximation to the general distribution with two-stage law where first stage is deterministic and the second is exponential is suggested. It is shown that the coefficient of variation can be made arbitrarily small by choosing the parameters of the suggested distribution. The steady-state and transient equations are presented. The transient behavior is described with a system of delay-differential equations. Imitation results are compared to the obtained steady-state equations solution.

**Keywords:** queueing systems, coefficient of variation, two-stage service, deterministic time, transient system, delay differential equations.

## INTRODUCTION

In the paper we consider queueing systems with exponentially distributed customers arrival times and a single server. General distribution of service time ( $G$  in  $M/G/1$  Kendall's notation) lead to non-Markovian processes and their transient behaviour cannot be described with ordinary differential equations (ODEs). There exists a quite complicated procedure for determining steady-state probabilities and even more complicated way to compute non-stationary probabilities for the case of discrete Markov chains (see eg. [1]).

In order to make the analysis and computations easier the service distribution is approximated usually with  $k$ -stage Erlang ( $M/E_k/1$ ), hyperexponential ( $M/H_2/1$ ) or Coxian ( $M/C/1$ ) distributions, in which the service consists of several stages with exponentially distributed times. Thus the overall process becomes Markovian and a system of ODEs describes its transient behaviour. However, it can be shown that the Erlang distribution with  $k$  exponential stages of rates  $\mu_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  can only approximate the distribution with the coefficient of variation (CV) greater than  $1/\sqrt{k}$ . Otherwise the rates  $\mu_i$  must be taken negative or complex (which makes no physical sense, though is a smart mathematical instrument, if one is able to interpret obtained results). A similar situation with small CVs appears in other mentioned distributions [2].

The extreme case of CV equal to 0 means that the time is fixed and its probability density function (PDF) is  $\delta(t)$ , where  $T$  is the fixed service time and  $\delta(x)$  is Dirac delta function. In this case the process is denoted as  $M/D/1$ , where  $D$  stands for "determined time". Results for such models with finite capacity queue were obtained by Brun et al. for both the steady-state [3] and the transient [4] behaviour. The latter is described with delay-differential equations (DDEs).

In order to approximate small CVs a so-called "hyper-delta" distribution was proposed in [5]. Its PDF is a linear combination

of several delta functions and the cumulative distribution function (CDF) looks like a "stair-case". Indeed, the CV of such distribution can be made as small as needed and the physical sense of every probability is clear. Still there are two issues. First, the transient system is a multiple delay differential equation, so its numerical solution demands special methods [6] (while a single fixed delay equation can be solved with classical methods with adapted step-size control). Second, a discrete random variable (despite of the fact that it can provide any number of moments to have demanded values) is significantly different from a continuous one in physical sense.

Considering all the mentioned we suggest to use a two-stage service with first stage proceeded in determined time  $T$  and the second in exponentially distributed time with rate  $\mu$ . The CDF of both stages combined is

$$F(t) = u(t-T)(1 - e^{-\mu(t-T)}), \quad (1)$$

which now is continuous in contrast to the hyper-delta distribution, and PDF is  $f(t) = u(t-T)\mu e^{-\mu(t-T)}$ . Since this is just exponential distribution shifted by  $T$ , its mean value is  $T + 1/\mu$  and the standard deviation is the same as for the exponential distribution, namely  $1/\mu$ . CV then has the form

$$CV = \frac{1}{1 + \mu T}$$

and can be made as small as needed.

It should be mentioned that mostly we are interested in the study of transient behaviour, from one hand since the steady-state case can be derived from general formulae with  $F(t)$  substituted from (1), and from the other hand since much attention has been recently devoted to the analysis of critical loads in queueing systems (eg. [7]), i. e. to the study of their non-stationary characteristics.

## A SYSTEM WITHOUT A QUEUE

Let's start with a simple example to get the general idea of using a determined time stage. Consider a service system with no waiting room at all. Customers arrive according to a Poisson process at rate  $\lambda$ . The service is made in two stages: first, the same constant time  $T$  for each customer is spent, and the second stage time is distributed with another Poisson law with rate  $\mu$ . Denote the state with no customers in the system as  $\{0\}$ , when a customer is at the first stage of service as  $\{1,1\}$  and at the second stage as  $\{1,2\}$ . The probabilities of the states are  $p_0$ ,  $p_{1,1}$  and  $p_{1,2}$  respectively. The transition diagram is presented at Fig. 1.

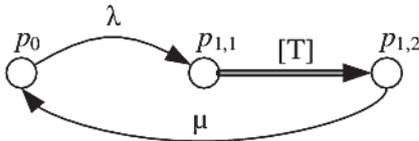


Fig. 1. *M/R/1/0* system transition diagram

The transition from the state  $\{1,1\}$  to  $\{1,2\}$  is shown with double arrow and time  $T$  is taken in square brackets to differ it from transition rates  $\lambda$  and  $\mu$ . We suggest denoting the system as *M/R/1/0* with *R* standing for “retarded”.

Assuming that the initial state of the system is  $p_0(0) = 1$  and all other probabilities equal to 0 we can write down the system of Chapman–Kolmogorov equations. In this case it is a retarded delay differential equation system

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -\lambda p_0(t) + \mu p_{1,2}(t), \\ \dot{p}_{1,1}(t) = \lambda p_0(t) - \lambda p_0(t-T)u(t-T), \\ \dot{p}_{1,2}(t) = \lambda p_0(t-T)u(t-T) - \mu p_{1,2}(t). \end{cases} \quad (2)$$

However, if we assume that all variables are strictly 0 for any  $t < 0$  (thus a jump discontinuity for  $p_0(t)$  in  $t = 0$  appear), we can omit writing down  $u(t-T)$ . In all following equations such assumption is made.

Properties of the system can be easily derived. The average service time is  $T + 1/\mu$  and the probability of the system being busy is  $\frac{T + 1/\mu}{1/\lambda + T + 1/\mu}$ .

UNBOUNDED QUEUE

Now we consider an infinite capacity queuing system with the same two-stage service (*M/R/1*-system in our denotations). The assumption  $\lambda < \mu/(1 + \mu T)$  is made to regulate the size of the queue. The transition diagram is presented at Fig. 2. As soon as one customer leaves the queue a new one comes to the “delay” stage of service.

Two arrows from  $\{k, 1\}$  to  $\{k+1, 1\}$  and  $\{k, 2\}$  to  $\{k+1, 2\}$  states actually mean that in any moment from the start of serving  $k$ -th customer another one can come into the queue. (A wide arrow covering the whole square between the four states would probably show it better, but it would definitely make a mess of the diagram).

In any moment during the time  $T$  a customer is at the first stage of service a new customer may enter the queue.

Then the rate of transition from  $\{1, 1\}$  state to  $\{1, 2\}$  is lower than in the system without a queue. Comparing to (2) the equation for the same three probabilities are

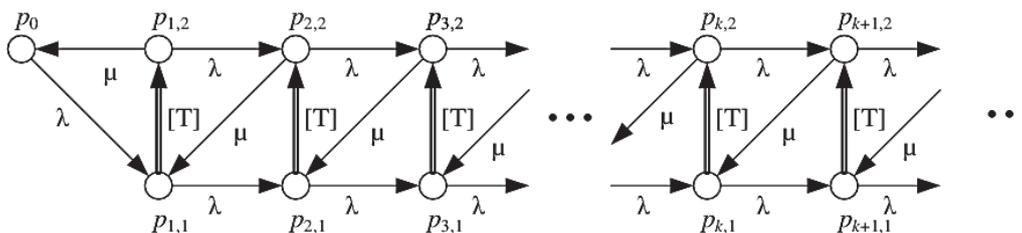


Fig. 2. Infinite capacity *M/R/1* system transition diagram

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -\lambda p_0(t) + \mu p_{1,2}(t), \\ \dot{p}_{1,1}(t) = \lambda p_0(t) + \mu p_{2,2}(t) - \lambda p_0(t-T) - \mu p_{2,2}(t-T), \\ \dot{p}_{1,2}(t) = e^{-\lambda T} * (\lambda p_0(t-T) + \mu p_{2,2}(t-T)) - \lambda p_{1,2}(t) - \mu p_{1,2}(t). \end{cases} \quad (3)$$

The writing can be simplified if we denote a “pure input function” into the state  $\{1, 1\}$  as  $s_1(t) = \lambda p_0(t) + \mu p_{2,2}(t)$ .

It takes into account all transitions that lead the system to the very beginning of the  $\{1, 1\}$  state when no time of the first service stage has yet passed. In the case of the state  $\{1, 1\}$  there are no other ways into it but from  $\{0\}$  and  $\{2, 2\}$ .

However, for all other  $\{k, 1\}$  states ( $k > 1$ ) such “pure input” is  $s_k(t) = \mu p_{k+1,2}(t)$ , while the transfer from  $\{k-1, 1\}$  made during the time of first service stage is not included.

FULL TRANSIENT SYSTEM

Instead of writing down the system for every  $p_{k,1}(t)$  and  $p_{k,2}(t)$  as in (3), we can make it much simpler if we introduce the probability of  $k$  customers being in the system as  $p_k(t) = p_{k,1}(t) + p_{k,2}(t)$  and writing down the system for  $p_{k,2}(t)$  and  $p_k(t)$ :

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -\lambda p_0(t) + \mu p_{1,2}(t), \\ \dot{p}_{1,2}(t) = e^{-\lambda T} s_1(t-T) - (\lambda + \mu) p_{1,2}(t), \\ \dot{p}_{2,2}(t) = e^{-\lambda T} (s_2(t-T) + \lambda T s_1(t-T)) - (\lambda + \mu) p_{2,2}(t), \\ \dots \\ \dot{p}_k(t) = e^{-\lambda T} \sum_{i=0}^{k-1} (\lambda T)^i s_{k-i}(t-T) - (\lambda + \mu) p_{2,2}(t), \\ \dots \end{cases} \quad (4)$$

and

$$\begin{cases} \dot{p}_1(t) = s_1(t) - \lambda p_1(t) - \mu p_{1,2}(t), \\ \dot{p}_2(t) = s_2(t) + \lambda p_1(t) - \lambda p_2(t) - \mu p_{2,2}(t), \\ \dots \\ \dot{p}_k(t) = s_k(t) + \lambda p_{k-1}(t) - \lambda p_k(t) - \mu p_{k,2}(t), \\ \dots \end{cases} \quad (5)$$

The values of  $p_{k,1}(t)$  can be then found as  $p_k(t) - p_{k,2}(t)$  if needed.

The system (4) is independent from (5) and can be solved separately, leaving (5) to be just a system of ordinary differential equations.

STEADY STATE PROBABILITY DISTRIBUTION

In the steady state  $p(t-T) = p(t) = p$ , and the algebraic system (4), (5) simplifies to

$$\begin{cases} \lambda p_0 = \mu p_{1,2}, \\ (\lambda + \mu)p_{1,2} = e^{-\lambda T} \lambda p_0 + e^{-\lambda T} \mu p_{2,2}, \\ (\lambda + \mu)p_{2,2} = \lambda T e^{-\lambda T} \lambda p_0 + e^{-\lambda T} (\lambda T \mu p_{2,2} + \mu p_{3,2}), \\ \dots \\ (\lambda + \mu)p_{k,2} = (\lambda T)^{k-1} e^{-\lambda T} \lambda p_0 \\ + e^{-\lambda T} \sum_{i=0}^{k-1} (\lambda T)^i \mu p_{k-i+1,2}, \\ \dots \\ \lambda p_k = \mu p_{k+1,2}, \quad k = \overline{1, \infty}, \end{cases} \quad (6)$$

with an additional normalising condition  $\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1$ .

Using the formula for stationary probabilities of M/G/1 system [1] with substitution of the known  $F(t)$  we can compute  $p_0$  as

$$p_0 = 1 - \lambda T - \lambda / \mu. \quad (7)$$

All other state probabilities  $p_i, i = \overline{1, \infty}$  are now much easier to compute from the system (6), than with application of the general formulae.

IMITATION COMPARISON

We have chosen the following parameters for a test computation of steady-state distribution:  $\lambda = 2, T = 0.2, \mu = 4$  (so, the coefficient of variation is  $\frac{5}{9} < \frac{1}{\sqrt{2}}$ , i.e. smaller than the smallest value achievable with two-stage Erlang). Also the probabilities were calculated using an imitation model with 2 000 000 served customers. The results are presented in the Table 1. They are equal up to a certain accuracy.

CONCLUSION

Queueing models with deterministic times of customer arrivals or services or some stages of more complex service processes are described with systems of retarded delay differential equations. They are much simpler to solve numerically than systems corresponding to general distributions, which include integral-differential equations.

Comparison of the imitation to the system (6)

Number of customers in the system	Probability by system (6)	Probability by imitation
0	0.1	0.09942
1	0.12377	0.12319
2	0.11287	0.11264
3	0.09720	0.09735
4	0.08302	0.08304
5	0.07085	0.07103
6	0.06046	0.06048
7	0.05160	0.05165
8	0.04403	0.04410
9	0.03757	0.03777
10	0.03206	0.03217

A very simple example was considered in this paper. Still, the results can be extended to systems with several service channels with different delays, with non-constant delays depending on time (e.g. some periodical behaviour of enter or service probability distributions) or even on the state of the system itself (e.g. longer “warm-up” for “cold” systems). Such an approach allows better approximations to general distributions in case of small enough coefficients of variation.

REFERENCES

1. Bocharov P. P., D’Apice C., Pechinkin A. V. *Queueing Theory*. Utrecht, Boston, Walter de Gruyter, 2004. 446 p.
2. Khomonenko A. D., Bubnov V. P. A use of coxian distribution for iterative solution of M/G/N/R  $\leq \infty$  queueing systems. *Probl. Of Control and Inform. Theory*, 1985, Vol. 14, pp. 143–153.
3. Brun O., Garcia J.-M. Analytical solution of finite capacity M/D/1 queues. *J. Appl. Prob.*, 2000, Vol. 37, pp. 1092–1098.
4. Garcia J.-M., Brun O., Gauchard D. Transient analytical solution of M/D/1/N queues. *J. Appl. Prob.*, 2002, Vol. 39, pp. 853–864.
5. Smagin V. A., Gusenitsa Ya. N. On modelling of non-stationary one-server queueing system with arbitrary distributions of customers arrivals and services [O modelirovanii odnokanal’noi nestatsionarnoi sistemy s proizvol’nym raspredeleniem momentov vremeni postupleniya zayavok i ih obsluzhivaniya]. *Inteltech. Technique of Communication [Inteltech. Tehnika Sredstv Svyazi]*, 2014, is. 3 (142), pp. 15–20.
6. Bellen A., Zennaro M. *Numerical Methods for Delay Differential Equations*. Oxford: Oxford Univ. Press, 2013. 395 p.
7. Bubnov V. P., Khomonenko A. D., Tyrva A. V. Software reliability model with coxian distribution of length of intervals between errors detection and fixing moments. *Proceedings — 35th Annual IEEE Int. Computer Software and Applications Conf. Workshops, COMPSACW*, 2011, pp. 310–314.

# Система массового обслуживания с детерминированным временем задержки начала обслуживания

Еремин А. С.

Санкт-Петербургский государственный университет  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9  
a.eremin@spbu.ru

**Аннотация.** Рассматривается одноканальная система массового обслуживания с общим законом распределения времени обслуживания. Общий закон предлагается приближать двухфазным распределением, первая фаза которого детерминированная, а вторая – экспоненциальная. Показано, что выбором параметров такого двухфазного распределения можно получить сколь угодно маленький коэффициент вариации. Представлены уравнения для переходного режима и для стационарного распределения вероятностей. Переходный процесс описывается системой дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Результаты имитационного моделирования сравниваются с решением системы на стационарные вероятности.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания, коэффициент вариации, двухфазное обслуживание, детерминированное время, переходный режим, дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом.

## REFERENCES

1. Bocharov P.P. *Queueing Theory* / P.P. Bocharov, C. D'Apice, A. V. Pechinkin. – Utrecht : Boston : Walter de Gruyter, 2004. – 446 p.
2. Khomonenko A. D. A use of coxian distribution for iterative solution of  $M/G/N/R \leq \infty$  queueing systems / A. D. Khomonenko, V. P. Bubnov // *Probl. Of Control and Inform. Theory.* – 1985. – Vol. 14. – P. 143–153.
3. Brun O. Analytical solution of finite capacity M/D/1 queues / O. Brun, J.-M. Garcia // *J. Appl. Prob.* – 2000. – Vol. 37. – P. 1092–1098.
4. Garcia J.-M. Transient analytical solution of M/D/1/N queues / J.-M. Garcia, O. Brun, D. Gauchard // *J. Appl. Prob.* – 2002. – Vol. 39. – P. 853–864.
5. Смагин В. А. О моделировании одноканальной нестационарной системы с произвольным распределением моментов времени поступления заявок и их обслуживания / В. А. Смагин, Я. Н. Гусеница // *Интелтех. Техника средств связи.* – 2014. – Вып. 3 (142). – С. 15–20.
6. Bellen A. *Numerical Methods for Delay Differential Equations* / A. Bellen, M. Zennaro. – Oxford : Oxford Univ. Press, 2013. – 395 p.
7. Bubnov V.P. Software reliability model with coxian distribution of length of intervals between errors detection and fixing moments / V. P. Bubnov, A. D. Khomonenko, A. V. Tyrva // *Proceedings – 35th Annual IEEE Int. Computer Software and Applications Conf. Workshops.* – COMPSACW. – 2011. – P. 310–314.

# Программный комплекс автоматизированного геодезического мониторинга искусственных сооружений для высокоскоростной железнодорожной магистральной «Москва – Казань – Екатеринбург»

Бубнов В. П., Никитчин А. А., Сергеев С. А.

Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия

bubnov1950@yandex.ru, anikitchin@gmail.com, serega\_svetl@mail.ru

**Аннотация.** Описан программный комплекс автоматизированной системы геодезического мониторинга искусственных сооружений высокоскоростной железнодорожной магистрали. Приведена архитектура комплекса, особенности построения его компонент и программная реализация на языке Java. Обозначены актуальные направления развития комплекса.

**Ключевые слова:** геодезический мониторинг, опасный объект, программный комплекс, высокоскоростное железнодорожное движение.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время резко возросли требования к обеспечению безопасности эксплуатации искусственных сооружений, к которым относятся автодорожные и железнодорожные мосты, тоннели метрополитена, плотины гидроэлектростанций, стадионы, ледовые дворцы, плавательные комплексы. Одно из основных направлений предотвращения аварий и разрушений этих особо опасных объектов, приводящих к порче и уничтожению значительных материальных ценностей и даже к человеческим жертвам – организация системы мониторинга технического состояния этих объектов. Это становится особенно актуальным при развитии высокоскоростного железнодорожного движения со скоростями движения до 400 км/ч.

В 2013 г. ОАО «Ленгипротранс» разработало «Обоснование инвестиций в строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали „Москва – Казань – Екатеринбург“ (ВСМ-2). Участок „Москва – Казань“, где в подразд. 2 раздела 5 предусматривалось строительство 221 искусственного сооружения (не считая водопропускных труб) общей протяженностью 104 406,5 пог. м для пропуска подвижного состава по трассе ВСМ.

Все сооружения можно классифицировать по следующим признакам:

- железнодорожные эстакады – 44 шт. (19,9% от общего числа), 53 176,8 пог. м (50,9% от общей протяженности);
- железнодорожные мосты через водотоки – 131 шт. (59,3% от общего числа), 45 610,9 пог. м (43,7% от общей протяженности), в том числе мосты через р. Клязьму 4007,0 пог. м; через р. Оку 4817,2 пог. м; через р. Суру – 3936,3 пог. м; через р. Волгу – 4576,6 пог. м;

- железнодорожные путепроводы над автомобильными (32 шт.) и железными (11 шт.) дорогами, скотопрогоны (3 шт.) (20,8% от общего числа), 5618,8 пог. м (5,4% от общей протяженности).

С учетом схем протяженных мостов через водотоки с эстакадами (67% от общей длины мостов) наличия эстакадных участков в путепроводах (37% от общей длины путепроводов) и исключения всех мостовых сооружений участка г. Москвы и Московской области, где высокоскоростной режим реализовываться не будет (11 эстакад, 12 путепроводов и 4 моста общей длиной 17203 пог. м), основным типом сооружения на участке высокоскоростного движения следует принять эстакаду (81,2% от общей длины сооружений 87 203 пог. м на участке высокоскоростного движения).

Для объективного анализа собираемой информации и своевременного реагирования на опасные отклонения искусственных сооружений от нормальной работы необходимо, чтобы в состав системы комплексной безопасности движения входила подсистема автоматизированного мониторинга искусственных сооружений. Проблема мониторинга искусственных сооружений рассмотрена в [1–6], однако комплексно применяется к искусственным сооружениям высокоскоростного железнодорожного движения впервые.

## АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

### АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

За основную часть мониторинга следует принять систему автоматизированного геодезического мониторинга (САГМ). САГМ собирает, систематизирует, хранит, анализирует, преобразует, отображает и распространяет пространственно-ординированные данные о контролируемых элементах особо опасного объекта для своевременного выявления критических величин деформаций, для установления причин их возникновения, для прогноза развития деформаций, выработки и принятия мер устранения развития нежелательных процессов и их последствий. На особо опасных объектах устанавливаются датчики: высокоточные инклинометры, спутниковые датчики геодезической аппаратуры, акселерометры, датчики раскрытия трещин и другие [5].

Одна из наиболее распространённых САГМ – система SODIS Building M. Она выполняет следующие функции:

- 1) управляет автоматизированной системой мониторинга технического состояния зданий и сооружений;
- 2) собирает и хранит информацию от датчиков и оборудования, обеспечивающих измерение контролируемых параметров;
- 3) обрабатывает и анализирует данные для определения технического состояния объекта;
- 4) настраивает спецпроцессор системы мониторинга и устанавливает правила определения технического состояния зданий и сооружений в автоматическом режиме.

Основные преимущества предлагаемой автоматизированной системы мониторинга искусственных сооружений (АСМИС) по сравнению с SODIS Building M:

- 1) более широкие возможности конфигурирования;
- 2) меньшее число ограничений при выборе аппаратных частей серверов и их операционных систем;
- 3) возможность оповещения о потенциально опасных состояниях контролируемых объектов через SMS либо электронную почту, что позволяет экономить на постоянном присутствии оператора на контролируемом объекте;
- 4) приложение, визуализирующее получаемую и обрабатываемую информацию, разработано в виде web-приложения, что позволяет пользоваться им с любого устройства, имеющего доступ в интернет и web-браузер на платформе WebKit.

Ядром АСМИС является программный комплекс, состоящий из трёх основных компонент (рис. 1):

- программного обеспечения локального сервера (ПОЛС);
- программного обеспечения удалённого сервера (REST API);
- графического интерфейса (Web Application).

Каждый компонент системы выполняет свою функцию, а все они взаимодействуют по протоколу TCP/IP.

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СЕРВЕРА

ПОЛС обеспечивает настройку, контроль состояния, сбор информации со всех датчиков, установленных на контролируемом сооружении.

ПО сервера отвечает следующим требованиям:

- платформенная независимость;
- возможность гибкой настройки в зависимости от типа и количества датчиков, используемых на объекте;
- самовосстановление (при потере соединения с каким-либо датчиком система должна продолжать функционировать и пытаться восстановить соединение).

В качестве языка программирования выбран платформеннонезависимый язык Java [7]. Обмен данными между контроллером и датчиками происходит по протоколу TCP/IP [8]. Таким образом, теоретически количество датчиков на одном объекте ограничено лишь количеством IP-адресов сети.

Основная задача локального сервера – считывание информации с датчиков.

Настройка ПОЛС выполняется с помощью конфигурационного файла, в котором описываются настройки всех датчиков, которые должен контролировать сервер, а также параметры этих датчиков. Таким образом, внутренняя структура ПОЛС не зависит от количества и типа датчиков, используемых на контролируемом объекте.

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УДАЛЁННОГО СЕРВЕРА (ПОУС)

При проектировании и разработке ПОУС были поставлены следующие требования:

- кроссплатформенность;
- прием данных со всех контролируемых объектов;
- круглосуточный анализ получаемых данных;
- представление получаемых данных и результатов их обработки в графическом интерфейсе.

Приём данных обеспечивает HTTP-сервер, который получает данные от объектов в формате JSON (Java Script Object Notation – текстовый формат данных) [9], проверяет, с какого объекта и с какого датчика присланы данные, и сохраняет их в соответствующую таблицу в базе данных (рис. 2).

На данном этапе разработки анализ данных заключается в проверке правильности принимаемых данных:

- 1) что данные не выходят за рамки позволенных диапазонов;



Рис. 1. Схема компонентов САГМ

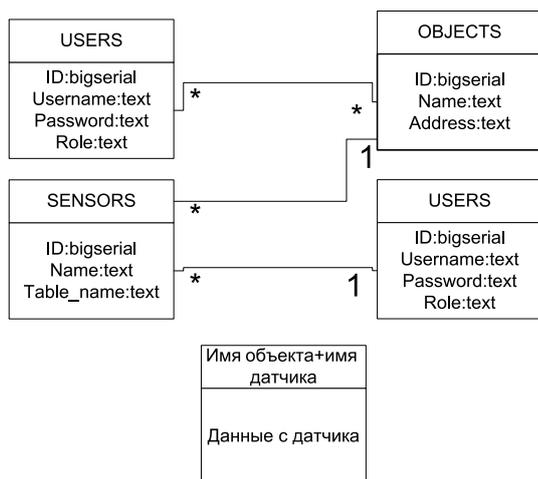


Рис. 2. Схема базы данных

2) временных интервалов: когда временные интервалы поступления данных от датчика неравномерны, необходимо заполнять их средними показателями, рассчитанными на основе последних 10 предыдущих значений. Это необходимо, так как во многих датчиках существует вероятность задержек на несколько секунд. Эта информация есть в документации датчиков, а для математических алгоритмов анализа данных требуются значения, поступающие с одинаковым интервалом.

Чтобы обеспечить связь между приложением графического интерфейса и ПОУС, для ПОУС был разработан сервер WebSockets. WebSockets – это надстройка над HTTP-протоколом, предоставляющая API для разработки интерактивных Web-приложений, более удобное, чем HTTP [10].

Такие параметры приложения, как порты HTTP-сервера и WebSocket-сервера, подключение к БД, конфигурируют с помощью XML-файла.

Необходимо отметить, что важной задачей в системах такого рода является защита данных, поэтому ПОУС не принимает никаких запросов по WebSocket, кроме запросов авторизации при новых подключениях.

UML-диаграмма классов удаленного сервера представлена на рис. 3.

### ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС СИСТЕМЫ

Web-приложение анализа данных является клиентской частью программного комплекса. В связи с этим основными задачами приложения стали визуализация данных, поступающих с удаленного сервера, в виде графиков и контроль доступа к данным.

К клиентской части предъявляют следующие требования:

- возможность разграничения контента по группам пользователей;
- удобство использования;
- поддержка кроссплатформенности.

Исходя из этих требований, в качестве технологии создания клиентской части выбран веб-интерфейс, использующий HTML5 с применением CSS, JavaScript. Данный подход чаще всего используют в веб-программировании, он позволяет проектировать интерфейсы с адаптивным дизайном

и с поддержкой разных типов устройств (ПК, планшетов, смартфонов).

В соответствии с требованиями и выбранной технологией необходимо определить подходящий фреймворк. На основании сравнительного анализа данных выбран фреймворк Sencha Touch, наиболее соответствующий требованиям для решения задачи. Sencha Touch – библиотека для разработки веб-сайтов и веб-сервисов, ориентированная на iPhone, iPad и Android.

Основная цель Sencha Touch – по мере возможности воссоздать стандартный интерфейс и поведение элементов интерфейса iOS, предоставив программистам гибкое API. Ядро библиотеки написано на JavaScript, CSS3 и HTML5. Приложение Sencha Touch – это клиент-серверная разработка, где в качестве клиента выступает браузер Safari или Chrome, а в качестве сервера – любой веб-сервис, способный «отвечать» в форматах JSON, XML и некоторых других.

На рис. 4 представлена UML-диаграмма классов Web-приложения.

На рис. 5 – скриншот работы графического интерфейса в момент просмотра данных, поступающих от датчика в режиме реального времени.

Все три программных компонента ПК САГМ могут находиться как на одном сервере, так и на трёх разных, что делает программный комплекс достаточно гибким в использовании. Время от поступления данных на локальный сервер до их отображения на компоненте «Графический интерфейс» зависит от задержек в канале связи, а также от интервала синхронизации удаленного и локального серверов.

Архитектура ПК устроена таким образом, что для сбора информации с каждого датчика выделяется отдельный поток вычислений. ПОЛС и REST API разработаны на языке JavaSE, что делает их платформеннонезависимыми.

Таким образом, САГМ способна в реальном времени получать, передавать, накапливать и анализировать данные со всех датчиков исследуемого объекта, а при необходимости ее можно дополнить неограниченным количеством новых типов сенсоров без прекращения функционирования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальное направление развития САГМ – внедрение инструментов глубокого анализа данных, позволяющих получать прогнозы изменения характеристик особо опасных объектов. Работу предполагается продолжить в направлениях создания алгоритмов и программ фильтрации и корреляционного анализа данных измерений, получаемых с датчиков, а также поддержки принятия решений по анализу и прогнозированию развития контролируемых опасных процессов на основе создания базы четких и нечетких продукционных правил.

Еще одно актуальное направление развития программного комплекса – шифрование данных перед передачей между локальным и удаленным серверами и устройствами пользователя, а также проверка подлинности при получении данных [11].

Программная реализация комплекса прошла регистрацию в государственном реестре программ для ЭВМ [12]. Программный комплекс автоматизированного геодезического мониторинга искусственных сооружений для высокоскоростной железнодорожной магистрали прошел

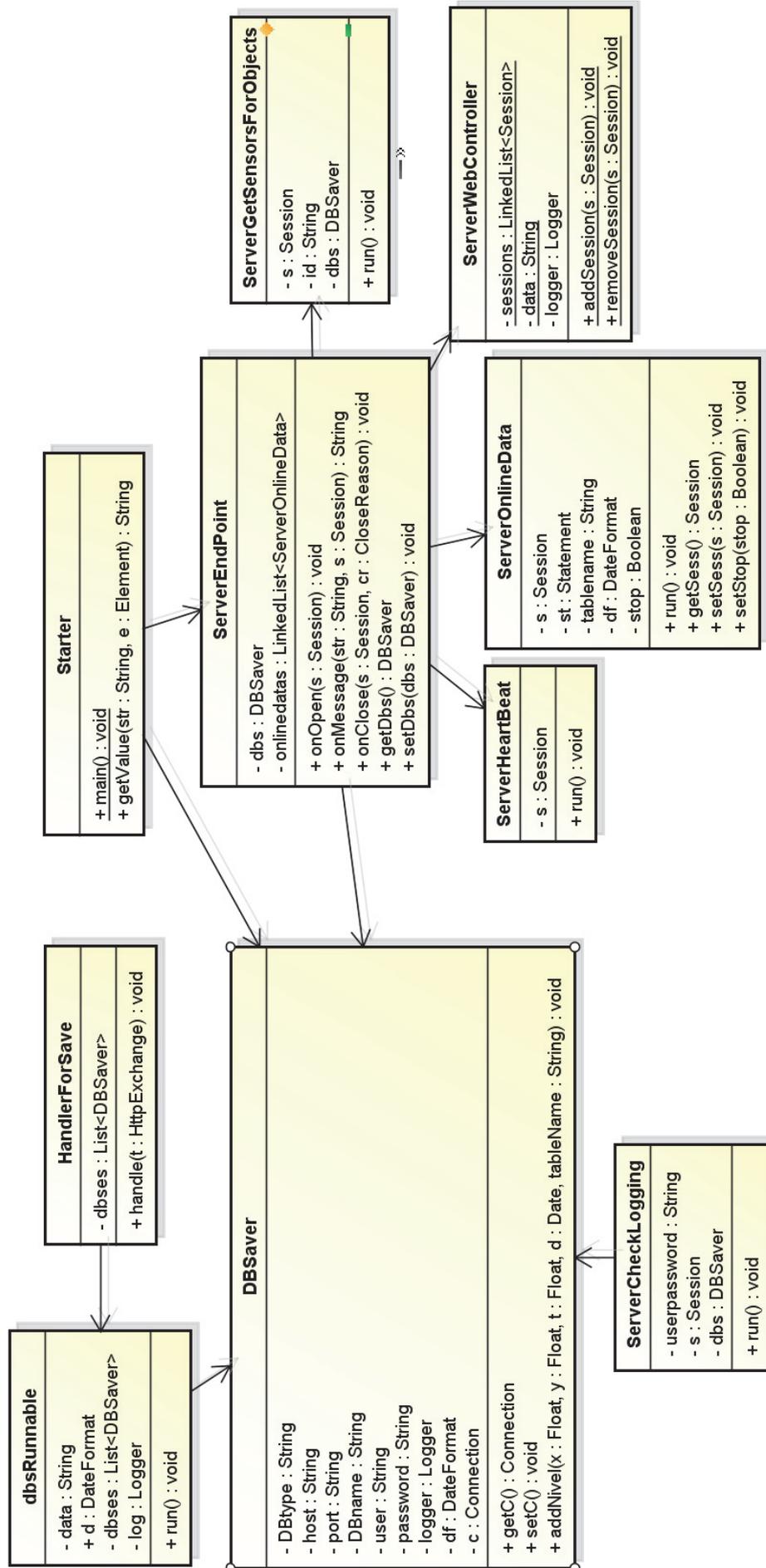


Рис. 3. UML-диаграмма классов удалённого сервера

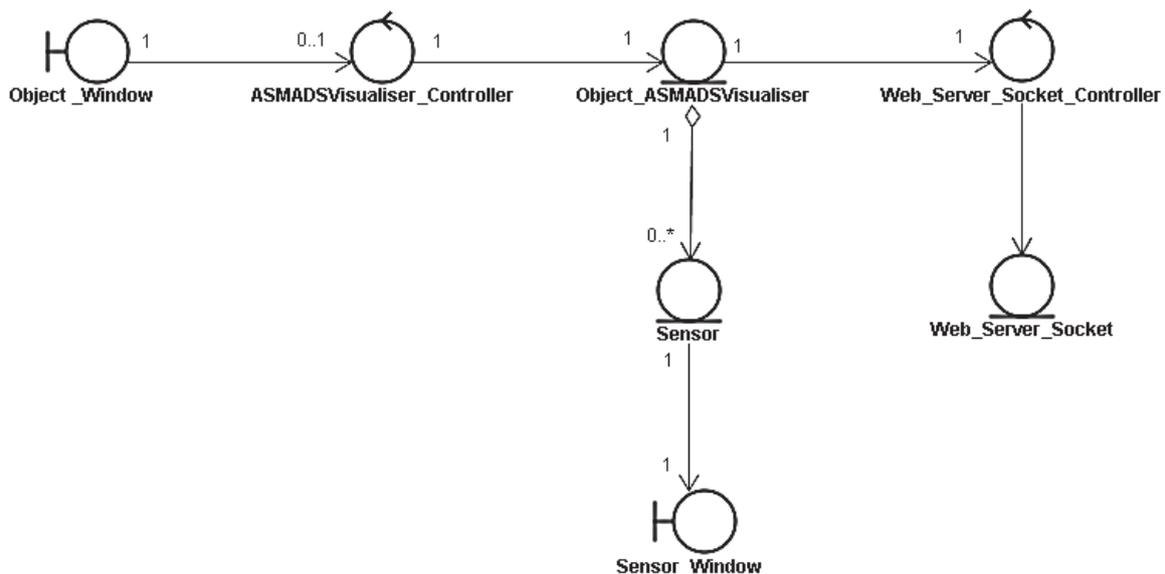


Рис. 4. UML-диаграмма классов Web-приложения



Рис. 5. Данные с датчика Nivel220

натурные испытания на одном из мостов Ленинградской области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Watanabe E. On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction / E. Watanabe, H. Furuta, T. Yamaguchi, M. Kano // Structure and Infrastructure Eng. – 2014. – Vol. 10, N 4. – P. 471–491.

2. Li S. L. SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge / S. L. Li, H. Li, Y. Liu et al. // Structural Control and Health Monitoring. – 2014. – Vol. 21, N 2. – P. 156–172.

3. Li A. Q. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data – progress in research/development of ‘Structural Health Monitoring’ / A. Q. Li, Y. L. Ding, H. Wang, T. Guo // Science China Technological Sci. – 2012. – Vol. 55, N 8. – P. 2212–2224.

4. Spencer B. F. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors / B. F. Spencer // Report No NSEL-040, Department of Civil and Environmental Eng. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, June 2015.

5. Брынь М. Я. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий / М. Я. Брынь, А. А. Никитчин, Е. Г. Толстов и др. // Изв. ПГУПС. – 2009. – № 2 (19). – С. 120–128.

6. Брынь М. Я. Программный комплекс для мониторинга деформаций особо опасных объектов / М. Я. Брынь, А. Д. Хомоненко, В. П. Бубнов и др. // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2014. – № 1. – С. 36–41.

7. <https://www.java.com/ru> (дата обращения 23.10.2015).

8. [http://www.javaportal.ru/java/articles/java\\_http\\_web/article02.html](http://www.javaportal.ru/java/articles/java_http_web/article02.html) (дата обращения 23.10.2015).

9. <http://www.json.org/json-ru.html> (дата обращения 23.10.2015).

10. <https://ru.wikipedia.org/wiki/WebSocket> (дата обращения 23.10.2015).

11. <http://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/javax/crypto/package-summary.html> (дата обращения 23.10.2015).

12. Сергеев С. А. Программный комплекс для мониторинга и анализа деформаций сооружений / С. А. Сергеев, А. Д. Хомоненко, В. П. Бубнов и др.; Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свид. о гос. регистрации программы ЭВМ № 2014619426. – М., 2014.

# Software for Automated Geodetic Monitoring of Artificial Structures for High-speed Railway “Moscow – Kazan – Yekaterinburg”

Bubnov V. P., Nikitchin A. A., Sergeev S. A.

Petersburg state transport university

Saint-Petersburg, Russia

bubnov1950@yandex.ru, anikitchin@gmail.com, serega\_svetl@mail.ru

**Abstract.** In article describes the software complex of automated system of geodetic monitoring of artificial high-speed railway trans. Describes the architecture of the complex, especially of the construction of its components and software implementation in Java. Given current direction of development of the complex.

**Keywords:** geodetic monitoring of dangerous objects, software suite, high-speed rail traffic.

## REFERENCES

1. Watanabe E., Furuta H., Yamaguchi T., Kano M. On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction. *Structure and Infrastructure Eng.*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 471–491.
2. Li S. L., Li H., Liu Y., Lan C., Zhou W., Ou J. SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 156–172.
3. Li A. Q., Ding Y. L., Wang H., Guo T. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data – progress in research/development of ‘Structural Health Monitoring’. *Science China Technol. Sci.*, 2012, vol. 55, no. 8, pp. 2212–2224.
4. Spencer B. F. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors. Report No NSEL-040, Department of Civil and Environmental Eng. Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, June 2015.
5. Bryn M. Ya., Nikitchin A. A., Tolstov E. G. et al. Geodetic deformation monitoring cable-stayed bridges based on satellite technology [Geodezicheskie monitoring deformatsii vantovykh mostov na osnove sputnikovykh tekhnologii]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya* [Proc. of the St. Petersburg Univ. Railways], 2009, no. 2 (19), pp. 120–128.
6. Bryn M. Ya., Khomonenko A. D., Bybnov V. P., Nikitchin A. A., Sergeev S. A., Novikov P. A., Titov A. I. Software for monitoring strain especially dangerous objects [Programmnyi kompleks dlia monitoringa deformatsii osobo opasnykh obektov]. *Problemy informatsionnoi bezopasnosti. Kompiuternye sistemy* [Prob. Inform. Security. Computer systems], 2014, no. 1, pp. 36–41.
7. <https://www.java.com/ru>, available at: 23.10.2015.
8. [http://www.javaportal.ru/java/articles/java\\_http\\_web/article02.html](http://www.javaportal.ru/java/articles/java_http_web/article02.html), available at: 23.10.2015.
9. <http://www.json.org/json-ru.html>, available at: 23.10.2015.
10. <https://ru.wikipedia.org/wiki/WebSocket>, available at: 23.10.2015.
11. <http://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/javax/crypto/package-summary.html>, available at: 23.10.2015.
12. Sergeev S. A., Khomonenko A. D., Bubnov V. P., Bryn M. Ya., Nikitchin A. A., Korshunova A. I., Shlapakova O. A. The software complex for monitoring and analysis of deformation structures [Programmnyi kompleks dlia monitoringa i analiza deformatsii sooruzhenii]. Federalnaia sluzhba po intellektualnoi sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmy EVM [The Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. Certificate of state registration of computer programs] no. 2014619426. Moscow, 2014.

# Применение гиперэкспоненциальной аппроксимации в задачах суммирования потоков

Рыжиков Ю. И.

ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербургский  
Институт информатики и автоматизации РАН,  
Санкт-Петербург, Россия  
ryzhbox@yandex.ru

Уланов А. В.

ВКА им. А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия  
ulanov246@rambler.ru

**Аннотация.** Представлена методика суммирования двух потоков на основе  $H_2$ -аппроксимации интервалов между событиями суммируемых потоков. Показаны возможности данной методики при суммировании  $k > 2$  потоков. Демонстрируются преимущества методики по сравнению с имеющимися подходами, а также при расчете начальных моментов интервалов между смежными завершениями обслуживания в многоканальных системах обслуживания. Результаты верифицированы на имитационных моделях.

**Ключевые слова:** суммирование потоков, гиперэкспоненциальная аппроксимация, начальные моменты, численные методы.

## ВВЕДЕНИЕ

В задачах теории очередей часто возникает необходимость суммирования случайных потоков. Например, при расчете сетей обслуживания выходящие из одних узлов потоки заявок суммируются на входе других. Выходящие потоки многоканальных узлов сети также являются суммарными потоками обслуживаний в каналах.

При суммировании моменты наступления событий каждого потока сносятся на общую временную ось (рис. 1). Необходимо найти распределение случайных интервалов между заявками суммарного потока.

Сумму  $k$  потоков можно найти, последовательно прибавляя к накопленному суммарному потоку следующий. В этом случае потребуется  $k - 1$  шагов суммирования. Возможна и другая техника суммирования – по схеме двоичного дерева. В этом случае суммируются два потока, затем пары, четверки и т. д. Число шагов при этом равно  $\lceil \log_2 k \rceil$ . В любом случае задача сводится к суммированию двух потоков.

Актуальность задачи суммирования потоков и явная недостаточность учета при этом только средних вызвали многочисленные попытки ее приближенного решения на уровне двух моментов. Наибольшее распространение полу-

чили эмпирические формулы для квадратов коэффициентов вариации вида

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda_i}{\Lambda} \right)^k C_i, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$ ,  $C_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  – соответственно, средняя интенсивность и квадраты коэффициентов вариации интервалов между событиями суммируемых потоков;  $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$  – суммарная средняя интенсивность потока;  $k$  – коэффициент пропорциональности (в [1, 2] предлагается  $k = 2$ , в [3]  $k = 3$ ). Для  $N$  статистически одинаковых потоков эта формула сводится к виду

$$C_\Sigma = \sum_{i=1}^N C N^{-k} = C / N^{k-1},$$

но тогда отношение  $C_\Sigma / C = N^{-(k-1)}$  не зависит от  $C$  и в логарифмическом масштабе представляет собой прямую линию. Графики этого отношения на рис. 2, построенные по результатам имитационного моделирования, эти утверждения опровергают. Таким образом, аппроксимации вида (1) оказываются несостоятельными.

Другим подходом является метод стационарных интервалов, предложенный Виттом в статье [1]. Здесь применяется аппроксимация интервалов между событиями суммируемых потоков по двум моментам либо гиперэкспоненциальным распределением второго порядка ( $H_2$ ), либо смещенным экспоненциальным ( $M^\nu$ ). Первое применяется, если коэффициент вариации интервалов между событиями суммируемых потоков  $\nu > 1$ , второе – если  $0 \leq \nu \leq 1$ . При этом суммировании моменты наступления событий каждого потока сносятся на общую временную ось (рис. 1). Дополнительную функцию распределения (ДФР) интервалов между событиями суммарного потока находят по формуле

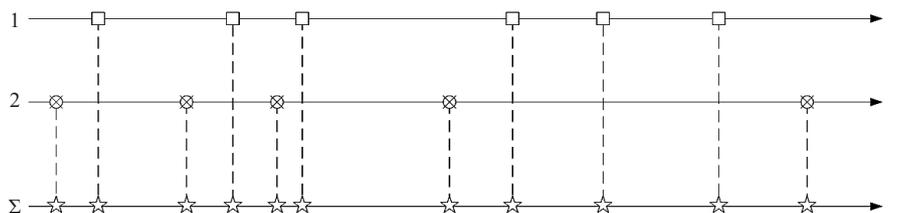


Рис. 1. Схема суммирования потоков

$$\overline{F}_\Sigma(t) = \frac{\lambda_1}{\Lambda} \overline{F}_1(t) \overline{F}_2^*(t) + \frac{\lambda_2}{\Lambda} \overline{F}_2(t) \overline{F}_1^*(t), \quad (2)$$

где  $\overline{F}_i(t)$ ,  $i = 1, 2$  – ДФР интервалов между событиями  $i$ -го потока;  $\overline{F}_i^*(t)$  – ДФР остаточного распределения интервалов  $i$ -го потока;  $\lambda_i$  – средняя интенсивность наступления событий  $i$ -го потока;  $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2$  – суммарная интенсивность потоков.

Поясним вероятностный смысл данной формулы. Момент появления очередного события суммарного потока – это минимум из моментов появления ближайших событий суммируемых потоков. Если предыдущим было событие первого потока, то распределение времени до события второго потока заменяется на соответствующее остаточное распределение, и наоборот. Таким образом, происходит взаимная модификация распределений между событиями суммируемых потоков. Частота выбора определяется долей  $\{\lambda_i/\Lambda\}$  заявок  $i$ -го потока в суммарном,  $i = 1, 2$ .

Независимо от Витта формула (2) была предложена в статье Рыжикова и Хомоненко [4]. В ней, в отличие от [1], было использовано исключительно  $H_2$ -распределение, но с возможностью комплексных и «парадоксальных» значений параметров, что позволило аппроксимировать случайные интервалы с любым коэффициентом вариации по трем начальным моментам. Это привело к упрощению расчетной схемы и к повышению точности расчета.

Тем не менее, открытым остается вопрос расчета остаточных распределений.

### $H_2$ -АППРОКСИМАЦИЯ И ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Гиперэкспоненциальное распределение второго порядка относится к распределениям фазового типа и предполагает выбор случайным процессом одной из двух альтернативных фаз (рис. 3). С вероятностью  $y_1$  процесс попадает в первую фазу и задерживается в ней на случайное время, распределенное по экспоненциальному закону с параметром  $\mu_1$ , с вероятностью  $y_2 = 1 - y_1$  процесс попадает во вторую фазу, где экспоненциальная задержка имеет параметр  $\mu_2$ .

Дополнительная функция  $H_2$ -распределения имеет вид

$$\overline{F}(t) = y_1 e^{-\mu_1 t} + y_2 e^{-\mu_2 t}. \quad (3)$$

Параметры  $H_2$ -распределения подбирают по методу моментов [5]. Поскольку данное распределение трехпараметрическое (четвертый параметр  $y_2 = 1 - y_1$ ), оно позволяет выровнять три начальных момента аппроксимируемого. Кендалл и Стьюарт считают: «Практически аппроксимация такого рода оказывается очень хорошей, даже если совпадают только три или четыре момента» [5, с. 127]. С этим выражением трудно не согласиться.

В зависимости от значений выравниваемых моментов параметры  $H_2$ -распределения также могут принимать комплексные и «парадоксальные» значения. Детальный анализ показывает, что при замене гамма-распределения с параметром формы  $1 < \alpha \leq 2$  на  $H_2$ -аппроксимацию одна из «вероятностей»  $\{y_j\}$ ,  $j = 1, 2$  будет отрицательной, а другая превысит единицу. На рис. 4 представлена зависимость типа параметров  $H_2$ -распределения от значений параметра формы  $\alpha$  гамма-распределения.

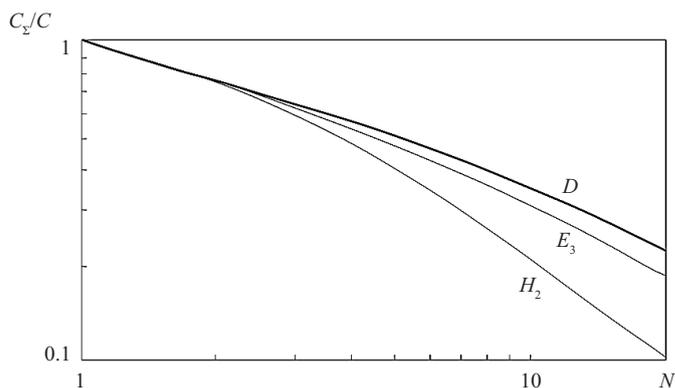


Рис. 2. Проверка эмпирических формул суммирования потоков

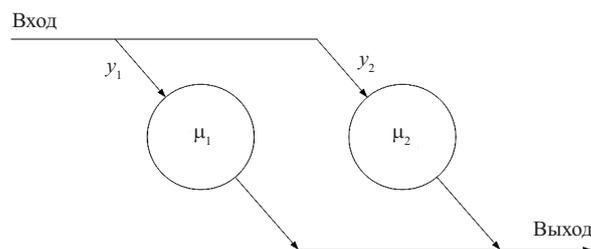


Рис. 3. Схема  $H_2$ -распределения

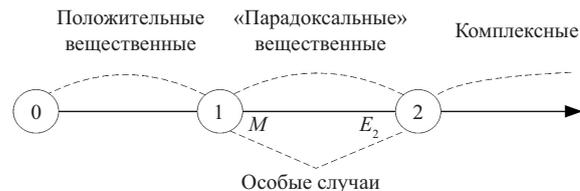


Рис. 4. Типы параметров  $H_2$ -распределения

Как показали многочисленные вычислительные эксперименты [5], парадоксальные и комплексные значения параметров  $H_2$ -распределения не мешают рассчитывать системы и сети массового обслуживания и в конечном счете приводят к осмысленным результатам, согласующимся с результатами, полученными другими методами на пересечении областей их применения.

Таким образом, применение  $H_2$ -распределения с возможностью комплексных и парадоксальных параметров позволяет аппроксимировать исходные распределения с произвольными коэффициентами вариации.

Заметим, что большинство специалистов по теории массового обслуживания игнорируют или исключают возможность работы с комплексными и парадоксальными параметрами распределений фазового типа, поскольку данные параметры интерпретируются как *вероятности* выбора фаз и *интенсивности* экспоненциальных задержек в них.

### РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Начальные моменты  $\{b_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots$  остаточного распределения получают из исходных  $\{f_k\}$  по известной из теории восстановления [6] формуле

$$b_k = \frac{f_{k+1}}{(k+1)f_1}. \quad (4)$$

Известно, что данная формула справедлива лишь при пуассоновском потоке модифицирующих событий, что в общем случае не имеет места. Для проверки этого тезиса и анализа влияния типа модифицирующего распределения на остаточное была создана имитационная модель расчёта начальных моментов интервалов от наступления событий модифицирующего потока до ближайшего события исходного (модифицируемого) при различных распределениях интервалов между событиями этих потоков.

В табл. 1 представлены начальные моменты остатка случайной величины при исходных  $B(t)$  распределениях Эрланга 3-го порядка  $E_3$  (коэффициент вариации  $v = 0,577$ ) и гиперэкспоненциальном  $H_2$  ( $v = 2$ ). Средние значения случайной величины в обоих случаях принимались равными единице. Начальные моменты остатков рассчитывались по формуле (4) и на имитационной модели (1 млн испытаний) при следующих модифицирующих распределениях: вырожденном  $D$  ( $v = 0$ ), Эрланга 4-го порядка  $E_4$  ( $v = 0,5$ ), показательном  $M$  ( $v = 1$ ) и гиперэкспоненциальном  $H_2$  ( $v = 2$ ).

Таблица 1  
Влияние модифицирующего распределения на исходное

$B(t)$	Порядок моментов	Численно по ф. (4)	Модифицирующее распределение			
			D	$E_4$	M	$H_2$
$E_3$	1	6,667 e-1	6,668 e-1	6,671 e-1	6,677 e-1	6,668 e-1
	2	7,407 e-1	7,411 e-1	7,418 e-1	7,410 e-1	7,412 e-1
	3	1,111 e+0	1,112 e+0	1,114 e+0	1,112 e+0	1,113 e+0
$H_2$	1	2,500 e+0	2,489 e+0	2,500 e+0	2,502 e+0	2,495 e+0
	2	1,500 e+1	1,490 e+1	1,499 e+1	1,502 e+1	1,495 e+1
	3	1,375 e+2	1,366 e+2	1,373 e+2	1,381 e+2	1,367 e+2

Как следует из табл. 1, вид модифицирующего распределения практически не влияет на остаточное, и формулу (4) можно с успехом применять при любом рекуррентном модифицирующем процессе. При этом возрастание отклонения имитационных результатов от полученных по формуле (4) при увеличении порядка моментов можно объяснить увеличением погрешности их статистического вычисления.

Для исходного  $H_2$ -распределения возможен другой подход к расчету параметров остаточного. Известно, что для показательного закона остаточное распределение совпадает с исходным (марковское свойство показательного закона). Аналогично дело обстоит с гиперэкспонентой, только необходимо знать, в какой из фаз уже находится процесс. Вероятность выбора фаз пропорциональна среднему времени пребывания в них  $\{y_i/\mu_i\}$ ,  $i = 1, 2$ , нормированных к единице. Соответственно, остаточное распределение также является гиперэкспоненциальным второго порядка с той же интенсивностью обслуживания в фазах  $\{\mu_i\}$ , но с модифицированными вероятностями выбора фаз:

$$y_1^* = \frac{y_1/\mu_1}{y_1/\mu_1 + y_2/\mu_2} = \frac{y_1\mu_2}{y_1\mu_2 + y_2\mu_1};$$

$$y_2^* = \frac{y_2/\mu_2}{y_1/\mu_1 + y_2/\mu_2} = \frac{y_2\mu_1}{y_1\mu_2 + y_2\mu_1}.$$

Таким образом, представленный подход позволяет не подбирать параметры остаточного  $H_2$ -распределения по рассчитанным предварительно моментам, а вычислить их непосредственно по формулам (5).

### СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК

Сравним результаты представленной методики суммирования потоков с предложенным в [1] методом стационарных интервалов.

Для начала напомним основные этапы метода стационарных интервалов:

1) по двум моментам распределений интервалов между событиями исходных потоков подобрать параметры аппроксимирующих распределений. При этом если коэффициент вариации  $v > 1$ , то аппроксимирующим выступает  $H_2$ -распределение, а если  $0 \leq v \leq 1$ , то подбирается смещенное экспоненциальное распределение  $M^d$ ;

2) по представленным в [1] формулам рассчитать два начальных момента суммарного потока.

Представленная в настоящей статье методика отличается от метода стационарных интервалов лишь тем, что на первом шаге независимо от значений коэффициентов вариации суммируемых потоков берется  $H_2$ -аппроксимация и не по двум, а по трем моментам. Соответственно, на втором шаге рассчитываются три начальных момента интервалов суммарного потока.

Плотность смещенного показательного распределения  $M^d$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-d)}; \quad t \geq d,$$

где  $d$  – постоянная, равная величине смещения случайной величины, распределенной по показательному закону с параметром  $\lambda$ .  $M^d$ -распределение является сверткой показательного и вырожденного распределений. Его параметры подбираются по двум моментам  $f_1, f_2$ :

$$\lambda = 1/\sqrt{f_2 - f_1^2}; \quad d = f_1 - \sqrt{f_2 - f_1^2}.$$

В [1, с. 140] приводятся различные формулы для второго момента суммарного потока при различных комбинациях функций распределений  $F_1(t), F_2(t)$  интервалов между событиями суммируемых потоков – оба  $H_2$ , оба  $M^d$ , одно  $H_2$ , а другое –  $M^d$ . Во всех этих случаях первый момент не зависит от типа распределений суммируемых потоков и вычисляется как обратная величина суммы средних интенсивностей.

Для примера рассмотрим случай  $M^d$ -аппроксимации, где  $f_1', f_1''$  – первые моменты распределений интервалов первого и второго суммируемых потоков. В табл. 2 представлены результаты сравнения представленной методики суммирования ( $\Sigma$ ) с методом стационарных интервалов Витта (W) для двух моментов и с имитационной моделью (ИМ) для 1 млн испытаний – для трех моментов. Суммировалось  $n$  потоков с функцией распределения интервалов  $F_i(t)$  и средней длиной интервалов, равной единице. При исходном гамма-распределении ( $\Gamma$ ) интервалов в скобках указаны коэффициенты вариации. При  $H_2$ -аппроксимации  $E_2$ -распределения начальные моменты последнего умножались на  $1 + j\epsilon$ ,  $\epsilon = 10^{-6}$ , где  $j$  – порядок момента,  $j = 2, 3$ .

Из представленных в табл. 2 результатов следует, что предложенная методика суммирования потоков является хорошей аппроксимацией, позволяющей получить три начальных момента распределения интервалов между событиями суммарного потока с высокой точностью. Метод стационарных интервалов при этом дает менее точный результат. Это связано с тем, что при его использовании учитываются два начальных момента суммируемых потоков, в то время как предложенная методика учитывает три момента. Заметим, что в случае  $H_2$ -аппроксимации распределений Эрланга параметры аппроксимирующего распределения принимали комплексно сопряженные значения.

ИНТЕРВАЛЫ МЕЖДУ ОБСЛУЖИВАНИЯМИ

Протестируем методику суммирования потоков на примере решения задачи расчета интервалов между смежными завершениями обслуживания в многоканальной СМО.

Т. Саати в монографии для дополнительной функции распределения (ДФР)  $B_n(t)$  интервалов между последовательными уходами обслуженных заявок из  $n$ -канальной полностью занятой системы предложил формулу

$$\bar{B}_n(t) = \left[ \bar{B}^*(t) \right]^{n-1} \bar{B}(t), \tag{6}$$

где  $\bar{B}(t)$  – ДФР времени обслуживания в одном канале,  $\bar{B}^*(t)$  – ДФР остаточного времени обслуживания в одном канале [7, с. 253]. Формула имеет прозрачный вероятностный смысл: для одного из каналов (только что начавшего обслуживания) берется полное распределение обслуживания, для прочих – остаточное, поскольку в них к этому моменту времени процессы обслуживания уже шли. Однако в этих каналах обслуживание началось не одновременно, следовательно, можно предполагать, что остаточные распределения времени обслуживания в них не должны совпадать. Таким образом, возникает необходимость проверки корректности формулы (6).

Заметим, что в результате обслуживания последовательные уходы образуют суммарный поток обслуженных заявок. Результаты применения формулы (6) и представленная в статье методика суммирования сопоставлены на имитационной модели (1 млн испытаний). Моделирование выполнялось для распределений  $B(t)$  длительности обслуживания Эрланга 3-го порядка ( $E_3$ ) (коэффициент вариации  $v = 0,577$ ) и гиперэкспоненциального  $H_2$  ( $v = 2$ ) при средней длительности обслуживания  $b_1 = 1$ . Результаты расчета первых трех начальных моментов на основании формулы Саати (С), описанной в данной статье, методики суммирования потоков ( $\Sigma$ ) и посредством имитационной модели (ИМ) представлены в табл. 3.

Таблица 2

Начальные моменты  $\{f_k^\Sigma\}$  суммарного потока

$F_i(t)$	$k$	Количество суммируемых потоков $n$								
		2			5			10		
		ИМ	$\Sigma$	$W$	ИМ	$\Sigma$	$W$	ИМ	$\Sigma$	$W$
$E_3$	2	3,78e-1	3,75e-1	3,65 e-1	6,87e-2	6,75e-2	6,45e-2	1,83e-2	1,80e-2	2,19e-2
	3	3,66e-1	3,65e-1	–	3,17e-2	3,09e-2	–	4,68e-3	4,51e-3	–
$E_2$	2	4,07e-1	4,06e-1	3,92e-1	7,10e-2	7,09e-2	6,62e-2	1,86e-2	1,86e-2	1,79e-2
	3	4,47e-1	4,45e-1	–	3,48e-2	3,49e-2	–	4,93e-3	4,90e-3	–
$\Gamma(1,5)$	2	7,32e-1	7,34e-1	6,92e-1	9,95e-2	9,96e-2	9,66e-2	2,25e-2	2,25e-2	2,24e-2
	3	1,91e+0	1,92e+0	–	8,88e-2	8,92e-2	–	8,57e-3	8,58e-3	–
$\Gamma(2,0)$	2	1,06e+0	1,06e+0	1,06e+0	1,23e-1	1,24e-1	1,19e-1	2,49e-2	2,48e-2	2,53e-2
	3	4,51e+0	4,55e+0	–	1,67e-1	1,71e-1	–	1,23e-2	1,24e-2	–

Таблица 3

Начальные моменты  $\{w_k\}$  интервалов между обслуживаниями в  $n$ -канальной СМО

$B(t)$	$k$	Число каналов $n$								
		2			3			5		
		ИМ	$\Sigma$	$C$	ИМ	$\Sigma$	$C$	ИМ	$\Sigma$	$C$
$E_3$	1	5,00 e-1	5,00 e-1	5,02 e-1	3,33 e-1	3,33 e-1	3,40 e-1	2,00 e-1	2,00 e-1	2,11 e-1
	2	3,78 e-1	3,75 e-1	3,72 e-1	1,78 e-1	1,76 e-1	1,77 e-1	6,87 e-2	6,75 e-2	7,03 e-2
	3	3,65 e-1	3,65 e-1	3,58 e-1	1,25 e-1	1,24 e-1	1,21 e-1	3,17 e-2	3,09 e-2	3,12 e-2
$H_2$	1	4,99 e-1	5,00 e-1	5,16 e-1	3,33 e-1	3,33 e-1	3,58 e-1	2,00 e-1	2,00 e-1	2,29 e-1
	2	1,06 e+0	1,06 e+0	1,04 e+0	4,14 e-1	4,15 e-1	4,23 e-1	1,23 e-1	1,24 e-1	1,44 e-1
	3	4,51 e+0	4,55 e+0	4,34 e+0	1,10 e+0	1,11 e+0	1,06 e-1	1,67 e-1	1,71 e-1	1,82 e-1

Очевидно, что применение методики суммирования позволяет получить более точные результаты, чем формула Саати, погрешность применения которой возрастает по числу каналов  $n$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим основные выводы из представленных в статье результатов.

1. Эмпирические аппроксимации вида (1) для квадрата коэффициента вариации суммарного потока несостоятельны, поэтому потребовалось разработать численные методы расчета параметров суммарного потока.

2. Представленный в [1] метод стационарных интервалов позволяет рассчитать лишь два начальных момента суммарного потока. При этом аппроксимация распределений интервалов суммируемых потоков также производится по двум моментам – либо  $H_2$ -распределением с вещественными параметрами, либо смещенным показательным  $M^d$ .

3. При модификации случайной величины тип распределения интервалов между событиями модифицирующего потока не влияет на остаточное распределение между событиями модифицируемого потока. Таким образом, «непуассоновость» суммируемых потоков не влияет на применимость формулы (2).

4. Применение гиперэкспоненциальной аппроксимации второго порядка с возможностью комплексных и парадоксальных параметров позволяет с большей точностью, чем метод стационарных интервалов, решить задачу суммирования потоков практически при любых исходных распределениях интервалов между заявками суммируемых потоков.

5. Применение представленной методики суммирования потоков для расчета начальных моментов распределения интервалов между завершениями обслуживания в полностью занятой  $n$ -канальной СМО дает более точный результат, чем предложенный Т. Саати в монографии [7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Whitt W. Approximating a Point Process by a Renewal Process : Two Basic Methods / W. Whitt // *Operations Res.* – 1982. – Vol. 30, is 1. – P. 125–147.

2. Chandy K. M. Approximate Methods for Analyzing Queuing Network Model of Computer Systems / K. M. Chandy, C. H. Sauer // *Computing Surveys.* – 1978. – Vol. 10, is 3. – P. 281–318.

3. Жожикашвили В. А. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ / В. А. Жожикашвили, В. М. Вишневецкий. – М. : Радио и связь, 1988. – 192 с.

4. Кендалл М. Дж. Теория распределений / М. Дж. Кендалл, А. Стьюарт ; пер. с англ. – М. : Наука, 1966. – 587 с.

5. Рыжиков Ю. И. Алгоритмический подход к задачам массового обслуживания / Ю. И. Рыжиков. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 496 с.

6. Рыжиков Ю. И. Расчет разомкнутых немарковских сетей с преобразованием потоков / Ю. И. Рыжиков, А. Д. Хомоненко // *Автоматика и вычислительная техника.* – 1989. – № 3. – С. 15–24.

7. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Т. Л. Саати ; пер. с англ. – М. : Сов. радио, 1965. – 510 с.

# Using Hyperexponential Approximation in the Summaion of Flows Problems

Ryzhikov Yu. I., Ulanov A. V.

Military Space Academy under A. F. Mozhaisky, Saint-Petersburg Institute of Informatics and Automatizations of Russian Academy of Science, Saint-Petersburg, Russia  
ryzhbox@yandex.ru

Ulanov A. V.

Military Space Academy under A. F. Mozhaisky  
Saint-Petersburg, Russia  
ulanov246@rambler.ru

**Abstract.** The technique of the summation of flows based on hyperexponential approximation of intervals between events is presented. Shows the advantages of this technique compared to the known methods for solving problems of calculating the initial moments of inter-service completion intervals in multichannel queuing systems, receiving the initial moments of waiting time nearest completion of service. The results tested on simulation.

**Keywords:** summation of flows, hyperexponentsial approximation, numerical methods, initial moments.

## REFERENCES

1. Whitt W. Approximating a Point Process by a Renewal Process: Two Basic Methods. *Operations Res.*, 1982, Vol. 30, is. 1, pp. 125–147.
2. Chandy K. M., Sauer C. H. Approximate Methods for Analyzing Queuing Network Model of Computer Systems / K. M. Chandy, C. H. Sauer. *Computing Surveys*, 1978, Vol. 10, is. 3, pp. 281–318.
3. Zhozhikashvili V. A., Vishnevsky V. M. Seti massovogo obsluzhivaniya. Teoriya i primeneniye k setyam EVM. [Queuing networks. Theory and applications]. Moscow, Radio I svyaz, 1988. 192 p.
4. Kendall M., Stuart A. Distribution Theory [Teoriya raspredelenij]. Moscow, Nauka, 1966. 472 p.
5. Ryzhikov Yu. I. Algorithm approach using queuing theory problems. [Algoritmicheskiy podhod k zadacham massovogo obsluzhivaniya]. St. Petersburg, MSA named from A. F. Mozhaisky, 2013. 496 p.
6. Ryzhikov Yu. I., Khomonenko A. D. Calculation of open non-markovian networks with flows corrections [Raschet razomknutyh nemarkovskikh setei s preobrazovaniem potokov]. *Avtomatika i vychislitel'naya tehnika* [Automatics and computers], 1989, no. 3, pp. 15–24.
7. Saaty T. L. Elements queuing theory with applications. [Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ego prilozheniya]. Moscow, Sovetskoe radio, 1965. 510 p.

# Ассоциативно-онтологический подход к обработке текстов на естественном языке

Кулешов С. В., Зайцева А. А.  
СПИИРАН  
Санкт-Петербург, Россия  
kuleshov@iias.spb.su

Марков В. С.  
СПбНЦ РАН  
Санкт-Петербург, Россия  
markov@spbrc.nw.ru

**Аннотация.** Статья посвящена обобщению методов обработки текстов на естественном языке, в основе которых лежит формирование и использование ассоциативно-онтологического представления данных. Показано, что предложенные методы обработки текстов на естественном языке подходят для выделения признаков текста для построения поисковых индексов, автоматического реферирования научных и технических документов, отнесения текста к предметной области, поиска в коллекции документов.

**Ключевые слова:** инфологический подход, онтология, семиологический подход, обработка текстов, семантика, визуализация.

## ВВЕДЕНИЕ

Данная статья обобщает и систематизирует разработанные ранее подходы к обработке естественно-языковых текстов.

При обработке естественно-языковых текстов наиболее распространен лингвистический подход, использующий анализатор текстов, основанный на синтаксисе.

Сложность реализации высокоточного анализатора русскоязычных текстов вызвана тесной связью синтаксиса и семантики, множеством синтаксически омонимичных конструкций, не допускающих однозначной интерпретации без привлечения знаний о семантической сочетаемости слов.

Изначально предложенный в [1–5] подход отличается от лингвистического приближением и адаптацией к реализационным возможностям компьютерных систем. Он назван семиологическим.

Семиология как наука в интерпретации У. Эко рассматривает совокупность информационных процессов как знаковые системы, предполагая, что они таковыми и являются, будучи, таким образом, также феноменами коммуникации. Тем самым она отвечает потребностям разнообразных современных научных дисциплин, как раз и пытающихся свести явления разного порядка к факту коммуникации [6]. Предметная ориентированность текстов показывает, что для коммуникативного акта не важны некоторые компоненты лингвистики.

Онтология предметной области проявляется не в словах, а в связях между понятиями. В качестве основного типа связи в такой онтологии используется ассоциативная связь между понятиями [7]. Словом, обозначающим понятие в некоторой онтологии, могут служить произвольные идентификаторы, а способы их связи определяются только структурой языка. Кроме того, семиологический подход к визуальной коммуникации проявился в попытке наглядно представить в иконографическом виде содержимое текстовых сообщений (проекты «визуальный словарь», «визуальный поиск») [8–10].

Впоследствии данный подход был расширен путем добавления к обработке текстов специального вида (энциклопедических и словарных) для выделения денотативных связей обработки текстов произвольного вида с выделением коннотативных связей, и стал упоминаться в литературе как «инфологический» [11–17] и «ассоциативно-визуальный».

Такой модифицированный подход предполагает использование методов обработки текстов специального вида, а также текстов на естественном языке с применением автоматически формируемой в процессе работы системы онтологии. Принципиальным отличием такого подхода является именно автоматическое формирование онтологии (семантического окружения) в процессе работы системы, в отличие от априорно заданной онтологии, используемой в подходах, основанных на применении Semantic Web [18, 19].

Есть группа подходов автоматизированного построения онтологий [20], которые базируются на поиске структур по шаблонам в предопределенной структуре.

В отличие от них, в разработанном подходе происходит ассоциативное формирование онтологий в процессе работы системы, а в качестве понятийного графа используется граф ассоциативных связей, формируемый непосредственно на самих текстах тематической антологии. Под антологией (в ряде работ под частным случаем антологии понимается корпус текстов) понимается набор текстов, отобранный с учетом некоторого условия (тематической близости, единства источника, близости времени появления и т. д.).

Многие авторы предлагают для выбора базовых терминов и задания связей между этими терминами использовать экспертные методы [21]. Следует сказать, что привлечение экспертов в данной задаче необходимо, но полностью полагаться на них нецелесообразно, так как могут появиться ошибки, поскольку у всех людей понятия ассоциируются с разными объектами, а применяемая в каждом конкретном случае терминология очень сильно зависит от сферы деятельности эксперта.

Описываемый в статье метод расширяет методы лингвистической статистики и логико-статистические методы [22, 23] для извлечения знаний и построения ассоциативной онтологии заданной предметной области.

## ПОСТРОЕНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО ОКРУЖЕНИЯ И ЕГО ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В ВИДЕ АССОЦИАТИВНОГО ГРАФА

Будем считать словом (лексемой) идентификатор  $w$ , состоящий из последовательности знаков, являющихся элементами множества букв. Символом конца предложения будем считать элементы множества {".", "!", "?"}. Назовем (синтаксическим) предложением  $S$  множество слов  $\{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ ,

синтаксически связанных друг с другом (находящихся в одном естественно-языковом предложении, заканчивающемся символом конца предложения).

Пусть имеется текст – множество синтаксически связанных упорядоченных слов, являющихся идентификаторами  $w \in \{W\} \subset \{\omega\}$ , где  $w$  – слово;  $W$  – множество слов в тексте,  $\omega$  – множество допустимых слов в языке. Допустимое множество слов в языке  $\omega$  определяется словарями и является каркасом онтологии. В ряде задач допускается динамическое расширение множества  $\omega$  неологизмами, а также различными внеязыковыми идентификаторами.

Текст сегментируется на семантически близкие компоненты.

Для каждого слова нормализуется морфологическая форма с использованием функции  $m$  морфологического анализа – получается каноническая форма слова, т. е. словоизменительные формы слова сводятся к исходной (для существительных – именительный падеж, единственное число; для прилагательных – именительный падеж, единственное число, мужской род; для глаголов – инфинитив и т. д.):  $m(w) = b, w \in \{W\}$ , где  $\{W\}$  – множество словоформ одного слова;  $b$  – нормальная (каноническая) форма слова. Свойства функции нормализации:

$$m(b) = b;$$

$$\forall w (w \notin \{W\}) \Rightarrow m(w) = b, b \notin \{W\}.$$

В ряде работ нормализация морфологической формы называется лемматизацией [22].

Для каждого слова в нормальной форме строится рейтинговое распределение  $\xi_w$ , которое используется в задачах визуализации, поиска и реферирования текстов.

Для слов строятся отношения  $R1$  и  $R2$  по следующему правилу:

$$(w_1, w_2) \in R1,$$

если  $w_1, w_2$  – последовательные слова в предложении.

$$\forall w_1 \in S \ \& \ \forall w_2 \in S \Rightarrow (w_1, w_2) \in R2.$$

В терминах [22] отношение  $R1$  определяет словосочетания  $w_2$  – последовательности, состоящие ровно из  $k$  слов, между которыми отсутствуют стоп-знаки предложения или текста.

Для отношений  $R1$  и  $R2$  строятся рейтинговые распределения  $\xi_{R1}$  и  $\xi_{R2}$  связей элементов.

Отношение  $R1$  используется для определения сложных терминов, состоящих из нескольких последовательных слов.

Если  $\xi_{R1}(w_1, w_2) > \varepsilon_1$ , то слова  $w_1$  и  $w_2$  считаются единым термином и для него повторяется вся обработка, при которой слова  $w_1, w_2$ , расположенные последовательно, рассматриваются как одно слово  $w_{1+2}$ .

Если  $\xi_{R2}(w_1, w_2) > \varepsilon_2$ , то слова  $w_1$  и  $w_2$  считаются семантически связанными. Полученное семантическое окружение (элемент ассоциативной онтологии) можно представить в виде множества  $V_2$ :

$$\xi_{R2}(w_1, w_2) > \varepsilon_2 \Rightarrow (w_1, w_2) \in V_2,$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – значения порогов визуализации. Множество  $V_2$  может быть визуализировано в виде графа, ребрами которого являются элементы  $(w_1, w_2) \in V_2$ . Параметр  $\varepsilon_2$  может

динамически изменяться для управления размером семантического окружения. Одним из примеров применения управления семантическим окружением может быть интерактивное изучение предметной области пользователем.

Экспериментально показано, что эффективность восприятия человеком информации ухудшается при одновременной визуализации более 20 объектов, поэтому в предлагаемом подходе визуализируются первые 20 элементов множества  $V_2$ , упорядоченных по убыванию частоты  $\xi_{R2}$  их использования (по такой схеме: не более 5 элементов первого уровня иерархии, каждый из которых содержит не более 3 связанных с ним элементов второго уровня иерархии). Возможна также фильтрация по принадлежности элементов  $V_2$  к тематическим областям.

### ТЕМАТИЧЕСКИЕ ОБЛАСТИ

Объединение ассоциативных связей по всем доступным источникам (антологии) образует  $E_G$  (ассоциативную онтологию).

$$E_T \subseteq E_G.$$

Объединение ассоциативных семантических окружений текстов по единой тематике дает тематическую область  $E_T$ :

$$\bigcup_i E_i = E_T,$$

где  $E_i$  – ассоциативное окружение к тексту  $T_i$  (рис. 1).

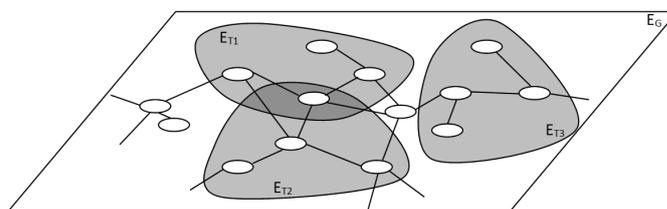


Рис. 1. Иллюстрация карты тематических областей

### РЕФЕРИРОВАНИЕ

В задачах интернет-мониторинга, а также для предоставления кратких аннотаций документов при поиске используется метод автоматического реферирования текстов, основанный на сформированном для текста семантическом окружении.

Идея реферирования основана на построении текста реферата путем выбора предложений исходного текста, имеющих рейтинг выше порогового значения.

Пусть  $s \in T$ , где  $s$  – предложения, являющиеся элементами множества предложений текста  $T$ . В этом случае рефератом текста назовем множество  $F$ , если  $F \subset T, |F| < |T|$ . Рефератом на каждом шаге  $\varepsilon = 1, 2, \dots, n$  является множество  $F_\varepsilon$ , которое формируется из предложений  $s$  исходного текста  $T$  по правилам  $s \in F_\varepsilon$ , если  $\rho(s) \geq \varepsilon$ , где  $\rho(s)$  – рейтинг предложения. Значение  $n$  определяется условием  $|F_n| = 0$ .

Для определения рейтинга предложения используется отношение  $R2$ , определяющее синтаксическую связь  $k$  между двумя словами предложения. Рейтинг предложения счита-

ется максимальный рейтинг элементов множества  $K_s \subset R_2$ , входящих в предложение  $s$ , рассчитываемый по формуле

$$\rho(s) = \max_{k \in K_s} |L_K|, s \in L_K,$$

где  $L_K$  – множество предложений текста  $T$ , содержащих синтаксическую связь  $k$  между двумя словами.

### АЛГОРИТМ АССОЦИАТИВНОГО ПОИСКА ТЕКСТОВ

Формально процесс ассоциативного поиска по текстам можно определить как выборку множества документов по поисковой фразе, удовлетворяющих условию наличия семантических связей в документе между всеми словами поисковой фразы.

Поисковая фраза представляет из себя множество слов, полученных из естественно-языкового запроса путем приведения всех слов в нормальную (каноническую) форму и удаления стоп-слов. Для поисковой фразы формируют ассоциативное окружение  $E_Q \subset E_G$  аналогично формированию ассоциативного окружения для текста, считая всю поисковую фразу синтаксическим предложением.

Для слов  $w_i$  текстового запроса  $Q$ :

$$\forall w_1 \in Q \& \forall w_2 \in Q \Rightarrow (w_1, w_2) \in E_Q.$$

При операции поиска  $E_R = E_Q \cap E_G$  по запросу  $Q$  возможны следующие случаи:

- $|E_R| = |E_Q|$  – существуют документы, содержащие все связи запроса;
- $|E_R| < |E_Q|$  – не существует документа в антологии, имеющего все связи запроса, онтология неполная или запрос некорректен;
- $|E_R| \equiv \emptyset$  – по запросу ничего не найдено (в онтологии нет связей, удовлетворяющих поисковому запросу).

Результатом выполнения запроса является множество документов  $\{T_i\}$ ,  $E_{T_i} \cap E_Q \neq \emptyset$ , которое преобразуется в упорядоченный список (SERP) путем применения функции ранжирования.

Поиск документов, отвечающих поисковой фразе, производится путем выбора документов, удовлетворяющих условию наличия всех связей между словами, имевшимися в поисковой фразе (рис. 2).

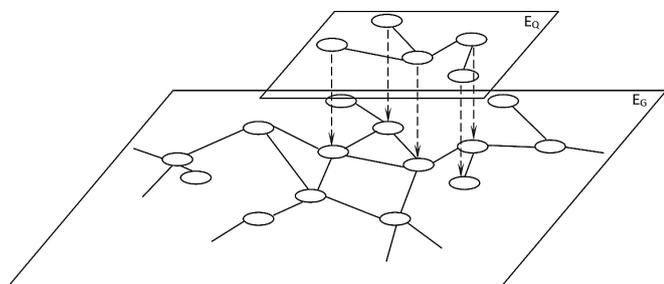


Рис. 2. Иллюстрация принципа ассоциативного поиска на основе поиска подграфа в графе

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в статье подход и предложенные на его основе методы обработки текстов на естественном языке успешно

решают целый круг задач, связанных с автоматизированной обработкой текстов, таких как выделение признаков текста для построения поисковых индексов, автоматическое реферирование научных и технических документов, отнесение текста к предметной области (локализация положения в ассоциативной онтологии), поиск в коллекции документов и другие.

На основе описанного подхода могут быть построены поисковые и справочные системы с использованием ассоциативно-онтологического поиска информации [8, 9, 24–26].

В этих системах может быть реализован автоматический отбор фактологических и справочных данных с одновременным игнорированием коммерческих и рекламных предложений, а также различных видов поискового спама.

Подход дает возможность реализовать подсистему тематической локализации области поиска (по областям знания и сферам деятельности) путем работы в соответствующей антологии. Имеется возможность поиска кластеров однотемных документов с выделением вероятного первоисточника.

Принцип работы такой системы – поиск информационного окружения какого-либо процесса, явления или персоны. Здесь под информационным окружением понимаются те ассоциации, которые могут возникать у человека в текущий момент под влиянием внешнего окружения. Система может решать задачу поиска документов и фактов при недостатке начальных данных. Как правило, в таких случаях известно лишь одно или несколько ключевых слов и ничего более, а недостающие ключевые слова добавляются постепенно при помощи их итеративного выбора из ассоциативного окружения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В. В. Тенденции развития информационных систем. Базы данных, базы знаний, онтологические, логистические, семиологические / В. В. Александров, Н. А. Андреева, С. В. Кулешов // Современные проблемы социально-экономического развития информационных технологий : сб. тр. междунар. конф., Баку, 2004. – Баку, 2004. – С. 40–51.
2. Александров В. В. Семиологический подход построения информационно-аналитических систем / В. В. Александров, Н. А. Андреева, С. В. Кулешов // Системные проблемы надежности, качества, информационных и электронных технологий (Инноватика-2004) : материалы Междунар. конф. и Рос. науч. школы, Сочи, 2004. – М., 2004. – С. 3–16.
3. Александров В. В. Семиологический подход и информационно-аналитические системы / В. В. Александров, С. В. Кулешов, Р. М. Юсупов // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании : докл. и тез. междунар. науч. конф., Ташкент, 2004. – Ташкент, 2004. – С. 13–23.
4. Александров В. В. Визуальный динамический глоссарий – VISGLOSS / В. В. Александров, Н. А. Андреева, С. В. Кулешов // Системные проблемы надежности, качества, информационных технологий (Инноватика-2005) : материалы X междунар. конф. и Рос. науч. школы, Сочи, 2005. – М., 2005. – С. 4–8.

5. Александров В. В. Семиологические информационные системы – аналитическое самореферирование / В. В. Александров, С. В. Кулешов // Системные проблемы надежности, качества, информационных технологий (Инноватика-2005) : материалы X междунар. конф. и Рос. науч. школы, Сочи, 2005. – М., 2005. – С. 9–14.
6. Эко У. Отсутствующая структура. Введение в семиологию / У. Эко. – СПб. : Петрополис, 1998. – 432 с.
7. Александров В. В. Системное моделирование. Методы построения информационно-логистических систем : учеб. пособие / В. В. Александров, Н. А. Андреева, С. В. Кулешов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 95 с.
8. Александрова В. В. VisualWorld.ru когнитивная технология представления знаний / В. В. Александрова, Н. А. Андреева, С. В. Кулешов // Будущее сильной России – в высоких технологиях : тр. Вторых Всерос. науч. чтений, СПб., 2008. – СПб. : Логос, 2008. – С. 28–32.
9. Andreeva N. A. VisualWorld.ru – the internet-educational resource / N. Andreeva, P. Kokorin, S. Kuleshov // Proc. Distributed Intel. Syst. and Technol. Workshop, St. Petersburg, 2008. – St. Petersburg, 2008. – Pp. 163–168.
10. Alexandrov V. V. The Visual Glossary as New Information Technology for Science Education / V. V. Alexandrov, S. V. Kuleshov, N. A. Semushkina // Education and Information Systems, Technologies and Applications (EISTA) : proc. 6th Int. Conf., Orlando, Florida, USA, 2008. – Orlando, Florida, USA, 2008.
11. Александров В. В. Интернет-обучение и поиск информации. Поиграем в ассоциации! / В. В. Александров, С. В. Кулешов // Будущее сильной России – в высоких технологиях : сб. трудов Всерос. чтений, СПб., 2007. – СПб., 2007. – С. 29–33.
12. Александров В. В. Аналитический мониторинг INTERNET-контента. Инфолингвистический подход / В. В. Александров, С. В. Кулешов // Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика-2007) : материалы Междунар. конф. и Рос. науч. школы, Сочи, 2007. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – С. 80–83.
13. Александров В. В. Концепция построения информационно-логистических систем / В. В. Александров, С. В. Кулешов, П. П. Кокорин // Системные проблемы надежности, качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика-2008) : материалы Междунар. конф. и Рос. науч. школы, Сочи, 2008. – М. : Энергоатомиздат, 2008. – С. 21–23.
14. Кокорин П. П. Инфолингвистический подход к разработке систем «обучение через развлечение» (edutainment) / П. П. Кокорин, Р. А. Колесников, Н. А. Андреева, К. А. Фролов, Ш. А. Боумедин, С. В. Кулешов // Информ.-измерительные и управляющие системы. – 2009. – Т. 7, № 11. – С. 42–48.
15. Кокорин П. П. Инфолингвистическая система аналитического мониторинга научно-технических фондов библиотек // Информ.-измерительные и управляющие системы. – 2009. – Т. 7, № 4. – С. 11–16.
16. Кулешов С. В. Аппаратная реализация СУБД в инфолингвистических системах / С. В. Кулешов, П. П. Кокорин // Тр. СПИИРАН. – 2010. – Вып. 14. – С. 244–250.
17. Александров В. В. Аналитический мониторинг Internet-контента. Инфолингвистический подход / В. В. Александров, С. В. Кулешов // Качество. Инновации. Образование. – 2008. – № 3. – С. 68–70.
18. Smirnov A. V. Intelligent Manufacturing Cover image Agent-based support of mass customization for corporate knowledge management. / A. V. Smirnov, M. Pashkin, N. Chilov, T. Levashova // Eng. Appl. Artificial Intel. – 2003. – Vol. 16, is. 4. – P. 349–364.
19. Zenuni X. State of the Art of Semantic Web for Healthcare / X. Zenuni, B. Raufi, F. Ismaili, J. Ajdari // Procedia – Soc. Behav. Sci. – 2015. – Vol. 195. – P. 1990–1998.
20. Оробинская Е. А. Метод автоматического построения онтологий предметной области на основе анализа лингвистических характеристик текстового корпуса / Е. А. Оробинская // Интернет и современное общество (IMS-2012) : тр. XV Всерос. объединенной конф., СПб., 2012. – СПб., 2012. – С. 209–212.
21. Поляков А. О. Построение моделей профессионального знания на основе использования лингвистического подхода / А. О. Поляков // Интеллектуализация автоматизации проектирования : сб. тр. СПИИРАН. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1994. – С. 16–37.
22. Филиппович Ю. Н. Семантика информационных технологий : опыты словарно-тезаурусного описания / Ю. Н. Филиппович, А. В. Прохоров; предисл. А. И. Новикова. – М. : Изд-во МГУП, 2002. – 368 с.
23. Бектаев К. Б. Математические методы в языкознании. Ч. 2. Математическая статистика и моделирование текста / К. Б. Бектаев, Р. Г. Пиотровский. – Алма-Ата, 1974. – 336 с.
24. Кулешов С. В. Аналитический мониторинг интернет ресурсов с целью выявления потенциально опасного содержания / С. В. Кулешов // Перспективные системы и задачи управления : материалы IV науч.-практич. конф., Таганрог, 2008. – Таганрог, 2009. – С. 255.
25. Михайлов С. Н. Методика инфолингвистического анализа семантического содержания обращений пациентов для организации электронной записи / С. Н. Михайлов, О. И. Малашенко, А. А. Зайцева // Тр. СПИИРАН. – 2015. – Вып. 42. – С. 140–154.
26. Зайцева А. А. Метод оценки качества текстов в задачах аналитического мониторинга информационных ресурсов / А. А. Зайцева, С. В. Кулешов, С. Н. Михайлов // Тр. СПИИРАН. – 2014. – Вып. 6 (37). – С. 144–155.

# Associative-Ontological Approach to Natural Language Texts Processing

Kuleshov S. V., Zaytseva A. A.  
SPIIRAS  
St. Petersburg, Russia  
kuleshov@iiias.spb.su

Markov V. S.  
SPbAC RAS  
St. Petersburg, Russia  
markov@spbrc.nw.ru

**Abstract.** The paper considers the generalization of natural language texts processing methods based on the associative-ontology data representation forming. It is shown that the proposed methods of natural language text processing are suitable for the tasks of text attributes extraction for search indexes creation, automated scientific and technical texts annotation, determining texts subject area, search through the text collections.

**Keywords:** infological approach, ontology, semiological approach, texts processing, semantics, visualization.

## REFERENCES

1. Alexandrov V. V., Andreeva N. A., Kuleshov S. V. Trends in the Development of Information Systems. Databases, Knowledge Bases, Ontological, Logistic, Semiological [Tendentsii razvitiia informatsionnykh sistem. Bazy dannykh, bazy znaniia, ontologicheskii, logisticheskie, semiologicheskii]. *Proc. "Modern problems of socio-economic development of information technology"*. Baku, 2004. Pp. 40–51.
2. Alexandrov V. V., Andreeva N. A., Kuleshov S. V. Semiological Approach of Building Information-analytical Systems [Semiologicheskii podkhod postroeniia informatsionno-analiticheskikh sistem]. *Proc. "System problems of reliability, quality of information and electronic technologies"*. Sochi, 2004. Pp. 3–16.
3. Alexandrov V. V., Kuleshov S. V., Yusupov R. M. Semiological Approach and Information and Analytical Systems [Semiologicheskii podkhod i informatsionno-analiticheskii sistem]. *Proc. "Infocommunication and computing technologies in Science, Engineering and Education"*. Tashkent, 2004. Pp. 13–23.
4. Alexandrov V. V., Andreeva N. A., Kuleshov S. V. Visual Dynamic Glossary – VISGLOSS [Vizual'nyi dinamicheskii glossarii – VISGLOSS]. *Proc. "System problems of reliability, quality of information and electronic technologies"*. Sochi, 2005. Pp. 4–8.
5. Alexandrov V. V., Kuleshov S. V. Semiological Information Systems – Analytical Self-annotation [Semiologicheskii informatsionnye sistemy – analiticheskoe samoreferirovanie]. *Proc. "System problems of reliability, quality of information and electronic technologies"*. Sochi, 2005. Pp. 9–14.
6. Eko U. *Otsutstvuiushchaia struktura. Vvedenie v semiologiu* [Lack of Structure. Introduction to Semiology]. St. Petersburg, Petropolis, 1998. 432 p.
7. Alexandrov V. V., Andreeva N. A., Kuleshov S. V. *Sistemnoe modelirovanie. Metody postroeniia informatsionno-logisticheskikh sistem: uchebnoe posobiye* [System Modeling. Methods of Construction Information and Logistics Systems: study guide], St. Petersburg, Publ. "Politehnika", 2006. 95 p.
8. Alexandrova V. V., Andreeva N. A., Kuleshov S. V. VisualWorld.ru Cognitive Knowledge Representation Technology [VisualWorld.ru kognitivnaia tekhnologiia predstavleniia znaniia]. *Trudy "Vtorye Vserossiiskie nauchnye chteniia Budushchee sil'noi Rossii – v vysokikh tekhnologiiakh"* [Proc. "Second All-Russian Scientific Readings Future of a Strong Russia is in Hi-Tech"]. St. Petersburg, 2008. Pp. 28–32.
9. Andreeva N. A., Kokorin P. P., Kuleshov S. V. VisualWorld.ru – the Internet-Educational Resource. *Proc. "Distributed Intel. Syst. and Technol. Workshop"*. St. Petersburg, 2008. Pp. 163–168.
10. Alexandrov V. V., Kuleshov S. V., Semushkina N. A. The Visual Glossary as New Information Technology for Science Education. *Proc. "Education and Information Systems, Technologies and Applications (EISTA)"*. Orlando, Florida, USA, 2008.
11. Alexandrov V. V., Kuleshov S. V. Internet-Training and Information Search. Let's Play in the Associations! [Internet-obuchenie i poisk informatsii. Poigraem v assotsiatsii!] *Trudy "Vserossiiskie nauchnye chteniia Budushchee sil'noi Rossii – v vysokikh tekhnologiiakh"* [Proc. "Russian Scientific Readings Future of a Strong Russia is in Hi-Tech"]. St. Petersburg, 2007. Pp. 29–33.
12. Alexandrov V. V., Kuleshov S. V. Analytical Monitoring of Internet Content. Infological Approach [Analiticheskii monitoring INTERNET kontenta. Infologicheskii podkhod]. *Proc. "System problems of reliability, quality of information and electronic technologies"*. Sochi, 2007. Pp. 80–83.
13. Alexandrov V. V., Kuleshov S. V., Kokorin P. P. The Concept of Building of Information and Logistics Systems. [Kontsepsiia postroeniia informatsionno-logisticheskikh sistem]. *Proc. "System problems of reliability, quality of information and electronic technologies"*. Sochi, 2008. Pp. 21–23.
14. Kokorin P. P., Kolesnikov R. A., Andreeva N. A., Frol'ov K. A., Sh. Boumedyen, Kuleshov S. V. The Infological Approach to Develop Edutainment Systems [Infologicheskii podkhod k razrabotke sistem "obuchenie cherez razvlechenie" (edutainment)]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchia sistemy [Information-measuring and Control Systems]*, 2009, no. 11 (7), pp. 42–48.
15. Kokorin P. P. Infological System for Analytical monitoring of Scientific and Technical Literature in Electronic Libraries [Infologicheskii sistema analiticheskogo monitoringa nauchno-tekhnicheskikh fondov bibliotek]. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchia sistemy [Information-measuring and Control Systems]*, 2009, no. 4 (7), pp. 11–16.
16. Kuleshov S. V., Kokorin P. P. Hardware Implementation of the DBMS for Infological Systems [Apparatnaia realizatsiia SUBD v infologicheskikh sistemakh]. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2010, no. 14, pp. 244–250.
17. Alexandrov V. V., Kuleshov S. V. Analytical Monitoring of Internet Content. Infological Approach [Analiticheskii moni-

toring Internet kontenta. Infologicheskii podkhod]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie [Quality. Innovations. Education]*, 2008, no. 3, pp. 68–70.

18. Smirnov A. V., Pashkin M., Chilov N., Levashova T. Intelligent Manufacturing Cover image Agent-based support of mass customization for corporate knowledge management. *Eng. Appl. Artificial Intel.*, 2003, Vol. 16, Is. 4, pp. 349–364.

19. Zenuni X., Raufi B., Ismaili F., Ajdari J. State of the Art of Semantic Web for Healthcare. *Procedia – Soc. Behav. Sci.*, 2015, vol. 195, pp. 1990–1998.

20. Orobinskaya E.A. Automatic Method Of Domain Ontology Construction Based on Characteristics of Corpora POS-Analysis [Metod avtomaticheskogo postroeniia ontologii predmetnoi oblasti na osnove analiza lingvisticheskikh kharakteristik tekstovogo korpusa]. *Trudy "XV Ob'edinennaia rossiiskaia konferentsiia Internet i sovremennoe obshchestvo" [Proc. "XV United Russian conf. IMS-2012"]*. St.Petersburg, 2012, pp. 209–212

21. Polyakov A. O. Building of Models of Professional Knowledge through the Use of Linguistic Approach [Postroenie modelei professional'nogo znaniia na osnove ispol'zovaniia lingvisticheskogo podkhoda]. *Intellektualizatsiia avtomatizatsii proektirovaniia: sbornik trudov SPIIRAN [Intellectualization of design automation: a collection of papers of SPIIRAS]*. St. Petersburg, Publ. of SPbGTU, 1994. Pp. 16–37.

22. Philippovich Yu. N., Prokhorov A. V. *Semantika informatsionnykh tekhnologii: opyty slovarno-tezaurusnogo opisaniia; pre-dislovie A.I. Novikova* [The Semantics of Information Technology: Experiments of Dictionary-Thesaurus Description; a foreword of A.I. Novikov]. Moscow, Publ of MGUP, 2002. 368 p.

23. Bektaev K. B., Piotrovsky R. G. *Matematicheskie metody v iazykoznanii. Ch. 2. Matematicheskaiia statistika i modelirovanie teksta* [Mathematical Methods in Linguistics. Part 2. Mathematical Statistics and Modeling of the Text.]. Alma-Ata, 1974. 336 p.

24. Kuleshov S. V. Analytical Monitoring of Internet Resources in Order to Detect Potentially Dangerous Content [Analiticheskii monitoring internet resursov s tsel'iu vyiavlennia potentsial'no opasnogo sodержaniia]. *Trudy "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniia" [Proc. "Prospective systems and control problems"]*. Taganrog, 2009. P. 255.

25. Mikhailov S. N., Malashenko O. I., Zaytseva A. A. The Method for the Infology Analysis of Patients Complaints Semantic Content in Order to Organize the Electronic Appointments. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proc.]*, 2015, Is. 42, pp. 140–154.

26. Zaytseva A. A., Kuleshov S. V., Mikhailov S. N. The Method for the Text Quality Estimation in the Task of Analytical Monitoring of Information Resources. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proc.]*, 2014, Is. 37, pp. 144–155.

# Структурно-параметрический синтез комплекса обеспечения живучести структурной технической системы

Козлов В. В., Абдурахимов А. А.  
Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Российская Федерация  
prof.kozlov@yandex.ru, alexvenis@mail.ru

**Аннотация.** Предложен метод структурно-параметрического синтеза комплекса обеспечения живучести сложных технических систем, функционирующих в условиях воздействия неблагоприятных внешних факторов. Метод построен с использованием новых понятий: комплекса обеспечения живучести системы, а также средства и способа повышения живучести. Метод предоставляет исследователю возможность анализировать результаты применения различных способов повышения живучести системы.

**Ключевые слова:** живучесть, надежность, защита, повреждающий фактор, комплекс обеспечения живучести, сложная техническая система.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных свойств сложных технических систем (ТС), рассчитанных на длительное функционирование в условиях воздействия разнообразных, в том числе неблагоприятных, внешних факторов, является их живучесть. В соответствии со сложившимися представлениями [1–4], под живучестью системы будем понимать ее свойство, характеризующее способность системы сохранять или восстанавливать полностью или частично свою способность к выполнению основных функций во время или после воздействия повреждающих факторов (ПФ). Определение ПФ дано в работе [5]: определенный вид внешнего воздействия, параметры которого превышают значения, на которые рассчитан элемент системы при его проектировании. В качестве ПФ могут выступать: естественные факторы внешней среды, эксплуатационные факторы, целенаправленные внешние воздействия, отказы оборудования, сбой в работе программного обеспечения и др.

При решении задач оценки и обеспечения живучести все ТС принято делить по уровню структурной сложности на три типа [4, 5]:

- ассоциативные, у которых между элементами отсутствуют структурные отношения;
- структурные, элементы которых находятся в жестких структурных отношениях;
- структурно-ассоциативные, элементы которых объединены по признаку назначения в ассоциации, а между ассоциациями существуют структурные отношения.

В рамках развития методологии обеспечения живучести ТС наибольшее внимание уделено исследованию третьего типа систем, представляющих собой наиболее общий случай [1, 2, 4, 5]. Однако при обосновании состава средств, кото-

рыми целесообразно дополнить систему для обеспечения ее живучести, проявляются особенности структурных систем, не позволяющих использовать имеющийся методический аппарат.

Живучесть ТС всегда обеспечивается за счет введения в ее состав различного рода избыточностей, которые не используются при ее штатной работе в расчетных условиях, однако позволяют системе сохранять или восстанавливать свою работоспособность при воздействии ПФ. Для ассоциативных и структурно-ассоциативных систем в качестве такой избыточности, как правило, используется резерв элементов в пределах их ассоциаций, а в структурных системах должны приниматься меры повышения стойкости элементов системы и живучести ТС в целом при повреждении ее элементов. Обоснование этих мер относится уже к предметной области науки и техники, в которой создается сама ТС, и не охватывается методологией теории живучести систем. Тем не менее, выполнять такое обоснование надо по решению оптимизационной задачи рационального расхода имеющихся ресурсов на оснащение системы комплексом средств повышения живучести.

Под средствами повышения живучести в статье понимаются меры технического и/или организационного характера, применение которых ведет к повышению живучести ТС, а совокупность средств повышения живучести, применение которой обеспечивает заданный уровень живучести ТС, называется комплексом обеспечения живучести системы.

Таким образом на разных этапах жизненного цикла сложных технических систем перед ее создателями встает задача оптимизировать состав комплекса обеспечения живучести системы и характеристик входящих в его состав средств, которая для случая структурной ТС осложняется большим выбором возможных технических решений, направленных на повышение живучести ТС, еще большим количеством их возможных реализаций, а также наличием ограничений, обусловленных техническими и технологическими возможностями производства, доступными ресурсами на создание и применение ТС и т. д.

## Постановка задачи синтеза комплекса обеспечения живучести технической системы

Живучесть является сложным свойством, включающим в себя стойкость к воздействию ПФ, защищенность ТС, а также ее восстанавливаемость и адаптивность. Задача обоснования состава и характеристик элементов комплекса

обеспечения живучести КА решается на этапе внутреннего проектирования КА и представляет собой выбор наилучшего  $d^*$  технического решения или подмножества лучших  $D^*$  решений из множества  $D$  допустимых на основе сопоставления всех элементов множества  $D$  по эффективности процесса создания ТС. В качестве показателя эффективности на этапе создания технической системы обычно используют ее потенциальную эффективность в заданных условиях применения  $\Lambda$  при использовании наилучшей стратегии применения  $u^*$ , оценить которую для применения системы можно на основе моделирования ее функционирования. В общем виде задача оценки эффективности выбора облика ТС может быть представлена формальной записью [6]:

$$W(d) = M(\rho(Y(d), Y^{TP})); \quad (1)$$

$$\varphi: \{Y \mid H : D \times \Lambda \times U \xrightarrow{\theta} Y\} \xrightarrow{\theta} W, \quad (2)$$

где  $Y$  – вектор характеристик результатов применения ТС;  $Y^{TP}$  – требуемый результат;  $M$  – знак математического ожидания;  $\rho$  – функция соответствия, служащая для определения значения показателя эффективности в зависимости от соотношения действительных и требуемых результатов применения ТС;  $H$  – модель процесса применения ТС.

Одним из элементов вектора результатов применения ТС является показатель живучести системы, живучесть с учетом свойства адаптивности системы может быть представлена вектором вероятностных характеристик:

$$y_{Ж} = \langle P_{ТС}, M_{\langle n \rangle} \rangle, \quad (3)$$

где  $P_{ТС} = P(\widehat{Y}_{ТС} \in \widehat{Y}_{ТС}^D)$  – вероятность того, что в течение всего срока функционирования ТС сохранит значения компонент вектора результатов функционирования  $\widehat{Y}_{ТС}$  в заданных пределах  $\widehat{Y}_{ТС}^D$ ;  $M_{\langle n \rangle}$  – математические ожидания значений частных показателей живучести ТС.

Поскольку живучесть в условиях воздействия ПФ является одним из основных, но не главным свойством проектируемой ТС, то задача обоснования структуры и характеристик комплекса обеспечения живучести в большинстве случаев может быть сформулирована как задача выбора варианта комплекса  $d_{Ж}$  из множества возможных  $D_{Ж}$ , обеспечивающего требуемую живучесть с минимальными затратами ресурсов на реализацию комплекса. Формально задача оптимизации комплекса обеспечения живучести может быть представлена выражением

$$d_{Ж} = \arg \min_{d_{Ж} \in D_{Ж}} \max_{\lambda \in \Lambda_0} (r(d_{Ж}) \mid y_{Ж}(d_{Ж}, \lambda) \in Y_{Ж}^D), \quad (4)$$

где  $r(d_{Ж})$  – функция расхода ресурсов на создание и применение комплекса обеспечения живучести в варианте  $d_{Ж}$ ;  $Y_{Ж}^D$  – множество допустимых значений показателя живучести ТС;  $\lambda$  – вариант воздействия ПФ из состава множества возможных вариантов воздействия  $\Lambda_0$ .

Результат функции расхода ресурсов является комплексной величиной и в общем случае представляет собой вектор, включающий в свой состав  $m$  элементов  $r_{\langle m \rangle}$ . Для решения оптимизационной задачи, направленной на достижение минимума расхода ресурсов на достижение требуемой живучести,

удобнее использовать скалярный показатель ресурсозатрат. Для большинства задач проектирования этого можно достичь, если установить предельные значения компонент вектора ресурсозатрат  $r_{\langle m \rangle}^D$ , а их текущие значения выразить через стоимость создания, применения и утилизации комплекса обеспечения живучести системы:

$$r^C = c^R(r_{\langle m \rangle} \mid r_{\langle m \rangle} \in r_{\langle m \rangle}^D). \quad (5)$$

Вторым вариантом оптимизационной задачи синтеза комплекса обеспечения живучести, характерным для случая модернизации существующей ТС, может быть задача достижения максимальной живучести системы в рамках доступных ресурсов:

$$d_{Ж} = \arg \max_{d_{Ж} \in D_{Ж}} \min_{\lambda \in \Lambda_0} (\varphi^P(y_{Ж}(d_{Ж}, \lambda)) \mid r(d_{Ж}) \in R^D), \quad (6)$$

где  $\varphi^P(y_{Ж}(d_{Ж}, \lambda))$  – оценочная функция, связывающая значения компонент векторного показателя живучести с обобщенным скалярным показателем;  $R^D$  – множество допустимых значений показателя затрат ресурсов на обеспечение живучести КА.

#### СИНТЕЗ КОМПЛЕКСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В сформулированной математической постановке формирование оптимального комплекса обеспечения живучести представляет собой решение задачи многопараметрического однокритериального структурно-параметрического синтеза. На сегодня известно несколько математических методов решения подобных задач [6–12].

Одним из главных факторов, определяющих выбор метода оптимизации, является вид целевой функции и характер ее зависимости от оптимизируемых параметров. Определение значений целевой функции для оптимизации комплекса обеспечения живучести ТС осуществляется, как правило, на основе моделирования процесса функционирования системы, оснащенной комплексом в условиях воздействия ПФ:

$$S_{ТС} : (X_1 \times X_2 \times \dots \times X_{n_{Ж}} \times U \times \Lambda) \rightarrow W_{Ж};$$

$$w_{Ж}(d_{Ж}) = \left\langle \min_{\lambda \in \Lambda_0} y_{Ж}(d_{Ж}, \lambda), r(d_{Ж}) \right\rangle; \quad w_{Ж} \in W_{Ж}, \quad (7)$$

где  $X_i$  – множество возможных значений характеристик  $i$ -го элемента комплекса обеспечения живучести ТС. Элементами множеств являются кортежи значений характеристик, присущих различным вариантам реализации элементов комплекса;  $n_{Ж}$  – количество элементов комплекса обеспечения живучести ТС;  $U$  – множество возможных вариантов применения комплекса;  $w_{Ж}$  – комплексный показатель эффективности реализации комплекса обеспечения живучести КА;  $W_{Ж}$  – множество достижимых значений показателя  $w_{Ж}$ .

Получаемая по результатам моделирования целевая функция для большинства практических применений оказывается многоэкстремальной, немонотонной, нелинейной, а по отношению к отдельным параметрам может иметь разрывы разного рода. Анализ методов оптимизации, используемых при решении подобных задач, показал, что для оптимизации

состава и характеристик комплекса обеспечения живучести ТС в таких условиях могут быть использованы только метод полного перебора и методы случайного поиска.

Эти методы отличаются высокой требовательностью к затратам вычислительных ресурсов при решении задач многопараметрической оптимизации. Снизить объем вычислений можно за счет выбора метода оптимизации и шага, с которым варьируются исходные данные, а также за счет снижения количества вычислительных экспериментов в случае использования статистического моделирования. Все эти меры ведут к снижению точности расчета целевой функции, что должно быть скомпенсировано внесением запаса ресурсов в состав комплекса обеспечения живучести для гарантированного достижения результата.

Кроме того, получаемое решение для сложных технических систем оказывается плохо обозримым. Результат зависит от множества исходных данных, среди которых исследователю трудно выделить наиболее важные параметры, требующие дополнительного анализа. Несмотря на наличие методов факторного анализа [13–15], их применение для выявления наиболее существенных исходных данных не дает приемлемого результата, так как многие параметры связаны между собой, а некоторые параметры, имея различную природу, могут влиять на живучесть ТС на основе одних и тех же физических механизмов. В то же время выбранные методы оптимизации дают в качестве наилучшего варианта только одну точку из многомерного пространства исходных данных.

Для осознанного обоснованного выбора варианта построения комплекса обеспечения живучести КА предлагается метод, основанный на объединении средств повышения живучести в группы на основе схожести физических механизмов влияния применения элементов комплекса на живучесть ТС и возможности использования одного и того же показателя результатов применения для каждого элемента группы, а также последующей свертки исходных данных, характеризующих параметры применяемых средств повышения живучести, в обобщенные показатели результатов применения способов повышения живучести.

Под способом повышения живучести понимается оснащение ТС отдельными средствами или их сочетанием, реализующими единый физический механизм повышения живучести.

В соответствии с предлагаемым методом обоснование состава и характеристик элементов комплекса обеспечения живучести выполняется в несколько этапов после формирования исходного множества средств повышения живучести КА:

1) на первом этапе формируются группы средств повышения живучести и определяются возможности и целесообразность совместного использования средств, входящих в состав одних и тех же групп;

2) на втором этапе моделируются процессы применения средств повышения живучести, затем на его основе происходит переход от множества характеристик элементов комплекса к множеству показателей результатов применения способов повышения живучести;

3) на третьем этапе выбирается оптимальный способ обеспечения живучести ТС по результатам их применения. Решение оптимизационной задачи на этом этапе выполняется на основе моделирования функционирования ТС;

4) четвертый этап подразумевает обратный переход от множества оптимальных значений показателей результатов применения способов повышения живучести к составу и характеристикам элементов комплекса, обеспечивающим достижение значений этих показателей.

Деление комплекса обеспечения живучести на группы имеет ряд особенностей:

1) в составе группы элементов комплекса обеспечения живучести могут находиться совокупности элементов, входящих в группу, если их совместное применение эффективнее отдельного применения этих элементов;

2) совокупности элементов из разных групп, при условии, что результат их совместного применения не сводится просто к сумме результатов их отдельного применения, а их совместное применение представляет собой новый способ повышения живучести системы, должны рассматриваться в качестве отдельной группы элементов комплекса обеспечения живучести ТС;

3) в одной группе не могут находиться элементы, обеспечивающие повышение живучести ТС за счет повышения живучести различных элементов ТС;

4) один способ повышения живучести могут реализовывать разные по своей природе и принципам функционирования элементы. Главным условием объединения таких элементов в группы должна быть возможность назначения для них одного показателя результата применения элементов группы;

5) любой элемент комплекса обеспечения живучести ТС должен входить в состав только одной группы средств комплекса. Все элементы, которые по реализуемому способу повышения живучести подходят для нескольких групп, должны образовывать отдельные группы элементов комплекса.

Применение любого рассматриваемого средства повышения живучести ТС обеспечивает изменение показателя живучести системы в обмен на расход ресурсов разных типов на этапе проектирования, изготовления или применения ТС. При этом изменение показателя живучести системы зависит не только от характеристик применяемого средства, но и от состава и характеристик других средств, входящих в комплекс обеспечения живучести, и не может быть использовано в качестве универсальной меры результативности применения средства повышения живучести ТС. Для каждой группы элементов комплекса следует выбрать показатель результатов применения, зависящий только от характеристик элемента группы и являющийся исходными данными для расчета показателя живучести системы в целом. Тогда показатель эффективности реализации средства повышения живучести может быть представлен комплексной величиной:

$$w_{ij} = \langle y_{ij}(x_{ij}), r_{ij}(x_{ij}) \rangle; \quad y_{ij} \in Y_i; \quad r_{ij} \in R, \quad (8)$$

где  $i, j$  – индексы, определяющие номер группы в составе комплекса обеспечения живучести и номер элемента в составе группы, соответственно;  $y_{ij}$  – показатель результативности самостоятельного применения средства повышения живучести при условии, что другие средства из рассматриваемой группы не используются;  $Y_i$  – множество возможных значений показателя результативности для элементов  $i$ -й группы;  $r_{ij}$  – показатель ресурсозатрат на реализацию средства повышения живучести, структура которого является общей для всех элементов комплекса обеспечения живуче-

сти  $r_{<m>}$ ;  $R$  – множество возможных значений показателя ресурсозатрат на реализацию комплекса обеспечения живучести ТС;  $x_{ij}$  – кортеж характеристик средства повышения живучести, описывающих особенности его реализации.

Для свертки множества исходных данных, определяющих возможные варианты реализации средства повышения живучести, в универсальный для группы способов набор характеристик необходимо построить зависимость минимальных затрат ресурсов на достижение определенного значения показателя результативности применения элемента комплекса обеспечения живучести, которая может быть охарактеризована функцией расхода ресурсов средства повышения живучести:

$$Z_{ij}^R(y_i) = \min_{x_{ij} \in X_{ij}} (r_{ij}(x_{ij}) | y_{ij}(x_{ij}) = y_i); \quad y_i \in Y_i, \quad (9)$$

где  $X_{ij}$  – множество возможных значений характеристик  $j$ -го элемента  $i$ -й группы комплекса обеспечения живучести ТС. Элементами множеств являются кортежи значений характеристик, присущих различным вариантам реализации элементов комплекса.

Функция расхода ресурсов, определенная на множестве достижимых значений показателя результатов применения способа  $y$ , представляет собой нижнюю границу области реализации способа повышения живучести (рис. 1).

Функция реализаций способа повышения живучести

$$Z_{ij}^X(y_i) = \arg \min_{x_{ij} \in X_{ij}} (r_{ij}(x_{ij}) | y_{ij}(x_{ij}) = y_i); \quad y_i \in Y_i. \quad (10)$$

Несколько средств можно применять одновременно. При этом их совокупный эффект будет определяться тем же показателем. Но расчет этого показателя уже должен вестись на основе отдельной модели, описывающей совместное применение группы способов. А ресурсы на реализацию такого подхода к повышению живучести должны рассчитываться как сумма ресурсов, расходуемых на реализацию отдельных средств.

$$\begin{aligned} S_{СК} : (X_{i1} \times X_{i2} \times \dots \times X_{im}) &\rightarrow W_{СК}; \\ r_{iСК}(x_{iСК}) &= \sum_{j=1}^m r_{ij}(x_{ij}), \end{aligned} \quad (11)$$

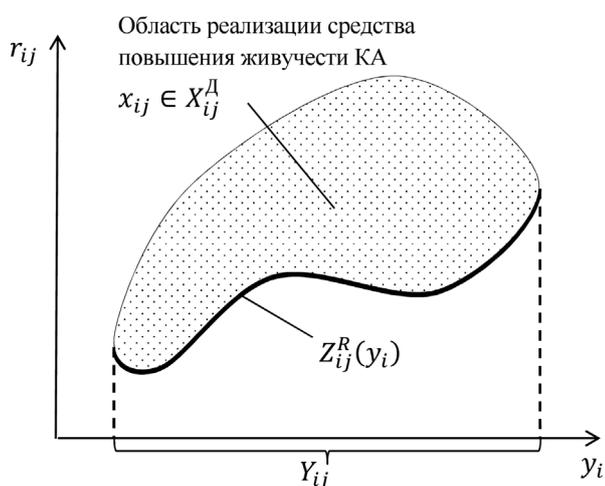


Рис. 1. Графическое представление функции расхода ресурсов средства повышения живучести КА

где  $x_{iСК} = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}$  – вектор, характеризующий все элементы комплекса, рассматриваемые в совокупности;  $m$  – количество одновременно используемых средств повышения живучести ТС;  $W_{СК}$  – множество достижимых значений показателя эффективности применения рассматриваемой совокупности средств повышения живучести системы. Его элементами являются кортежи  $w_{iСК} = y_{iСК}(x_{iСК}), r_{iСК}(x_{iСК})$ .

Число возможных сочетаний моделей для определения значений показателей эффективности применения всех вариантов совокупностей средств повышения живучести в составе группы составит [12]:

$$N_i = \sum_{m=2}^{n_i} \frac{n_i!}{m!(n_i - m)!}. \quad (12)$$

В большинстве случаев такой объем не представляет трудностей при вычислениях, однако он оказывается крайне трудоемким при составлении моделей, поэтому имеет смысл сократить количество моделей за счет исключения тех сочетаний средств повышения живучести, которые нельзя использовать вместе либо из-за отсутствия технической возможности подобной реализации, либо в случае, когда применение одного средства делает бессмысленным применение другого. В дальнейшем пары таких элементов будут называться несовместимыми. Для описания возможности совместного применения средств обеспечения живучести можно использовать матрицу смежности (инцидентности), элементами которой являются функции совместного применения вида:

$$\begin{aligned} A_i &= \begin{bmatrix} 0 & a_{12}^i & \dots & a_{1n}^i \\ a_{21}^i & 0 & \dots & a_{2n}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^i & a_{n2}^i & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad a_{jk}^i = a_{kj}^i, \quad j, k = \overline{1, n}; \\ a_{jk}^i &= \begin{cases} 0 & \text{если } y_{СК} \leq \\ & \leq \max(y_{ij}(x_{ij}), y_{ik}(x_{ik})), \forall x_{ij} \in X_{ij}, x_{ik} \in X_{ik} \\ & \alpha_{ij}(x_{ij}, x_{ik}) = \max(y_{СК}, y_{ij}(x_{ij}), y_{ik}(x_{ik})) \\ \text{если } \exists \left( \left\langle x_{ij}, x_{ik} \right\rangle \right) & \left. \begin{array}{l} y_{СК}(x_{ij}, x_{ik}) > \\ > \max(y_{ij}(x_{ij}), y_{ik}(x_{ik})); \\ x_{ij} \in X_{ij}, x_{ik} \in X_{ik} \end{array} \right\} \end{cases}. \end{cases} \quad (13)$$

Нулевое значение элемента матрицы смежности соответствует несовместимым элементам комплекса обеспечения живучести ТС. Аналогичным образом из рассмотрения можно исключить варианты комплексов, использующие сочетания трех и более элементов группы. В большинстве случаев любые сочетания, в состав которых входят несовместимые пары, тоже окажутся несовместимыми. В противном случае имеет смысл подобные редкие сочетания средств рассматривать как самостоятельные.

Если на основе матрицы смежности построить граф  $\Gamma$ , вершинами которого станут средства обеспечения живучести ТС, а наличие дуг будет обозначать возможность их взаимного применения, то анализ связности графа  $\Gamma$  позволит выделить компоненты связности, внутри которых

возможно сочетание средств обеспечения живучести. Задача моделирования применения возможных сочетаний средств обеспечения живучести будет разбита на подзадачи, соответствующие компонентам связанности графа, с существенным снижением размерности.

В то же время необходимо отметить, что среди исследованных способов обеспечения живучести часто встречаются такие, что совместное применение любой комбинации средств может быть учтено некоторой универсальной функцией:

$$y_{i\text{CK}} = \varphi_i^{\text{CK}}(y_{i\langle m \rangle}), \quad (14)$$

где  $m$  – количество средств, входящих в состав комбинации;  $y_{i_m} \in Y_i$  – значения показателей результатов самостоятельного использования отдельных средств.

В качестве примеров использования таких функций могут быть рассмотрены:

1) группа средств, для которых механизм повышения живучести ТС заключается в снижении вероятности воздействия ПФ на ТС. Показателем, характеризующим результаты применения как отдельных средств, так и группы в целом, будет вероятность того, что удастся предотвратить воздействие ПФ на ТС при условии, что без применения средства (группы) это воздействие осуществляется гарантировано. Функция расчета показателя результатов применения  $m$  независимых средств будет иметь вид

$$\varphi_i^{\text{CK}}(y_{i\langle m \rangle}) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - y_{ij}); \quad (15)$$

2) группа средств, для которых механизм повышения живучести заключается в снижении интенсивности воздействия ПФ на определенный уязвимый элемент ТС. Показателем, характеризующим результаты применения средств повышения живучести, в этом случае будет выступать коэффициент ослабления ПФ, представляющий собой отношение интенсивности воздействия фактора на уязвимый элемент в условиях применения средства к интенсивности воздействия на незащищенный элемент в тех же условиях:

$$y_{ij} = \frac{E_{\text{ПФ}}^3}{E_{\text{ПФ}}}, \quad (16)$$

где  $E_{\text{ПФ}}$  – плотность энергии ПФ на поверхности уязвимого элемента;  $E_{\text{ПФ}}^3$  – плотность энергии ПФ на поверхности уязвимого элемента в условиях применения средства повышения живучести.

Функция совместного применения группы из  $m$  средств повышения живучести в этом случае

$$\varphi_i^{\text{CK}}(y_{i_m}) = \prod_{j=1}^m y_{ij}. \quad (17)$$

На втором примере можно продемонстрировать еще одну особенность объединения в группы средств повышения живучести ТС, заключающуюся в возможности приведения результатов применения средств повышения живучести к условным показателям для объединения в группы формально разнородных средств. Так, в группу средств, реализующих механизм снижения интенсивности воздействия ПФ,

для уязвимых элементов могут быть включены средства резервирования их площади. При этом для случая горячего резервирования расчет приведенного коэффициента ослабления выполняется с помощью выражения

$$y_{ij} = k_{\text{Д}}^{-1} \left( \frac{S_{\text{Э}}^{\text{P}}}{S_{\text{Э}}} k_{\text{Д}}(E_{\text{ПФ}}) \right) \frac{1}{E_{\text{ПФ}}}, \quad (18)$$

где  $k_{\text{Д}}(E_{\text{ПФ}})$  – функция деградации характеристик уязвимого элемента;  $S_{\text{Э}}$  – площадь поверхности уязвимого элемента без учета резервной площади;  $S_{\text{Э}}^{\text{P}} = S_{\text{Э}} + S_{\text{Р}}$  – площадь поверхности уязвимого элемента с учетом резервной площади  $S_{\text{Р}}$ .

Для холодного резерва выражение для расчета приведенного коэффициента ослабления приобретает вид

$$y_{ij} = k_{\text{Д}}^{-1} \left( \frac{S_{\text{Р}}}{S_{\text{Э}}} + k_{\text{Д}}(E_{\text{ПФ}}) \right) \frac{1}{E_{\text{ПФ}}}. \quad (19)$$

Совокупности одновременно используемых средств повышения живучести ТС являются самостоятельными элементами группы средств повышения живучести, для них тоже составляются функции расхода ресурсов и функции реализации. При этом комбинация средств повышения живучести однозначно определяется вектором параметров, содержащих характеристики всех входящих в комбинацию средств:

$$x_{i\text{CK}} = \langle x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im} \rangle; \quad (20)$$

$$x_{i\text{CK}} \in X_{i\text{CK}} = X_{i1} \times X_{i2} \times \dots \times X_{im}.$$

Тогда функция расхода ресурсов некоторой совокупности средств в рамках группы будет определяться как

$$Z_{i\text{CK}}^{\text{R}}(y_i) = \min_{x_{i\text{CK}} \in X_{i\text{CK}}} (r_{i\text{CK}}(x_{i\text{CK}}) | y_{i\text{CK}}(x_{i\text{CK}}) = y_i) \quad (21)$$

или, с учетом (11),

$$Z_{i\text{CK}}^{\text{R}}(y_i) = \min_{x_{i\text{CK}} \in X_{i\text{CK}}} \left( \sum_{j=1}^m r_{ij}(x_{ij}) | y_{i\text{CK}}(x_{i\text{CK}}) = y_i \right), \quad (22)$$

а для случая, когда функция совместного применения определяется через результаты применения отдельных средств (14),

$$Z_{i\text{CK}}^{\text{R}}(y_i) = \min_{x_{i\text{CK}} \in X_{i\text{CK}}} \left( \sum_{j=1}^m Z_{ij}^{\text{R}}(y_{ij}) | \varphi_i^{\text{CK}}(y_{i\langle m \rangle}) = y_i \right). \quad (23)$$

Для формирования функции реализаций группы способов на основе аргументов функции совместного применения используются либо сами аргументы функции совместного применения, если она представлена в виде (13):

$$Z_{i\text{CK}}^{\text{X}}(y_i) = \arg \min_{x_{i\text{CK}} \in X_{i\text{CK}}} (r_{ij}(x_{ij}) | y_{i\text{CK}}(x_{ij}) = y_i), \quad (24)$$

либо функции реализаций отдельных способов, если используются функции вида (14):

$$Z_{i\text{CK}}^{\text{X}}(y_i) = \left\langle Z_{i1}^{\text{X}}(y_{i1}), Z_{i2}^{\text{X}}(y_{i2}), \dots, Z_{im}^{\text{X}}(y_{im}) | \varphi_i^{\text{CK}}(y_{i\langle m \rangle}) = y_i \right\rangle. \quad (25)$$

В завершение первого этапа обоснования комплекса обеспечения живучести ТС формируются функции расхода ресурсов и функции применения для групп средств повышения живучести ТС.

Функция расхода ресурсов для группы средств повышения живучести составляется на основе анализа аналогичных функций для отдельных средств повышения живучести ТС и их комбинаций:

$$Z_i^R(y_i) = \min_{j=1,m} Z_{ij}^R(y_i), \quad (26)$$

где  $m$  – число средств, относящихся к  $i$ -му способу повышения живучести, и всех их комбинаций, рассматриваемых с учетом возможности совместного использования;  $Z_{ij}^R(y_i)$  – функции расхода ресурсов для отдельных средств повышения живучести и возможных комбинаций их совместного использования.

Функция ресурсозатрат группы средств повышения живучести определяет нижнюю границу области реализации характерного для группы способа повышения живучести на множестве

$$W_i = Y_i \times R \quad (27)$$

в пространстве координат: результаты применения – затраты ресурсов (рис. 2).

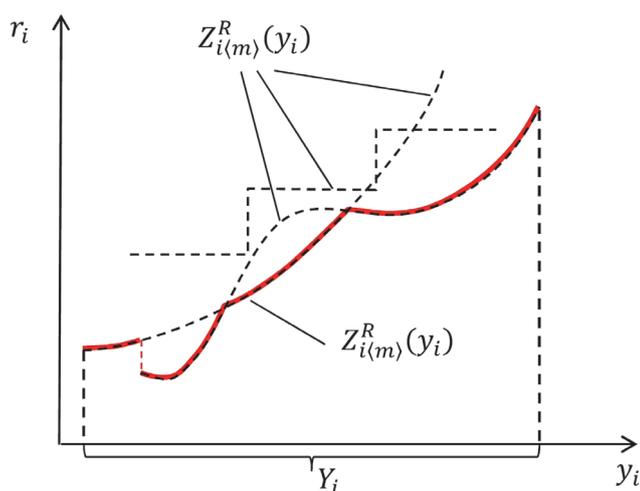


Рис. 2. Графическое представление функции расхода ресурсов группы средства повышения живучести ТС

При этом множество достижимых значений показателя результатов применения способа  $Y_i$  складывается из множеств достижимых значений показателей результатов применения входящих в его состав средств и комбинаций их совместного применения  $Y_{ij}$ :

$$Y_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} Y_{ij}. \quad (28)$$

Параллельно формированию функции расхода ресурсов способа повышения живучести с целью последующего построения комплекса обеспечения живучести ТС строится отображение значений показателя результатов применения способа  $y_i \in Y_i$  на множество средств повышения живучести и их комбинаций  $J_i$ :

$$Z_i^J : Y_i \xrightarrow{Z_i^R(y_i)} J_i. \quad (29)$$

Полная совокупность функций реализаций (10), (24) или (25) и отображений (29) для всех рассматриваемых групп средств повышения живучести ТС позволяет отобразить множество значений показателей результатов применения способов на множество  $D_{ж}$  допустимых технических решений обеспечения живучести КА:

$$S_K : Y \xrightarrow{Z_{ij}^R, Z_i^J} D_{ж}, \quad Y = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_n, \quad (30)$$

где  $Y$  – множество всех возможных комбинаций значений показателей результатов применения способов повышения живучести ТС;  $n$  – количество групп средств повышения живучести ТС.

Отображение  $S_K$  позволяет сформулировать новую постановку задачи оптимизации комплекса обеспечения живучести ТС, отличающуюся от первоначальной (4) меньшей на несколько порядков мощностью множества исходных данных из-за сокращения числа оптимизируемых параметров:

$$y = \arg \min_{y \in Y} \max_{\lambda \in \Lambda_0} (r(y) | y_{\lambda} \in Y_{ж}^{\Delta}), \quad (31)$$

где  $y = \langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle$  – набор значений показателей результатов применения групп средств повышения живучести КА;  $r(y)$  – общие затраты ресурсов на реализацию комплекса обеспечения живучести ТС:

$$r(y) = \sum_{i=1}^n Z_i^R(y_i). \quad (32)$$

Результаты выполнения третьего этапа синтеза комплекса обеспечения живучести ТС представлены на рис. 3. Для представления результатов в двумерном пространстве использована оценочная функция  $\varphi^p$ , применение которой в общем случае необязательно. Затраты ресурсов на обеспечение живучести системы выражены через общую стоимость реализации комплекса в соответствии с (5).

Другим вариантом постановки задачи оптимизации комплекса обеспечения живучести ТС по аналогии с (6) может

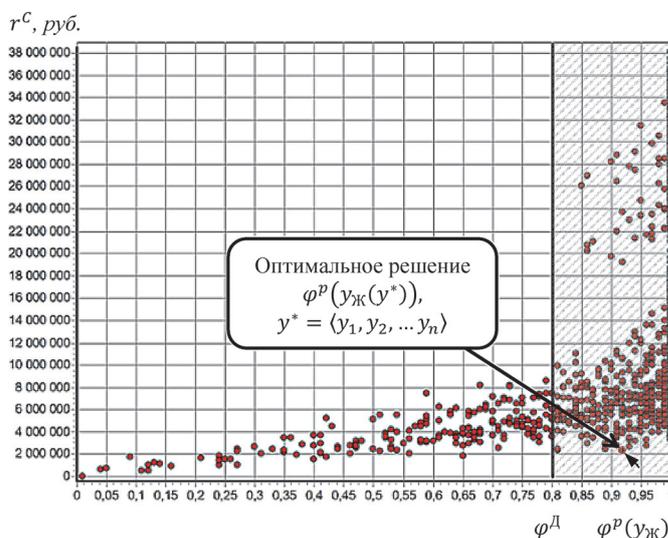


Рис. 3. Пример использования метода



Рис. 4. Алгоритм структурно-параметрической оптимизации комплекса обеспечения живучести структурной системы

быть  $y \in Y$ , наилучший с точки зрения обеспечения живучести системы из всех вариантов, отвечающих требованиям по ограничению затрат ресурсов:

$$y = \arg \max_{y \in Y} \min_{\lambda \in \Lambda_0} (\varphi^p(y_{Ж}(y, \lambda)) | r(y) \in R^{\Delta}). \quad (33)$$

Результатом решения задачи (31) или (33) является вектор значений показателей результатов применения способов повышения живучести ТС, определяющий оптимальную степень использования каждого рассматриваемого способа при формировании комплекса обеспечения живучести системы. Эти данные являются исходными для четвертого этапа син-

теза комплекса обеспечения живучести ТС, на котором значения показателей по каждому способу используются для определения состава и характеристик средств повышения живучести. На основе функции  $Z_i^J(y_i)$  определяется средство или сочетание средств повышения живучести, обеспечивающих необходимые результаты применения способа при минимальных затратах ресурсов, а функция реализации средства или сочетания средств повышения живучести  $Z_{ij}^X(y_i)$  используется для определения их характеристик:

$$x_{ij} = Z_{CP_{ij}}^X(y_i), \quad j = Z_i^J(y_i). \quad (34)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм использования описанного метода для обоснования состава и характеристик комплекса обеспечения живучести ТС представлен на рис. 4.

Предложенный метод синтеза комплекса обеспечения живучести ТС обладает двумя преимуществами перед традиционными методами, обусловленными сокращением множества исходных данных при решении оптимизационной задачи:

1) существенно сокращается объем вычислений, что позволяет применять метод полного перебора всех возможных альтернатив с достаточно малым шагом, чтобы минимизировать вероятность пропуска оптимального решения в процессе поиска;

2) исключение из рассмотрения на этапе решения оптимизационной задачи большого количества взаимосвязанных параметров позволяет качественно проанализировать влияние различных механизмов повышения живучести на эффективность использования комплекса в целом.

Первый тезис требует уточнения. Формально предложенный метод не сокращает мощности множеств исходных данных для формирования альтернативных вариантов построения комплекса обеспечения живучести. Однако при решении наиболее ресурсоемкой оптимизационной задачи вместо исходного множества  $D_{ж}$  рассматривается множество возможных значений показателей результатов реализации различных способов повышения живучести ТС  $Y$ , мощность которого ниже на несколько порядков.

Ранее упоминалось, что подходящими для решения поставленной задачи методами оптимизации являются методы перебора возможных альтернатив: метод случайного поиска и метод полного перебора. Для получения значений целевой функции моделируется функционирование ТС в условиях воздействия ПФ. Выбор метода оптимизации, шаг, с которым варьируются исходные данные, а также число повторений вычислительных экспериментов, если используется статистическое моделирование, определяются имеющимися ресурсами: мощностью вычислительной техники и временем, отведенным на решение задачи. Любое осознанное снижение точности вычислений ведет к снижению качества решаемой задачи либо из-за необходимости увеличения запаса живучести в соответствии с принципом гарантированного достижения результата, либо из-за повышения риска получения неоптимального решения. Последний риск может быть снижен за счет качественного анализа влияния степени использования тех или иных механизмов повышения живучести на характеристики комплекса в целом с целью адаптивного снижения шага варьирования исходных данных при оптимизации.

Полный перебор большого объема всех характеристик средств повышения живучести ТС выполняется на этапе свертки этих характеристик к показателям результатов их применения на основе моделирования процессов воздействия ПФ на уязвимые элементы системы. Этот процесс по длительности несоизмеримо меньше длительности переход-

ных процессов в ТС и ее элементах после воздействия ПФ, которые анализируются на третьем этапе, поэтому второй этап не дает высокой нагрузки на используемые вычислительные средства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин В. Н. Управление обеспечением стойкости сложных технических систем к воздействию дестабилизирующих факторов различной физической природы / В. Н. Бакулин, С. Ю. Малков, В. В. Гончаров. – М. : ФИЗМАТЛИБ, 2006. – 304 с.
2. Черкесов Г. Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем / Г. Н. Черкесов. – М. : Знание, 1987. – 32 с.
3. Кирилин А. Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, А. В. Сологуб, В. П. Макаров. – М. : Машиностроение, 2010. – 384 с.
4. Рябинин И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М. : Радио и связь, 1981. – 232 с.
5. Стекольников Ю. И. Живучесть систем / Ю. И. Стекольников. – СПб. : Политехника, 2002. – 155 с.
6. Надежность и эффективность в технике : справ. : Т. 3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – М. : Машиностроение, 1988. – 328 с.
7. Патраев В. Е. Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования : моногр. / В. Е. Патраев. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. – 136 с.
8. Гуд Г. Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г. Х. Гуд, Р. Э. Макол. – М. : Сов. радио, 1962. – 383 с.
9. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1968. – 366 с.
10. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы / Т. Саати. – М. : Мир, 1973. – 304 с.
11. Николаев В. И. Системотехника : методы и приложения / В. И. Николаев, В. М. Брук. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 199 с.
12. Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики : учеб. для вузов / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – М. : ЮНИТИ, 1998. – 1022 с.
13. Канторович Л. В. Оптимальные решения в экономике / Л. В. Канторович, А. Б. Горстко. – М. : Наука, 1972. – 232 с.
14. Кузнецов А. В. Высшая математика: Математическое программирование : учеб. / А. В. Кузнецов, В. А. Санкович, Н. И. Холод ; под общ. ред. А. В. Кузнецова. – Минск : Выssh. шк., 1994. – 286 с.
15. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений : учеб. пособие для вузов / А. А. Грешилов – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 584 с.

# Structural-Parametrical Synthesis of a Complex of Survivability of the Structural Technical System

Kozlov V. V., Abdurakhimov A. A.  
Military Space Academy named Mozhaiskyi  
Saint-Petersburg, Russia  
prof.kozlov@yandex.ru, alexvenis@mail.ru

**Abstract.** A method of structural-parametrical synthesis of a complex of survivability of technical systems that operate under the impact of adverse exposure factors is proposed. The method is built using new concepts: the systems survivability complex, and the means and ways to increase survivability. Application of the method provides the researcher an opportunity of analysing the results of using of different ways to increase the survivability of the system.

**Keywords:** survivability, reliability, protection, damaging factor, survivability complex, technical system.

## REFERENCES

1. Bakulin V. N., Malkov S. Yu., Goncharov V. V. *Upravlenie obespecheniem stojkosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem k vozdejstviyu destabiliziruyushhikh faktorov razlichnoj fizicheskoy prirody* [Management of Ensuring Durability of Complex Technical Systems to the Influence of Destabilizing Factors of Various Physical Nature]. Moscow, Fizmatlib, 2006. 304 p.
2. Cherkosov G. N. *Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh sistem* [Methods and Models for Assessing the Survivability of Complex Systems]. Moscow, Znanie, 1987. 32 p.
3. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Sologub A. V., Makarov V. P. *Metody obespecheniya zhivuchesti niz-koorbitalnykh avtomaticheskikh KA zondirovaniya Zemli: matematicheskie modeli, kompyuternye tekhnologii* [Methods of Ensuring the Survivability of LEO Sensing Spacecraft: Mathematical Models, Computer Technologies]. Moscow, Mashinostroenie, 2010, 384 p.
4. Ryabinin I. A., Cherkosov G. N. *Logiko-veroyatnostnye metody issle-dovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem* [Logical-Probabilistic Methods of Research of Reliability of Structurally Complex Systems]. Moscow, Radio i svyaz, 1981. 232 p.
5. Stekolnikov Yu. I. *ZHivuchest sistem* [Systems Survivability]. St. Petersburg, Politehnika, 2002. 155 p.
6. *Nadezhnost i ehffektivnost v tekhnike: Spravochnik: T. 3. Ehffektivnost tekhnicheskikh sistem* [The Reliability and Efficiency in Engineering: Reference: Vol. 3. The Efficiency of Technical Systems], ed. V. Th. Utkin, Yu. V. Kryuchkov. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 328 p.
7. Patraev V. E. *Metody obespecheniya i otsenki nadezhnosti kosmicheskikh apparatov s dlitelnyim srokom aktivnogo sushhestvovaniya: monografiya* [Methods for Ensuring and Assessing the Reliability of Spacecraft Having Long Lifetime: Monograph]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace Univ., 2010. 136 p.
8. Gud G. Kh., Makol R. Eh. *Sistemotekhnika. Vvedenie v proektirovanie bolshikh sistem* [System Engineering. Introduction to the Design of Large Systems]. Moscow, Sovetskoe radio, 1962. 383 p.
9. Buslenko N. P. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of Complex Systems]. Moscow, Nauka, 1968. 366 p.
10. Saati T. *Tselochislennyye metody optimizatsii i svyazannyye s nimi ehkstremaalnye problem* [Optimization in Integers and Related Extremal Problems]. Moscow, Mir, 1973. 304 p.
11. Nikolaev V. I., Bruk V. M. *Sistemotekhnika: metody i prilozheniya* [Systems Engineering: Methods and Applications]. Leningrad, Mashinostroenie, 1985. 199 p.
12. Ajvazyan S. A., Mkhitaryan V. S. *Prikladnaya statistika i osnovy ehkonometriki: uchebnik dlya vuzov* [Applied Statistics and Econometrics Basics: textbook for higher education establishments]. Moscow, YUNITI, 1998. 1022 p.
13. Kantorovich L. V., Gorstko A. B. *Optimalnye resheniya v ehkonomike* [Optimum Solutions in Economics]. Moscow, Nauka, 1972. 232 p.
14. Kuznetsov A. V., Sankovich V. A., Kholod N. I. *Vysshaya matematika: Mat. programmir.: Ucheb.* [Higher Mathematics: Mathematical Programming: textbook]. Minsk, Vyshaya Shkola, 1994. 286 p.
15. Greshilov A. A. *Matematicheskie metody prinyatiya reshenij: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Mathematical Methods of Decision Making: textbook for higher education establishments]. Moscow, Bauman Moscow State Tech. Univ., 2006. 584 p.

# Особенность асимптотических свойств интегральных инвариантов

Жигалко Е. Ф.  
ПГУПС  
Санкт-Петербург, Россия  
kprikmat@pgups.edu

**Аннотация.** Для инварианта  $\eta_{p,q} = \frac{m_{p,q}}{m_{0,0}}$ , где  $m_{p,q}$  – центрированный интегральный момент порядка  $p, q$  плоской фигуры, определена последовательность некоторых форм фигур  $\{S_n\}$ , таких, что  $\|S_n\| \equiv \Delta_n, \Delta_n \rightarrow 0$  при  $n \rightarrow \infty$ , но  $\eta_{p,q} \approx \left(\frac{1}{(\Delta_n)^{p+q}}\right)$ . Этот результат объясняет неравномерность алгоритмов распознавания текстов в некоторых алфавитах.

**Ключевые слова:** алгоритм, алфавит, асимптотика, идентификация, инварианты, интегральные моменты, неравномерность, распознавание.

## ВВЕДЕНИЕ

Обнаружено, что в некоторых алфавитах величина интегральных инвариантов некоторых букв существенно больше значений этих инвариантов, подсчитанных для других букв [1, 2]. Понимание этого вопроса важно для построения эффективных алгоритмов распознавания, использующих интегральные инварианты [3–5]. В статье указывается одна последовательность специально подобранных фигур – такая, что значения инвариантов для них неограниченно возрастают.

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ИНВАРИАНТЫ

Рассматриваются инварианты плоских фигур [1]

$$\eta_{p,q} = \frac{m_{p,q}}{(m_{0,0})^2}, \quad (1)$$

где  $m_{p,q}$  – центрированный интегральный момент порядка  $p, q$  фигуры  $S$ , задаваемой скалярным полем плотности  $f(x, y)$  в декартовых координатах  $x, y$ ,

$$m_{p,q} = \iint_S f(\bar{x}, \bar{y}) \bar{x}^p \bar{y}^q ds; \quad p, q \in \{0, 1, 2, \dots\}; \quad (2)$$

$$\bar{x} = x - \frac{\iint_S x ds}{\iint_S ds}; \quad \bar{y} = y - \frac{\iint_S y ds}{\iint_S ds}.$$

Формулы (1) определяют для плоских фигур последовательность инвариантов, сохраняющих значения при параллельном переносе и однородном сжатии (растяжении).

Из  $\eta_{p,q}$  можно собрать однородные полиномы, инвариантные по отношению к другим преобразованиям преобразов,

например,  $\mu_1 = \eta_{2,0} + \eta_{0,2}$ ,  $\mu_2 = (\eta_{3,0} + \eta_{1,2})^2 + (\eta_{2,1} + \eta_{0,3})^2$  и др. [2, 3].

В простом случае плотность фигуры  $S$ :  $f = 1$  внутри контура, вне –

$$f = 0, \quad (3)$$

а величина интегрального момента  $m_{p,q}$  зависит только от формы фигуры.

Тоновое изображение тоже выражают такими элементарными слоями, производя «векторное квантование» уровня серого или RGB [6].

По свойствам определённого интеграла, если две фигуры  $S_1$  и  $S_2$  равны, то и значения момента  $m_{p,q}$  для них одинаковы  $(m_{p,q})_1 = (m_{p,q})_2$ , но из  $(m_{p,q})_1 = (m_{p,q})_2$  не следует, что  $S_1 = S_2$ , поэтому идентификацию  $S$  нельзя строить только на значении конкретного  $m_{p,q}$ .

## РАСПОЗНАВАНИЕ БУКВ

В геометрии, механике, физике применяют интегральные моменты и инварианты для репрезентации главных свойств объектов. Инварианты  $\eta_{p,q}$  могут быть использованы в алгоритмах идентификации и распознавания элементов из конкретного набора (алфавита) по их изображениям [1], в задачах автоматизации, робототехники и информатики.

Применение алгоритмов на интегральных инвариантах для чтения буквенных текстов имеет важные особенности. За редкими исключениями (например, ГОСТ на шрифт чертёжный [7]) для языковых алфавитов не указываются нормативные идеалы. Помимо этого, для букв в принципе допускается вариантность исполнения и погрешность.

В одном из подходов для буквы  $s$  подсчитывают значения  $j$  первых инвариантов из (1), затем получившийся набор интерпретируют как координаты точки  $P$  (образа  $s$ ) в  $j$ -мерном пространстве с расстоянием, например евклидовым [8]. По величине расстояния

$$d_{1,2} = \sqrt{\sum_{i=1}^j ((\eta_{p,q})_2 - (\eta_{p,q})_1)_i^2}$$

между точками  $P_1$  и  $P_2$  судят о близости форм фигур  $s_1$  и  $s_2$ .

Применение этой техники к однородному тексту отображает его на множество точек  $\{P\}$ . Если текст достаточно качественный, точки, образы некоторой буквы группируются и отчётливо отдалены от кластеров, соответствующих другим буквам. Это условие, если выполнено для алфавита,

обеспечивает как обучаемость схемы, так и качественное чтение текстов. Его выполнение достигается настройкой вычислительных параметров схемы при отладке на репрезентативной выборке текстов в конкретном алфавите. Для эффективности подхода число знаков алфавита должно быть небольшим [9–12].

Вопрос о погрешности дигитализации букв существен, поскольку они состоят из нешироких линий, а знаки должны быть достаточно массивными, чтобы при их сеточном представлении доля внутренних полных ячеек была существенно больше доли частичных (на контуре), аппроксимируемых приближённо. В роли меры массивности фигуры можно взять отношение площади  $S$  фигуры к её периметру  $L$ , отнесённое к значению этой величины для круга, имеющего такую же площадь

$$Z = \frac{2\sqrt{\pi S}}{L}. \quad (4)$$

### ИНВАРИАНТ $Z$

Для круга  $Z = 1$ , а для других фигур величина  $Z \in (0, 1)$ . Взяв фигуру с конкретным  $Z$ , можно всегда подобрать эллипс с такой же величиной  $Z$ . Из этого вытекает, что конкретному  $Z$  может соответствовать не одна фигура. Единственный случай уникального соответствия – это пара  $Z = 1$  и круг.

Для правильного  $n$ -угольника

$$Z = \sqrt{\frac{\pi}{n}} \cdot \sqrt{\operatorname{ctg} \frac{\pi}{n}}, n \in \{3, 4, \dots\}.$$

Для прямоугольника  $a \times b$

$$Z = \frac{\sqrt{\pi}}{\left(\sqrt{\frac{a}{b}} + \sqrt{\frac{b}{a}}\right)}. \quad (5)$$

Экстремум (5) достигается при  $a = b$  (для квадрата) и равен  $\frac{\sqrt{\pi}}{2}$ .

Из определения можно видеть, что для любой фигуры инвариант  $Z$  не изменяется при переносе, повороте, отражении и однородном растяжении, т. е. одинаков для всех фигур из какого-либо класса подобия.

Среди причин рассеяния точек  $P$ , образов буквы в пространстве инвариантов существенное место занимают погрешности пикселизации и сеточного представления букв, возникающие в частичных ячейках у границы буквы. Вклад границы уменьшается с увеличением массивности фигуры. С другой стороны, доля частичных ячеек зависит от подробности сеточного разбиения. Настраивают параметры вычислительной схемы в экспериментах, но оценки могут быть сделаны аналитически.

Макетом буквы для изучения вопроса может служить удлиненный прямоугольник  $a \times b$ ,  $a \ll b$ , например  $a = 0, 1b$ . Если допускать погрешность дихотомического определения частичной ячейки локальную 0,25 и общую (по всему контуру) 0,1, то можно взять  $a = 4, b = 40$ . Величина  $Z$  такой буквы близка к 0,5.

Подобным образом на этом же макете, изменив порядок действий, можно получить оценки параметров применяемой сетки, исходя из величины  $Z$ . Эти оценки в условиях при-

мера сводятся к рекомендации: если относительная погрешность пикселизации буквы  $Z \approx 0,5$  не должна превосходить 0,1, то следует применить сетку, в которой поперёк штриха буквы укладывается не меньше 4 ячеек.

### АСИМПТОТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $\eta_{p,q}$

В расчётах  $\eta_{p,q}$  обнаружено, что помимо факторов разброса точек  $P$  кластера  $S$ , связанных, во-первых, с созданием и последующей графической переработкой прообраза  $S$ , во-вторых, с погрешностями производимых с ним вычислительных процедур, есть ещё третий источник дисперсии точек  $P$ , имеющий внутреннюю для  $\{\eta_{p,q}\}$  природу. Поскольку рассеяние точек в кластере  $P$  ухудшает условия распознавания прообраза, потребовался анализ этого вопроса.

Справедливо утверждение: в модели (3) существуют  $S, p, q$ , для которых  $\eta_{p,q}$  больше любого заданного значения.

Доказательство этой теоремы может быть произведено конструктивно.

Действительно, пусть  $\rho_n = \frac{1}{n}, n = 1, 2, \dots, \rho_n \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$  и в координатах  $(r, \varphi)$  задана последовательность фигур  $S_n$ :

$$S_n = \left\{ \begin{array}{l} \langle r, \varphi \rangle \\ \left( (1 - \rho_n) \leq r \leq 1 \right) \wedge \\ \left( (0 \leq \varphi \leq \varphi_0) \cup \right. \\ \left. ( \pi \leq \varphi \leq (\pi + \varphi_0) ) \right) \end{array} \right\}; \quad (6)$$

$(0 < \varphi_0 \leq \pi),$

с тем, что

$$f(r, \varphi) = 1, \text{ если } (r, \varphi) \in S_n,$$

в противном случае

$$f(r, \varphi) = 0. \quad (7)$$

Для каждой из букв в  $S_n$

$$\iint_{S_n} x ds = 0, \iint_{S_n} y ds = 0$$

и

$$\bar{x} = x, \bar{y} = y.$$

Далее

$$m_{p,q,n} = \iint_{S_n} f(r \cos \varphi, r \sin \varphi) r^{p+q+1} \times \\ \times (\cos \varphi)^p (\sin \varphi)^q d\varphi dr. \quad (8)$$

При  $(p + q)$  нечётном  $m_{p,q,n}$  тривиально равен нулю.

Рассмотрим случай  $(p + q)$  – чётное. Из-за (6) и (7) переменные в (8) разделяются. Если этим воспользоваться, то результату интегрирования можно придать форму

$$m_{p,q,n} = \Phi_{p,q,n} \times \\ \times \frac{1}{p + q + 2} (1 - (1 - \rho_n)^{p+q+2}),$$

в которой явно выделена часть, зависящая от  $r$ .

При этом

$$m_{0,0,n} = \Phi_{0,0,n} \frac{1}{2} (1 - (1 - \rho_n)^2).$$

Можно указать формулы для членов последовательности интегральных инвариантов

$$\eta_{p,q,n} = \frac{m_{p,q,n}}{(m_{0,0,n})^2} = \frac{\Phi_{p,q,n}}{(\Phi_{0,0,n})^2} \times \frac{1}{(p+q+2)} \cdot \frac{(1 - (1 - \rho_n)^{p+q+2})}{\left(\rho_n - \frac{\rho_n^2}{2}\right)^{\frac{p+q+2}{2}}}.$$

Асимптотический характер каждого инварианта  $\eta_{p,q}$  при  $\rho_n \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$  над  $S_n$  находится из формулы

$$\left( \tilde{\Phi}_{p,q} = \frac{\Phi_{p,q}}{(p+q+2) \times (\Phi_{0,0})^{(p+q+2)}} \right);$$

$$\eta_{p,q,n} \approx \tilde{\Phi} \frac{1}{\rho_n^{\frac{p+q}{2}}},$$

кроме  $\eta_{0,0}$  все инварианты

$$\eta_{p,q,n} \rightarrow \infty.$$

Утверждение доказано.

Существенно, что для фигур  $S_n \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} Z \rightarrow 0$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из доказанного утверждения вытекает важное следствие, которое может стать критическим в приложениях, что вычисления значений инвариантов могут оказаться неравномерно точными по алфавиту, если среди фигур, анализируе-

мых с помощью интегральных инвариантов, есть близкие к какому-либо из  $S_n$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич Г. Б. Основы теории алгебраических инвариантов / Г. Б. Гуревич. – М. : Л. : ОГИЗ ГИТТЛ, 1948. – 408 с.
2. Hu M. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants / M. Hu // IRE Trans. Inf. Theory. – 1962. – Vol. 8. – P. 179–187.
3. Flusser J. Pattern Recognition by Affine Moment Invariants / J. Flusser, T. Suk // Pattern Recognition. – 1993. – Vol. 26, N 1. – P. 167–174.
4. Flusser J. Moments and Moment Invariants in Pattern Recognition / J. Flusser, T. Suk, B. Zitová. – John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
5. Жигалко Е.Ф. Исследование свойств метода моментных инвариантов применительно к линейной классификации и идентификации изображений / Е.Ф. Жигалко, М.Ю. Пахнушева // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2009. – Т. 16, вып. 2. – С. 327–329.
6. Gouda I. S. Moment Invariants And Quantization Effects / I.S. Gouda, A.L. Abbott // Proc. IEEE Computer Soc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1998. – P. 157–163.
7. ЕСКД. Шрифты чертёжные. ГОСТ 2.304-81. – М., 1982.
8. Жигалко Е. Ф. О регуляризации пространства инвариантов / Е. Ф. Жигалко, М. Ю. Пахнушева // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2009 – Т. 16, вып. 6. – С. 1062–1064.
9. Rahtu E. Generalized Affine Moment Invariants for Object Recognition / E. Rahtu, M. Salo, J. Heikkil, J. Flusser // 18<sup>th</sup> ICPR. – 2006. – Vol. 2. – P. 634–637.
10. Li Y. Application of Moment Invariants to Neurocomputing for Pattern Recognition / Y. Li // Electronics Let. – 1991. – Vol. 27, Is. 7. – P. 587–588.
11. Hosny Kh. M. On the Computational Aspects of Affine Affine Moment Invariants for Grey-scale Images / K.M. Hosny // Appl. Math. Comp. – 2008. – Vol. 195, Is. 2. – P. 762–771.
12. Proakis J.G. Digital signal processing / J. G. Proakis, D. G. Mandakis. – W. : Prentice Hall, 2003.

# A Singularity of Integral Moment Invariants

Zhigalko E.Th.

Petersburg State Transport University  
S. Petersburg, Russia  
kprikmat@pgups.edu

**Abstract.** For the geometric invariants  $\eta_{p,q} = \frac{m_{p,q}}{m_{0,0}}$ ,  $m_{p,q}$  being a centered integral momentum of a plane figure  $S$ , a sequence of characters  $S_n$ ,  $\|S_n\| \equiv \Delta_n, \Delta_n \rightarrow 0$  has been suggested, providing  $\eta_{p,q,n} \rightarrow \infty$  since  $\eta_{p,q} \approx \left( \frac{1}{(\Delta_n)^{p+q}} \right)$ , while  $n \rightarrow \infty$ . Image processing algorithms utilizing integral invariants may become nonuniform in presence of characters, close to  $S_n$ , within the object set.

**Keywords:** algorithm, alphabet, asymptotics, recognizing, integral momenta, invariants, non-uniformity, identificarion.

## REFERENCES

1. Gurevich G.B. *Osnovy teorii algebraicheskikh invariantov* [Fundamentals of Algebraic Invariants Theory]. Moscow, Leningrad, OGIZ GITTL, 1948. 408 p.
2. Hu M. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. *IRE Trans. Inf. Theory*, 1962, vol. 8, pp. 179–187.
3. Flusser J., Suk T. Pattern Recognition by Affine Moment Invariants. *Pattern Recognition*, 1993, vol. 26, no 1, pp. 167–174.
4. Flusser J., Suk T., Zitová B. *Moments and Moment Invariants in Pattern Recognition*. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
5. Zhigalko E.Th., Pahnusheva M.Yu. Investigation of Properties of the Moment Invariants Method Application to Images Linear Classification and Recognizing [Isledovaniye svojstv metoda momentnyh invariantov primentitelno k liniejnoj klassifikacii i identifikacii izobrazhenij] *Obozrenije Prikladnoj i Promyshlennoj Matematiki [Review of Applied and Industrial Mathematics]*, 2009, vol. 16, is. 2, pp. 327–329.
6. Gouda I.S., Abbott A.L. Moment Invariants And Quantization Effects. *Proc IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1998, pp. 157–163.
7. ESKD. Drawing Letters. GOST 2.304-81. Moscow, 1982.
8. Zhigalko E.Th., Pahnusheva M.Yu. Uniformization of the Space of Invariants. *Rev. Appl. Ind. Math.*, 2009, Vol. 16, is. 6, pp. 1062–1064.
9. Rahtu E., Salo M., Heikkil J., Flusser J. Generalized Affine Moment Invariants for Object Recognition. 18<sup>th</sup> ICPR, 2006, vol. 2, pp. 634–637.
10. Li Y. Application of Moment Invariants to Neurocomputing for Pattern Recognition. *Electronics Let.*, 1991, vol. 27, is. 7, pp. 587–588.
11. Hosny Kh. M. On the Computational Aspects of Affine Affine Moment Invariants for Grey-scale Images. *Appl. Math. Computation*, 2008, vol. 195, is. 2, pp. 762–771.
12. Proakis J.G., Mandakis D.G. *Digital signal processing*. W., Prentice Hall, 2003.