

*Intellectual Technologies  
on Transport  
No 1*



*Интеллектуальные технологии  
на транспорте  
№ 1*

*Санкт-Петербург  
St. Petersburg  
2021*

**Интеллектуальные технологии на транспорте**  
**№ 1, 2021**

ISSN 2413-2527

Сетевой электронный научный журнал, свободно распространяемый через Интернет.  
Публикуются 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 образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

---

**Главный редактор**

Хомоненко А. Д., д.т.н., проф., С.-Петербург, РФ

**Сопредседатели редакционного совета**

Панычев А. Ю., ректор ПГУПС, С.-Петербург, РФ

Чаркин Е. И., директор по ИТ-технологиям ОАО «РЖД», Москва, РФ

---

**Редакционный совет**

Ададулов С. Е., проф., Москва, РФ  
Дудин А. Н., д.т.н., проф., БГУ, Минск, Беларусь  
Корниенко А. А., проф., ПГУПС, С.-Петербург, РФ  
Ковалец П., проф., Техн. ун-т, Варшава, Польша  
Меркурьев Ю. А., проф., РТУ, Рига, Латвия  
Нестеров В. М., проф., СПбГУ, С.-Петербург, РФ

Пустарнаков В. Ф., первый зам. ген. дир. «Газинформсервис»,  
С.-Петербург, РФ  
Титова Т. С., проф., проректор 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.  
Александрова Е. Б., проф., С.-Петербург, РФ  
Атилла Элчи, проф., ун-т Аксарай, Турция  
Басыров А. Г., проф., С.-Петербург, РФ  
Безродный Б. Ф., проф., 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  
Глухов А. П., д.т.н., Москва, РФ  
Гуда А. Н., проф., Ростов-на-Дону, РФ  
Железняк В. К., проф., Новополоцк, Беларусь  
Заборовский В. С., проф., С.-Петербург, РФ  
Зегжда П. Д., проф., С.-Петербург, РФ  
Канаев А. К., проф., С.-Петербург, РФ  
Котенко А. Г., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Куренков П. В., проф., Москва, РФ  
Лецкий Э. К., проф., Москва, РФ

Макаренко С. И., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Мирзоев Т. А., асс. проф., Джорджия, США  
Наседкин О. А., к.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Никитин А. Б., проф., С.-Петербург, РФ  
Новиков Е. А., д.т.н., доц., С.-Петербург, РФ  
Охтилев М. Ю., проф., С.-Петербург, РФ  
Привалов А. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Соколов Б. В., проф., С.-Петербург, РФ  
Таранцев А. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Утепбергенов И. Т., проф., Алматы, Казахстан  
Филипченко С. А., к.т.н., доц., Москва, РФ  
Фозилов Ш. Х., проф., Ташкент, Узбекистан  
Фу-Ниан Ху, проф., Цзянсу, Китай  
Хабаров В. И., проф., Новосибирск, РФ  
Ходаковский В. А., проф., С.-Петербург, РФ  
Чехонин К. А., проф., Хабаровск, РФ  
Ялышев Ю. И., проф., Екатеринбург, РФ

---

**Адрес редакции:**

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ауд. 1–210  
e-mail: itt-pgups@yandex.ru

---

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).

Периодичность выхода – 4 номера в год. Выпуски журнала доступны на сайте <http://itt-pgups.ru>.

Копии архивов с выпусками журнала проходят государственную регистрацию как электронное издание  
сетевого распространения в НТЦ "Информрегистр".

Информация предназначена для детей старше 12 лет.

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 2021

# Intellectual Technologies on Transport

## Issue 1, 2021

ISSN 2413-2527

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 Education  
«Emperor Alexander I Petersburg State Transport University»

---

### Editor-in-Chief

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

### Co-chairs of the Editorial Council

Panychev A. Yu., rector of PSTU, St. Petersburg, Russia  
Charkin E. I., CIO of JSC "RZD", Moscow, Russia

---

### Editorial Council Members

Adadurov S. Ye., Prof., Moscow, Russia  
Dudin A. N., Prof., BSU, Minsk, Belarus  
Kornienko A. A., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia  
Kovalets P., Prof., Tech. University, Warsaw, Poland  
Merkuryev Y. A., Prof., RTU, Academician of the  
Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia  
Nesterov V. M., Prof., SPbSU, St. Petersburg, Russia

Pustarnakov V. F., First Deputy CEO at «Gazinformservice» Ltd.,  
St. Petersburg, Russia  
Titova T. S., Prof., PSTU, St. Petersburg, Russia  
Fedorov A. R., CEO at «Digital Design» Ltd.,  
St. Petersburg, Russia  
Yusupov R. M., Prof., Corr. Member of RAS,  
St. Petersburg, Russia

---

### Editorial Board Members

Bubnov V. P., Prof., St. Petersburg, Russia –  
Deputy Editor-in-Chief  
Aleksandrova E. B., Prof., St. Petersburg, Russia  
Atilla Elci, Prof., Aksaray University, Turkey  
Basyrov A. G., Prof., St. Petersburg, Russia  
Bezrodny B. F., Prof., Moscow, Russia  
Blagoveshchenskaya E. A., Prof., St. Petersburg, Russia  
Bulavsky P. E., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia  
Vasilenko M. N., Prof., St. Petersburg, Russia  
Glukhov A. P., Dr. Sc., St. Petersburg, Russia  
Guda A. N., Prof., Rostov-on-Don, Russia  
Zheleznyak V. K., Prof., Novopolotsk, Belarus  
Zaborovsky V. S., Prof., St. Petersburg, Russia  
Zegzhda P. D., Prof., St. Petersburg, Russia  
Kanaev A. K., Prof., St. Petersburg, Russia  
Kotenko A. G., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia  
Kurenkov P. V., Prof., Moscow, Russia  
Letzky E. C., Prof., Moscow, Russia

Makarenko S. I., Dr. Sc., As. Prof.,  
St. Petersburg, Russia  
Mirzoev T. A., As. Prof., Georgia, USA  
Nasedkin O. A., As. Prof., St. Petersburg, Russia  
Nikitin A. B., Prof., St. Petersburg, Russia  
Novikov Y. A., Dr. Sc., As. Prof., St. Petersburg, Russia  
Ohtilev M. Y., Prof., St. Petersburg, Russia  
Privalov A. A., Prof., St. Petersburg, Russia  
Sokolov B. V., Prof., St. Petersburg, Russia  
Tarantsev A. A., Prof., St. Petersburg, Russia  
Utepbergenov I. T., Prof., Almaty, Kazakhstan  
Filipchenko S. A., As. Prof., Moscow, Russia  
Fozilov Sh. Kh., Prof., Tashkent, Uzbekistan  
Fu-Nian Hu, Prof., Jiangsu, China  
Khabarov V. I., Prof., Novosibirsk, Russia  
Khodakovskiy V. A., Prof., St. Petersburg, Russia  
Chekhonin K. A., Prof., Khabarovsk, Russia  
Jalyshev Y. I., Prof., Ekaterinburg, Russia

---

### Editorial address:

190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9, aud. 1–210  
e-mail: itt-pgups@yandex.ru

---

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

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

Frequency of release - 4 issues per year. Issues of the magazine are available at <http://itt-pgups.ru>.

Copies of the archives with the issues of the journal are state-registered as an electronic publication of network distribution  
in the Scientific and Technical Center "Informregister".

The content is for children over the age of 12.

## Содержание

*Барановский А.М., Езерский В. В., Шаповалов Е. Н.*

Модель интегрированной системы дистанционного мониторинга и управления эксплуатацией систем связи и передачи данных ..... 5

*Фролова С. Е., Забродин А. В.*

Архитектура системы автоматизированного распознавания единиц подвижного состава ..... 15

*Куренков П. В.*

Симплициальные и мультиплициальные комплексы в мультимодальных транспортных системах ..... 21

*Ураков А. Р., Тимеряев Т. В.*

Актуальные проблемы автоматического управления транспортными средствами ..... 35

*Переводы докладов, представленных на международном семинаре  
«Модели и методы исследования информационных систем на транспорте»  
на базе кафедр «Информационные и вычислительные системы» и «Высшая математика».  
С.-Петербург. Россия. 11-12 декабря 2020 г.*

*Фоменко В. Н., Гарбарук В. В., Попова Н. В.*

Программа генерации графических тех-файлов ..... 46

*Ковтун В. С., Павлов А. Н.*

Когнитивно-синергетический подход к проектированию автоматических космических аппаратов с бортовыми системами, обладающими свойствами вариабельности ..... 53

*Павлов А. Н., Павлов Д. А., Воротягин В. Н., Умаров А. Б.*

Структурно-функциональный анализ надежности цепи поставок при наличии колебаний спроса ..... 61

*Русанова Е. В., Рунев Е. В.*

Метод оценки геоэкологических технологий на основе взвешенной свертки критериев частичной эффективности в среде MATLAB ..... 68

## Contents

*Baranovsky A. M., Ezerskiy V. V., Shapovalov E. N.*  
Remote Monitoring and Control System of Operation of Communication and Data Transmission  
System Integrated Model ..... 5

*Frolova S. E., Zabrodin A. V.*  
The Architecture of the System of Automated Recognition of Rolling Stock Units ..... 15

*Kurenkov P. V.*  
Simplicial and Multiplicial Complexes in Multimodal Transportation Systems ..... 21

*Urakov A. R., Timeryaev T. V.*  
Actual Problems of Autonomous Vehicle Control ..... 35

*Translations of reports presented at the Models and Methods for Researching Information Systems  
in Transport Workshop on the basis of the departments  
«Information and Computer Systems» and «Higher Mathematics».  
St. Petersburg, Russian Federation, December 11-12, 2020.*

*Fomenko V. N., Garbaruk V. V., Popova N. V.*  
A Program for Generating Tex Source Files Producing Graphic Output ..... 46

*Kovtun V. S., Pavlov A. N.*  
Cognitive-Synergetic Approach to the Design of Automated Spacecraft with Onboard Systems  
with Variability Properties ..... 53

*Pavlov A. N., Pavlov D. A., Vorotyagin V. N., Umarov A. B.*  
Structural and Functional Analysis of Supply Chain Reliability in the Presence of Demand  
Fluctuations ..... 61

*Rusanova E. V., Runev E. V.*  
A Method for Evaluating Geo-Environmental Technologies Based on a Weighted Convolution  
of Partial Performance Criteria in the MATLAB Environment ..... 68

# Модель интегрированной системы дистанционного мониторинга и управления эксплуатацией систем связи и передачи данных

к.т.н. А. М. Барановский  
АО «НИИ программных средств»,  
Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
bamvka@mail.ru

д.т.н. В. В. Езерский, к.т.н. Е. Н. Шаповалов  
АО «НИИ программных средств»  
Санкт-Петербург, Россия  
vezerskiy@nii-ps.ru, henyu56@mail.ru

**Аннотация.** Проведен анализ особенностей эксплуатации современных систем связи и передачи данных и систем их мониторинга. На основе показателя качества функционирования систем связи и передачи данных приведена постановка задачи обоснования характеристик системы дистанционного мониторинга и управления эксплуатацией. Предложена структура системы дистанционного мониторинга и управления эксплуатацией, охарактеризованы решаемые ею задачи. Разработана обобщенная структура интегрированной системы дистанционного мониторинга и управления эксплуатацией, приведена ее функциональная структура, показаны ее преимущества.

**Ключевые слова:** дистанционный мониторинг, эксплуатация телекоммуникационных сетей, системы связи и передачи данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание и развитие сложных территориально распределенных систем (СТРС) обусловило необходимость создания гибкой системы управления филиалами, подразделениями, офисными площадками и т. д., находящимися на значительном удалении друг от друга. Такая система обеспечивает оперативный сбор информации и ее передачу абонентам, улучшает качество документооборота и, таким образом, повышает эффективность централизованного управления СРТС.

Принципы, по которым строится сеть СРТС, отличаются от тех, что используются при создании локальных сетей. Основное отличие состоит в том, что территориально-распределенные сети используют арендованные линии связи, арендная плата за использование которых составляет значительную часть себестоимости всей сети и возрастает с увеличением качества и скорости передачи данных. Поэтому первой задачей, которую необходимо решать при создании территориально-распределенных корпоративных сетей, является организация каналов связи. Для географически удаленных объектов стоимость аренды каналов становится значительной, а их качество и надежность при этом могут значительно снижаться.

Одним из подходов к решению задачи организации каналов связи между удаленными объектами СРТС является использование уже существующих глобальных сетей, в том числе и частных. В этом случае необходимо обеспечить каналы связи от объектов СРТС до ближайших узлов

выбранной глобальной сети, которая может содержать каналы связи разных типов: кабельные оптические и электрические, в том числе телефонные, беспроводные радио- и спутниковые каналы, имеющие различные пропускные способности.

Однако организация каналов связи через глобальные частные сети также может быть дорогостоящей. Во многих случаях снизить стоимость аренды каналов связи может технология виртуальных частных сетей (Virtual Private Network, VPN), организуемых поверх публичной сети, как правило, сети Интернет. VPN позволяет установить защищенное цифровое соединение между двумя удаленными объектами (локальными сетями). Несмотря на то, что по публичным сетям коммуникации осуществляются с использованием небезопасных протоколов, за счет шифрования создаются закрытые каналы обмена информацией, обеспечивающие безопасность передаваемых данных. Схема такой организации связи представлена на рисунке 1.

При этом организуется единая сетевая инфраструктура и информационное пространство СРТС, доступ к которому одинаково возможен из любой точки корпоративной сети. В таких сетях достаточно просто организовать дополнительные ИТ-сервисы, такие как голосовая связь по IP, видео-конференц-связь, бизнес-приложения, оперативная и конфиденциальная связь с подразделениями СРТС. Еще одно преимущество связано со значительным уменьшением объема междугородного и международного трафика за счет передачи телефонных звонков по каналам сети СРТС.

Решение функциональных задач управления сложными территориально-распределенными системами во многом определяется устойчивым функционированием систем связи и передачи данных (ССПД), которые не только объединяют локальные логические устройства в единую сеть обмена информацией, но и отвечают за сопряжение абонентов распределенной системы со средствами связи и средствами привязки к магистральным каналам связи.

Одной из проблем функционирования ССПД является появление отказов и необходимость их оперативной локализации и устранения. Для этого необходимо обеспечить непрерывный контроль функционирования ССПД и оперативное устранение выявленных отказов. Кроме того, как

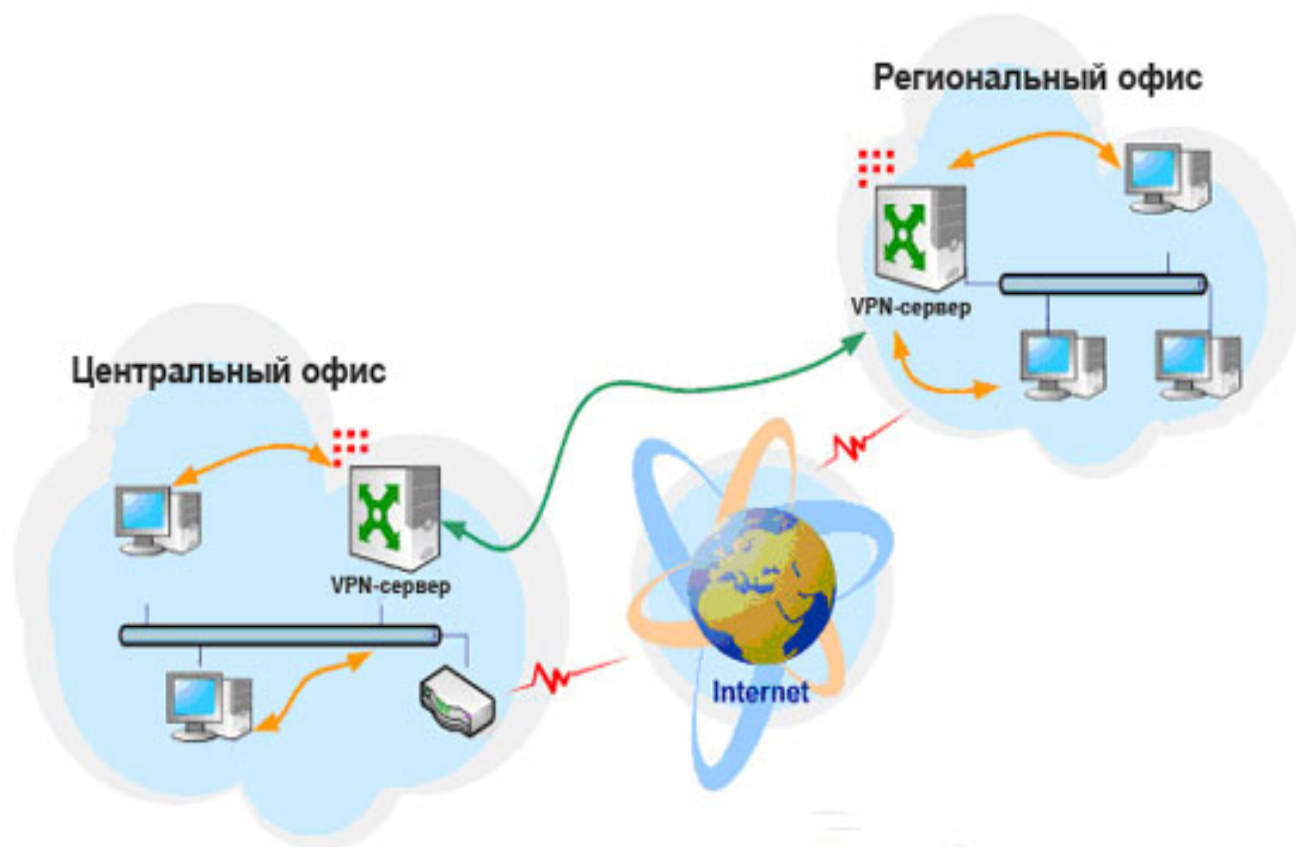


Рис. 1. Организация канала связи на основе технологии VPN

показывает практика, целесообразно автоматизировать связанные с устранением отказа процессы управления эксплуатацией ССПД, такие как учет запасных частей, оформление эксплуатационной документации, отчетных документов и т. д.

Контроль функционирования ССПД с учетом вышеперечисленных особенностей, как правило, осуществляется с использованием системы дистанционного мониторинга и управления эксплуатацией (СДМУ). При этом под мониторингом технического состояния ССПД понимается комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на выявление и сбор информации, характеризующей состояние телекоммуникационного оборудования, а под управлением эксплуатацией понимается комплекс мероприятий поддержки эксплуатации ССПД. Современный подход к созданию систем мониторинга технического состояния основан на концепции систем поддержки операций [1, 2], нацеленной на комплексное управление телекоммуникационными ресурсами и позволяющей осуществлять эксплуатационную поддержку ССПД.

Особую важность задачи мониторинга и управления эксплуатацией приобретают применительно к ССПД, которые являются составными частями систем ОАО «РЖД» и представляют собой сложные территориально распределенные системы, поскольку их технические средства и структурные подразделения разбросаны по территории всей Российской Федерации. Глобальность таких ССПД и их важная роль в обеспечении различных сфер деятельности обуславливают повышенные требования к качеству их функционирования и поддержанию работоспособного состояния. СДМУ системы такого класса должна не толь-

ко контролировать состояние ССПД и уведомлять лиц, принимающих решения (ЛПР), об аварийном состоянии каналов, отказах оборудования, «зацикливании» трафика, ошибках протокола и т. д., но и оперативно локализовать проблемные участки, обеспечивать персонал необходимой информацией о возможных причинах возникшей проблемной ситуации, автоматически формировать необходимые эксплуатационные документы. Это даст возможность существенно сократить время устранения проблемной ситуации и сократить ущерб от событий такого рода.

#### ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Качество функционирования ССПД во многом определяется устойчивостью связи — гарантированной доставкой информации абоненту. Исходя из этого показатель качества ССПД можно определить как вероятность  $P_y$  своевременной доставки информации абоненту с учетом всех доступных информационных направлений связи (ИНС), что не противоречит требованиям стандарта [3]:

$$P_y = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - P_{yj}) = 1 - \prod_{j=1}^J (1 - K_{гj} P_{свj}), \quad j = \overline{1, J} \quad (1)$$

где  $P_{свj}$  — вероятность связности  $j$ -го ИНС;

$K_{гj}$  — коэффициент готовности  $j$ -го ИНС;

$J$  — количество доступных ИНС.

Показатель  $P_{yj}$  связности  $j$ -го ИНС определяется как вероятность того, что на данном ИНС существует хотя бы один путь, по которому возможна передача требуемого объема информации с требуемым качеством обслуживания. Он характеризует технические возможности ИНС.

Коэффициент готовности  $K_{rj}$  определяет доступность  $j$ -го ИНС, своевременность доставки пакета абоненту и работоспособность элементов доставки пути. Этот показатель характеризует надежность ИНС и организацию трафика.

На стадии эксплуатации управляемыми параметрами, влияющими на показатели  $P_{yj}$ , являются требуемые условия функционирования, при обеспечении которых может быть реализовано эксплуатационное качество каждого ИНС.

Управляемыми параметрами, влияющими на показатель  $K_{rj}$ , являются характеристики мониторинга (глубина  $S_m$ , периодичность  $P_m$  и т. д.) и параметры поддержки эксплуатации (объем  $S_{п}$  и периодичность  $P_{п}$  технического обслуживания, состав комплекта запасных частей  $S_{зип}$  и т. д.). От значений этих параметров во многом зависит поддержание и восстановление работоспособного состояния оборудования ИНС.

Анализ выражения (1) позволяет оценивать влияние управляемых параметров на вероятность связности, коэффициент готовности каждого ИНС и, соответственно, на показатель качества  $P_y$  ССПД в целом. Задача обеспечения требуемого качества ССПД сводится к определению таких параметров процессов мониторинга  $\{S_m, P_m\}$  и поддержки эксплуатации  $\{S_{п}, P_{п}, S_{зип}\}$ , которые позволяют достичь требуемого (заданного) значения показателя качества  $P_y^{TP}$  ССПД:

$$P_y(S_m, P_m, S_{п}, P_{п}, S_{зип}) \geq P_y^{TP}. \quad (2)$$

Конкретный вид выражения (2) может быть получен на основе исследований функционирования ССПД и ее сегментов. На его основании решается задача синтеза (определения параметров) СДМУ. В общем виде постановка этой задачи имеет вид (применительно к глубине мониторинга  $S_m$ ):

$$S_m = Arg P_y(S_m, P_m, S_{п}, P_{п}, S_{зип}), \quad P_y \geq P_y^{TP}. \quad (3)$$

Так, если ввести три уровня глубины мониторинга (0 — отсутствие мониторинга, 1 — определение параметров локального логического устройства ССПД, 2 — определение параметров функционального модуля, 3 — определение параметров блока, который может быть заменен персоналом), то можно оценить выбор требуемой глубины мониторинга, при которой обеспечивается требуемое значение вероятности своевременной доставки информации абоненту  $P_y^{TP}$ . На рисунке 2 изображен график изменения коэффициента готовности и вероятности  $P_y$  от уровня глубины мониторинга  $S_m$  для ССПД с двумя ИНС с одинаковыми показателями связности (примем, что  $P_{св1} = P_{св2} = 0,85$ ) и зафиксированными значениями  $P_m, S_{п}, P_{п}, S_{зип}$ .

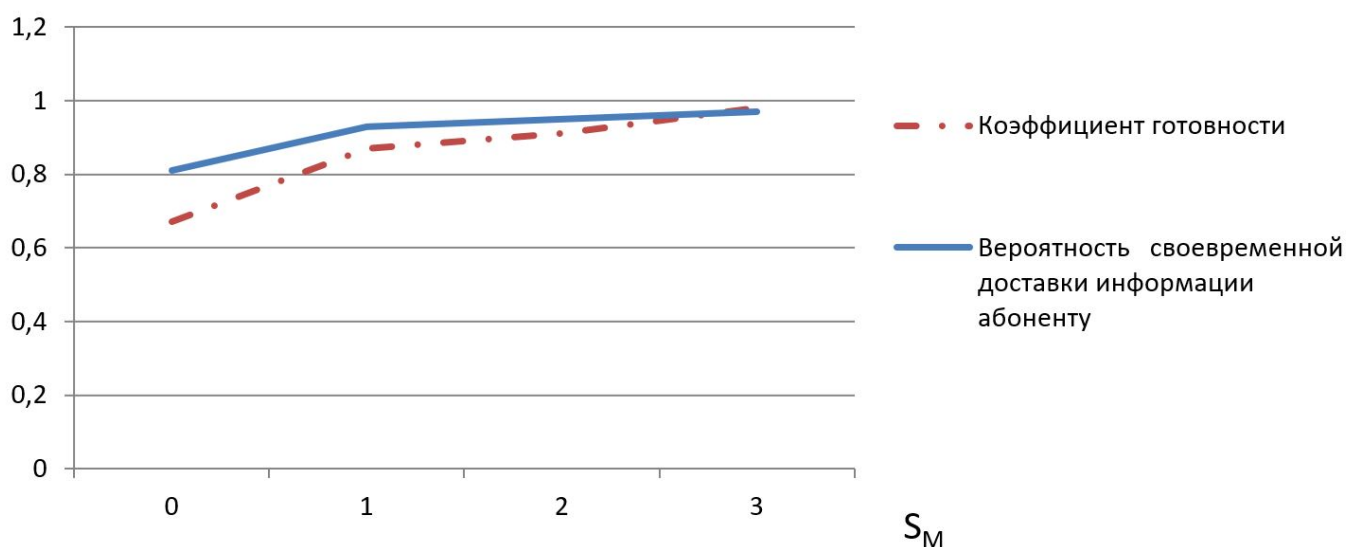


Рис. 2. Графики показателей качества ССПД в зависимости от глубины мониторинга

Изменение уровня глубины мониторинга влияет на значение коэффициента готовности ИНС: чем выше уровень глубины мониторинга, тем меньше среднее время восстановления ССПД и, соответственно, выше коэффициент готовности.

Работа СДМУ направлена на обеспечение требуемого качества функционирования ССПД, оперативной реакции на возникающие технические проблемы на основе результатов дистанционного мониторинга, а также на обеспечение требуемой надежности ССПД за счет совершенствования системы поддержки эксплуатации с помощью внедрения CALS-технологий и их модификаций [4, 5].

СТРУКТУРА И ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ССПД ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ССПД территориально распределенных комплексов предназначена для обеспечения круглосуточного информационного взаимодействия их элементов.

В состав ССПД должны входить пункты эксплуатации (ПЭ), предназначенные для приема первичной информации, и центры управления (ЦУ), в которых информация обрабатывается и далее передается потребителям.

К объектам мониторинга ССПД относится входящее в состав ПЭ и ЦУ сетевое оборудование:

- широкополосного цифрового тракта передачи данных;

- системы связи в различных диапазонах;
- интегрированной системы информационного обмена.

Поскольку СДМУ ССПД распределенных комплексов решает задачи не только мониторинга телекоммуникационного оборудования, но и управления эксплуатацией, то при ее создании может быть учтен опыт построения аналогичной системы дистанционного мониторинга теле-

коммуникационного оборудования космодрома «Восточный» [6].

Рассмотрим основные принципы, которые должны лежать в основе построения ССПД распределенных комплексов (рис. 3).

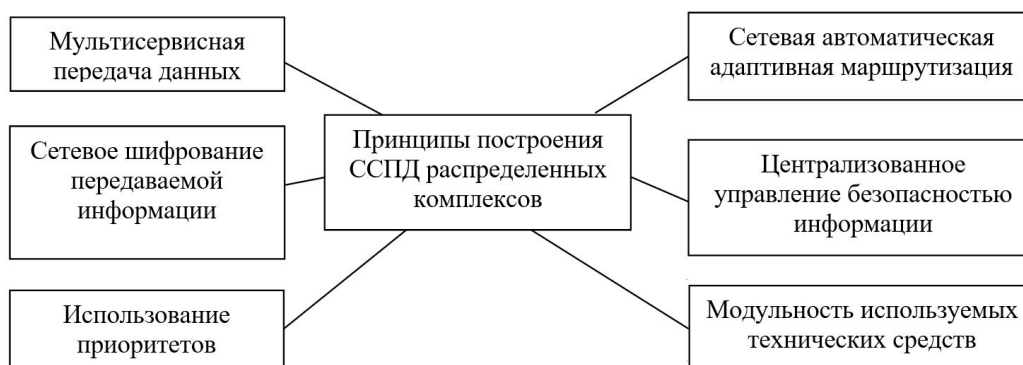


Рис. 3. Принципы построения ССПД сложных комплексов

1. *Мультисервисная передача данных* представляет собой универсальную многоцелевую среду, предназначенную для передачи информации с использованием технологии коммутации пакетов. Отличается надежностью и обеспечивает относительно низкую стоимость передачи в расчете на единицу объема информации. Рост популярности мультисервисных сетей связи — одна из самых заметных тенденций российского рынка телекоммуникационных услуг в последние годы. Метод коммутации пакетов предполагает предоставление пользователям телекоммуникационных услуг, реализуемых протоколами PPP, ARP, IP, IPSec, RIP, ICMP, UDP, TCP, FTP, HDLC, LAPB, Telnet, SNMP. Мультисервисные сети можно строить как на платформе IP (IP VPN), так и на основе выделенных каналов связи.

2. *Сетевая автоматическая адаптивная маршрутизация* предполагает статическую и динамическую IP-маршрутизацию на любые интерфейсы с проведением фильтрации адресов и каналов. Алгоритмы адаптивной маршрутизации используются для того, чтобы гарантировать, что пакеты данных могут перемещаться от одной точки сети в другую, даже если один или несколько узлов между ними отсутствуют.

3. *Сетевое шифрование (криптографическое преобразование) передаваемой информации* предназначено для защиты от несанкционированного мониторинга, подмены пакетов и управления потоками данных. В основе шифрования, аутентификации и обеспечения защиты при транспортировке IP-пакетов может лежать комплект протоколов IP Security.

4. *Централизованное управление безопасностью информации* позволяет, как показывает практика, существенно повысить эффективность работы подразделений информационной безопасности [7].

5. *Использование приоритетов срочности сообщений и абонентов* позволяет регулировать поток сооб-

щений и устанавливать очередность передачи информации.

6. *Модульность используемых технических средств* обеспечивает высокую ремонтпригодность оборудования, удобство его эксплуатации быструю замену отказавших модулей.

Система мониторинга обеспечивает проведение дистанционных измерений рабочих (диагностических) параметров оборудования ССПД в реальном масштабе времени. Полученная информация поступает в базу данных о техническом состоянии ССПД. СДМУ реализует функции преобразования полученных данных, необходимых ЛПП для формирования решений по поддержанию заданного уровня эксплуатационных свойств ССПД.

Применение метода функциональной декомпозиции позволяет выделить составные части любой системы мониторинга [8]:

1) подсистема сбора данных, осуществляющая опрос объектов мониторинга с заданными временными интервалами (периодичностью) и первичный анализ полученных данных с целью отнесения полученных значений к нормальным, требующим вмешательства оператора, критическим и т. д.;

2) подсистема хранения, включающая компоненты для работы с базами данных, программные средства сжатия данных для уменьшения объема хранимой информации и т. п.;

3) подсистема анализа данных, предназначенная для исследования накопленных данных (статистический анализ, выявление трендов и т. д.);

4) подсистема оповещения, которая необходима для уведомления ЛПП о нештатных ситуациях и других значимых изменениях состояния объектов;

5) подсистема вывода (визуализации), предназначенная для представления информации в удобном виде для ЛПП;

б) подсистема коррекции, которая предоставляет возможность выбора вариантов действий по устранению возникших нештатных ситуаций.

Первые три подсистемы решают задачи, относящиеся к фоновому мониторингу — систематическому накоплению, классификации и анализу данных о работе объектов мониторинга.

Три последних из перечисленных подсистем ориентированы на оперативный мониторинг, направленный на оценку текущего состояния объектов мониторинга и немедленную реакцию на обнаруженные нештатные ситуации.

Основные задачи оперативного мониторинга, которые решает СДМУ, связаны с получением и предоставлением ЛПР информации, позволяющей оценить техническое состояние оборудования, локализовать отказ, получить доступ к электронным версиям необходимых эксплуатационных документов. К таким задачам относятся:

- визуализация средств ССПД с использованием цифровой модели карты местности;
- визуализация мнемосхем отдельных средств связи с точностью до отдельного функционального блока (по запросу), а также вывод данных по их техническому состоянию;
- визуализация списков оборудования, задействованного в работе, с указанием их текущего состояния, значений технических и эксплуатационных характеристик. При этом обеспечивается возможность детализации технических средств до уровня отдельных функциональных блоков и устройств;
- визуализация списков некорректно функционирующего оборудования с отображением истории изменения состояния;
- обеспечение доступа к интерфейсу средств управления программного комплекса мониторинга телекоммуникационного оборудования по протоколу SNMP;
- контроль состояния оборудования в режиме, приближенном к реальному времени;
- визуализация структуры системы на цифровой топографической карте местности или плане здания (этажа, помещения);
- журналирование событий;
- оперативный доступ к эксплуатационной документации ССПД.

Немаловажную роль играет автоматизация процессов управления эксплуатацией ССПД. Это позволяет поддерживать в актуальном состоянии необходимые сведения о задействованном в работе оборудовании, учете технических средств, их состоянии, выполненных эксплуатационных работах, наличии и состоянии

запасных частей. Решение задач управления эксплуатацией связано с большим объемом рутинной работы, что существенно снижает качество решаемых эксплуатационных задач. Наибольшие временные затраты обусловлены заполнением эксплуатационных документов, связанных с поиском и устранением неисправности. В частности, к задачам управления эксплуатацией ССПД, которые решает СДМУ, относятся:

- инвентаризация оборудования;
- учет средств ССПД в виде взаимоувязанных структур;
- ведение цифровой карты местности расположения объекта эксплуатации;
- учет и документирование проведенных эксплуатационных процессов;
- формирование сводных отчетов о состоянии средств ССПД;
- планирование эксплуатационных процессов и ремонта средств ССПД;
- отображение трафика в наземном сегменте ССПД.

Значительное расширение возможностей СДМУ позволяет существенно облегчить деятельность ЛПР при управлении эксплуатацией ССПД за счет автоматизированной подготовки всего пакета необходимых документов при обнаружении неисправности или иной нештатной ситуации.

#### ИНТЕГРАЦИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ

Алгоритм действий ЛПР при подготовке решения предполагает оценку объема эксплуатационных работ, определение источника ресурсов и разработку графика их выполнения. Наличие средств автоматизации в составе системы эксплуатации ССПД при принятии организационных и управленческих решений повышает уровень их оперативности и достоверности, а кроме того, существенно снижает негативное влияние человеческого фактора или даже полностью исключает его.

Объем работ зависит от характера возникшей проблемной ситуации (неисправности), что связано с задачами оперативного мониторинга, о которых говорилось выше. Кроме того, при планировании эксплуатационных работ нужно оформлять значительное количество документов, что предопределяет оперативное получение необходимой информации, а также доступ к действующим формам документов и их оформлению. При этом могут возникать проблемы информационного взаимодействия, для предотвращения этого целесообразно интегрировать СДМУ в состав ССПД.

Структурно в состав интегрированной ССПД включаются составляющие, представленные на рисунке 4.

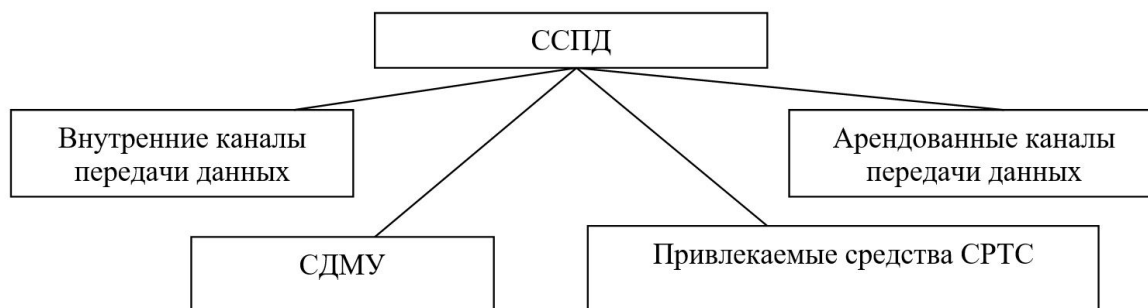


Рис. 4. Состав интегрированной ССПД

Реализация конкретных технических решений возможна на основании широко используемой в практике создания информационных систем сетевидельческой модели управления. Это позволяет обеспечить высокую масштабируемость, надежность и функциональную полноту специального программного обеспечения СДМУ ССПД.

В основу архитектуры СДМУ может быть заложен принцип централизованной системы с распределенным сбором информации о текущем состоянии элементов инфраструктуры ССПД и консолидацией информации в центральной базе данных центра управления. Этот принцип предполагает создание на базе ССПД центра мониторинга и управления эксплуатацией (ЦМУЭ) СДМУ, обеспечи-

вающего оперативный мониторинг и управление эксплуатацией сетевого оборудования и инфотелекоммуникационной инфраструктуры ЦУ и ПЭ, а также оборудования ССПД на уровне ЦУ.

Может быть предусмотрен резервный центр мониторинга и управления эксплуатацией СДМУ, который может размещаться на средствах запасного центра управления. Резервный центр реализует весь функционал основного ЦМУЭ и находится в постоянной готовности обеспечить переключение в случае выхода из строя основного комплекта ЦМУЭ. Функциональная схема подсистемы мониторинга СДМУ показана на рисунке 5.

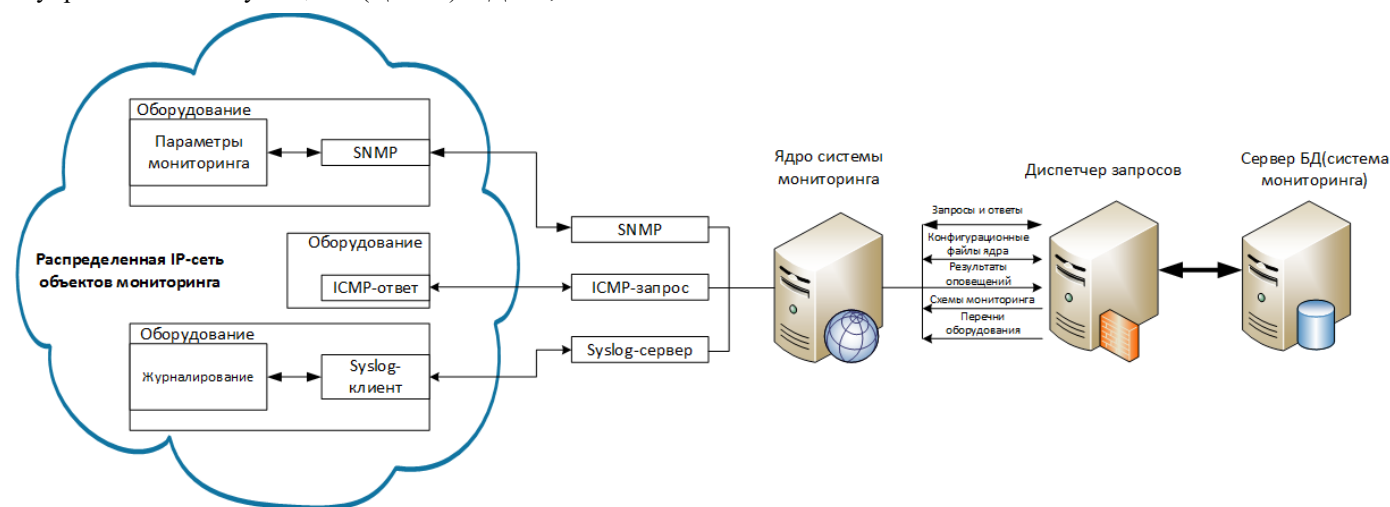


Рис. 5. Функциональная схема подсистемы мониторинга СДМУ

Реализация функций мониторинга и управления эксплуатацией средств ССПД, размещенных на ПЭ, в полном объеме возлагается на пункты мониторинга и управления эксплуатацией (ПМУЭ), которые размещаются на ПЭ.

Доступ операторов к функционалу ЦМУЭ и ПМУЭ осуществляется при помощи автоматизированного рабочего места мониторинга и управления эксплуатацией (АРММУЭ).

Конкретные места размещения и функционал каждого конкретного АРММУЭ определяются на основании дополнительных сведений о составе и характеристиках оборудования.

Ядром СДМУ являются подсистемы, реализующие внутренние процессы системы мониторинга, к которым относятся:

- циркулирование информационных потоков между подсистемами СДМУ,
  - передача данных,
  - запуск процедур сбора информации,
  - оповещение,
  - обработка, сохранение и архивация данных.
- Эти процессы должны быть реализованы на основе современных универсальных технологий.

#### СОСТАВ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ

Специальное программное обеспечение (СПО) «Сервер ПМУЭ» (рис. 6) предназначено для получения, обработки, хранения и предоставления потребителям информации по мониторингу, структуре, учету, планированию и

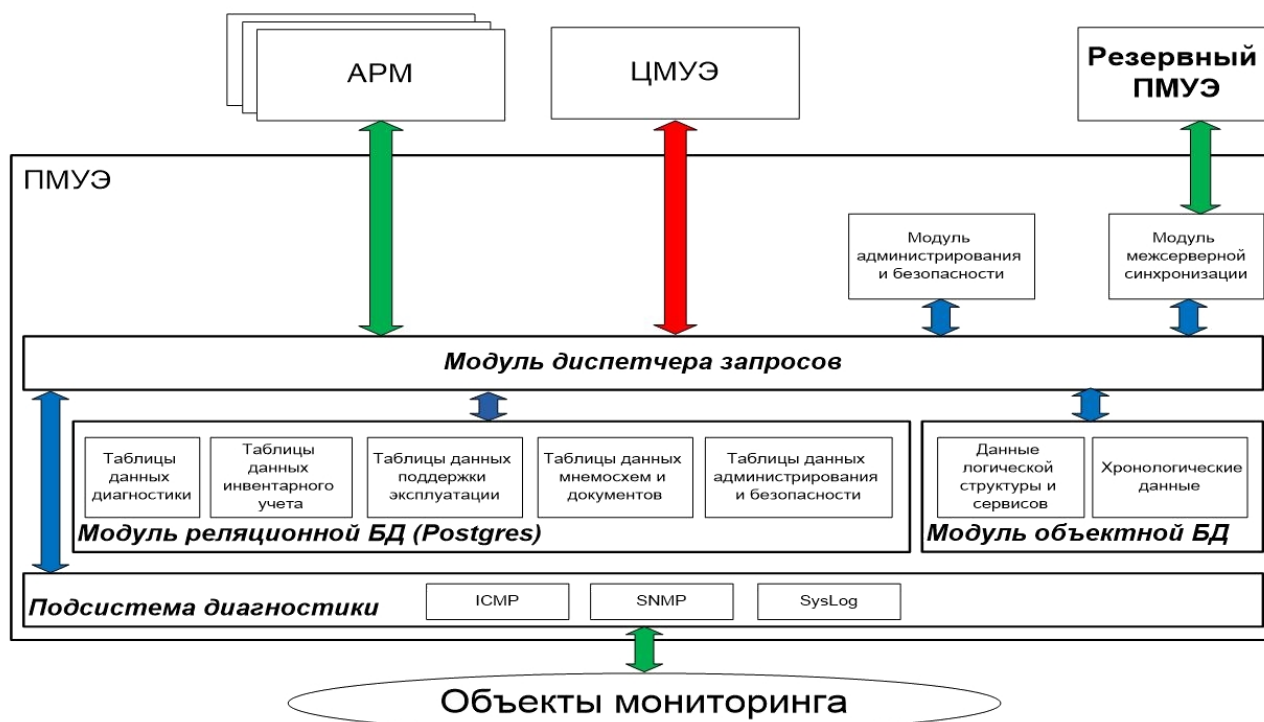


Рис. 6. Функциональная структура СПО «Сервер ПМУЭ»

поддержке эксплуатации объектов, входящих в состав ССПД.

Для хранения информации используется реляционная база данных на основе СУБД Postgres, а также специализированное хранилище, использующее объектно-ориентированную модель данных.

Для унификации доступа к данным используется диспетчер запросов. СПО строится на модульном принципе, что позволяет обеспечить условие масштабируемости.

СПО включают в себя следующие общие модули:

- модуль диспетчера запросов, который предназначен для обработки запросов от внешних потребителей и других модулей, их трансляции в формат, пригодный для извлечения данных из баз данных, а также для преобразования результатов выполнения запросов в форму, пригодную для обработки источником запроса;

- модуль реляционной БД, который предназначен для обеспечения ввода, обработки, хранения, поиска, извлечения данных, связанных с инвентарным учетом, мониторингом состояния, мнемосхемами, поддержкой эксплуатации и документированием процессов жизненного цикла оборудования, а также информации о ролях и профилях пользователей и прочих данных, необходимых для обеспечения администрирования системы;

- модуль объектной БД, который предназначен для обеспечения обработки, хранения, поиска, извлечения данных, связанных с логической и физической структурой объектов мониторинга, сетей и сетевых сервисов, а также ведения хронологической базы изменений этих структур;

- подсистема диагностики, которая предназначена для оценивания текущего состояния объектов мониторинга и их основных характеристик с использованием протоколов

SNMP, ICMP и SysLog (перечень модулей подсистемы определяется составом объектов мониторинга конкретного пункта/центра);

- модуль межсерверной синхронизации, который предназначен для поддержания в актуальном состоянии информации, хранящейся на резервном сервере ПМУЭ;

- модуль администрирования и безопасности, который предназначен для решения задач администрирования баз данных, а также обеспечения безопасности доступа к данным и защиты данных от несанкционированного доступа.

В состав СПО «Сервер ЦМУЭ», имеющего схожую структуру, входит модуль сбора данных, который предназначен для сбора, агрегации и актуализации информации, хранящейся в подконтрольных ПМУЭ.

СПО АРМ («Клиент АРММУЭ») предназначено для ввода, обработки и визуализации информации по мониторингу, структуре, учету объектов, входящих в состав ССПД, реализации функций учета, планирования, поддержки эксплуатации объектов, входящих в ССПД, а также предоставления доступа к средствам управления таких объектов (для объектов, поддерживающих удаленное управление).

СПО «Клиент АРММУЭ» не предназначено для автономного использования и используется исключительно в качестве клиентского приложения для доступа к данным, хранящимся на ЦМУЭ (ПМУЭ).

СПО «Клиент АРММУЭ» имеет динамически загружаемую модульную структуру, где набор доступных модулей, а также пользовательский интерфейс определяется ролью пользователя и настраивается администратором как для ролей, так и для отдельных пользователей.

Кроме загружаемых модулей СПО «Клиент АРММУЭ» содержит общие модули, работающие в системе независимо от роли пользователя:

– модуль управления программы (main) — главный модуль, обеспечивающий запуск СПО;

– диспетчер подключений, обеспечивающий подключение и трансляцию запросов от других модулей к ЦМУЭ (ПМУЭ) посредством сетевого интерфейса;

– модуль аутентификации и контроля безопасности, который отвечает за аутентификацию пользователя на сеанс и контроль целостности приложения в рамках защиты от несанкционированного доступа (НСД);

– диспетчер загрузки модулей, который управляет загрузкой и выгрузкой модулей, а также межмодульным взаимодействием.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция задач мониторинга и управления эксплуатацией ССПД в автоматизированном режиме позволяет получить следующие преимущества:

– оперативное получение информации о функциональном состоянии оборудования ССПД для формирования системы отчетов с показателями качества по предварительно составленному расписанию или по запросам ЛПР;

– оперативное обеспечение ЛПР информацией о динамике одновременного задействования каналов по маршруту для формирования прогнозной модели нагрузки сетей ССПД и оптимизации трафика в автоматическом режиме;

– установка оператором предельного количества каналов для обработки информации;

– локализация неисправности применительно к оборудованию ССПД и существенное сокращение времени на ее устранение;

– автоматизированное оформление документов, необходимых для реализации типовых эксплуатационных процессов, таких как восстановление работоспособного состояния оборудования ССПД, планирование и проведение технического обслуживания, организация ремонта и т. д.

Перечисленные преимущества позволяют повысить готовность ССПД к решению задач по предназначению с учетом показателей диагностирования, снизить информационные риски эксплуатации ССПД и безопасности их применения в рамках моделей, рассмотренных в [9–11]. Согласованность и совместимость СДМУ в составе сложных территориально-распределенных ССПД и комплексов различного назначения может быть оценена в соответствии с методикой, изложенной в [12].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Папинова, О. И. Технологии CALS в интегрированной информационной среде // Тенденции развития науки: Инновационный подход: Сборник материалов Международной научно-практической конференции (г. Кемерово, 31 октября 2019 г.). — Кемерово, Западно-Сибирский научный центр, 2019. — С. 175–177.

2. Радин А. И. Использование CALS-методологии при проектировании и эксплуатации распределенных информационных систем / А. И. Радин, А. А. Михайлов // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: Сборник научных статей по материалам 16-й Международной научно-практической конференции (г. Новочеркасск, 02 ноября 2015 г.). — Новочеркасск: Южно-Российский гос. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова, 2016. — С. 71–74.

3. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки = Stability of functioning of the public communications network. Requirements and check methods: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 декабря 2008 г. № 529-ст: дата введения 2009-10-01. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 18 с.

4. Шаповалова, К. И. Использование CALS-технологий в космической отрасли / К. И. Шаповалова, Н. С. Грудина // Решетневские чтения: Материалы XX Юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика М. Ф. Решетнева (г. Красноярск, 09–12 ноября 2016 г.): в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сибирский гос. аэрокосмический ун-т. — Красноярск: СибГАУ имени академика М. Ф. Решетнёва, 2016. — Ч. 2. — С. 461–463.

5. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / О. В. Майданович, М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2011. № 10. С. 1–32.

6. Система мониторинга и поддержки эксплуатации телекоммуникационной инфраструктуры космодрома «Восточный» / Д. А. Севастьянов, Е. А. Новиков, С. Ю. Рыбаков [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. Вып. 2. С. 28–37.

7. Бирюков, А. А. Централизованное управление системами безопасности // БИТ. Бизнес и информационные технологии. 2015. № 1 (44). С. 3–8.

8. Кореньков, В. В. Архитектура системы мониторинга центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ / В. В. Кореньков, В. В. Мицын, П. В. Дмитриенко // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. № 3. С. 31–42.

9. Барановский, А. М. Оценивание информационных рисков транспортной безопасности / А. М. Барановский, А. Д. Хомоненко // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: Сборник трудов X Санкт-Петербургского конгресса (Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2016 г.) / под общ. ред. Т. С. Титовой. — Санкт-Петербург: Изд-во ПГУПС, 2016. — Т. 1. — С. 33–38.

10. Барановский, А. М. Математическое оценивание рисков транспортной безопасности / А. М. Барановский, А. Д. Хомоненко // Проблемы математической и естественнонаучной подготовки в инженерном образовании: Сб. трудов IV Международной научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 03 ноября 2016 г.) / под ред. В. А. Ходаковского. — Санкт-Петербург, 2017. — Т. 2. — С. 3–9.

11. Барановский, А. М. Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом показателей качества диагностирования / А. М. Барановский, Е. А. Захарова // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. 2019. Вып. 669. С. 124–132.

12. Бочков, А. П. Оценка согласованности и совместности технических систем в составе сложных организационно-технических систем / А. П. Бочков, А. М. Барановский, Р. Г. Гильванов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 284–301.

DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109.

# Remote Monitoring and Control System of Operation of Communication and Data Transmission System Integrated Model

PhD A. M. Baranovsky  
Software Research Institute,  
Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
bamvka@mail.ru

Grand PhD V. V. Ezerskiy, PhD E. N. Shapovalov  
Software Research Institute  
Saint Petersburg, Russia  
vezerskiy@nii-ps.ru, henya56@mail.ru

**Abstract.** The analysis of the operation features of modern communication and data transmission systems and their monitoring systems is carried out. On the basis of the indicator of the quality of functioning of communication and data transmission systems, the task of substantiating the characteristics of the remote monitoring and operation management system is formulated. The structure of the remote monitoring and operation management system is proposed, and the tasks it solves are described. The model of the integrated system of remote monitoring and operation management is developed, its functional structure is given, its advantages are shown.

**Keywords:** remote monitoring, operation of telecommunication networks, communications and data transition systems.

## REFERENCES

1. Papinova O. I. CALS Technologies in an Integrated Information Environment [Tekhnologii CALS v integrirovannoy informatsionnoy srede]. In: *Science Development Trends: An Innovative Approach. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference [Tendentsii razvitiya nauki: Innovatsionnyy podkhod: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii]*, Kemerovo, Russia, October 31, 2019. Kemerovo, West Siberian Scientific Center, 2019, Pp. 175–177.
2. Radin A. I., Mikhailov A. A. Use of CALS-Methodology for the Design and Operation of Distributed Information Systems [Ispol'zovanie CALS-metodologii pri proektirovani i ekspluatatsii raspredelennykh informatsionnykh sistem]. In: *Computer Technologies in Science, Production, Social and Economic Processes. Collection of scientific articles based on the materials of the 16th International Scientific and Practical Conference [Komp'yuternye tekhnologii v nauke, proizvodstve, sotsial'nykh i ekonomicheskikh protsessakh: Sbornik nauchnykh statey po materialam 16-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii]*, Novocherkassk, Russia, November 02, 2015. Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 2016, Pp. 71–74.
3. GOST R 53111-2008. Stability of Functioning of the Public Communications Network. Requirements and Check Methods [Ustoychivost' funktsionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya i metody proverki]. Moscow, StandardInform, 2019, 18 p.
4. Shapovalova K. I., Grudinina N. S. Using CALS Technologies in the Aerospace Industry [Использование CALS-технологий в космической отрасли]. In: *Reshetnev Readings. Proceedings of the Anniversary International Science and Research Conference in memory of M. F. Reshetnev [Reshetnevskie chteniya: Materialy XX Yubileynoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati akademika M. F. Reshetneva]*, Krasnoyarsk, Russia, November 09–12, 2016, Chapter 2. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State Aerospace University, 2016, Pp. 461–463.
5. Maidanovich O. V., Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Integrated Automation of Space Mean's State Monitoring Based on Intelligent Information Technology [Kompleksnaya avtomatizatsiya monitoringa sostoyaniya kosmicheskikh sredstv na osnove intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologiy], *Appendix to the Information Technologies Journal [Prilozhenie k zhurnalu «Informatsionnye tekhnologii»]*, 2011, No. 10, Pp. 1–32.
6. Sevast'yanov D. A., Novikov E. A., Rybakov S. Y., et al. Monitoring and Operation Support System of Vostochny Spaceport Telecommunication Infrastructure [Sistema monitoringa i podderzhki ekspluatatsii telekommunikatsionnoy infrastruktury kosmodroma «Vostochnyy»], *Questions of Radio Electronics.TV Equipment Series [Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya]*, 2015, Is. 2, Pp. 28–37.
7. Biryukov A. A. Centralized Management of Security Systems [Tsentralizovannoe upravlenie sistemami bezopasnosti], *BIT. Business and Information Technology [BIT. Biznes i informatsionnye tekhnologii]*, 2015, No. 1 (44), Pp. 3–8.
8. Korenkov V. V., Mitsyn V. V., Dmitrienko P. V. Architecture of Monitoring System for JINR Central Informational Computing Complex [Arkhitektura sistemy monitoringa tsentral'nogo informatsionno-vychislitel'nogo kompleksa OIYaI], *Journal of Information Technologies and Computing Systems [Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy]*, 2012, No. 3, Pp. 31–42.
9. Baranovsky A. M., Khomonenko A. D. Evaluation of Information Risks of Transport Security [Otsenivanie informatsionnykh riskov transportnoy bezopasnosti]. In: *Professional Education, Science and Innovation in the XXI Century. Proceedings of the X St. Petersburg Congress [Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke: Sbornik trudov X Sankt-Peterburgskogo kongressa]*, St. Petersburg, Russia, November 21–25, 2016, Vol. 1. St. Peterburg, PSTU, 2016. Pp. 33–38.

10. Baranovsky A. M., Khomonenko A. D. Mathematical Assessment of Transport Safety Risks [Matematicheskoe otsenivanie riskov transportnoy bezopasnosti]. In: *Problems of Mathematical and Natural Science Training in Engineering Education: Proceedings of the IV International Scientific and Methodological Conference [Problemy matematicheskoy i estestvennonauchnoy podgotovki v inzhenernom obrazovanii: Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii]*, Saint Petersburg, Russia, November 03, 2016, Vol. 2. St. Petersburg, PSTU, 2017, Pp. 3–9.

11. Baranovskij A. M., Zaharova E. A. Model of Evaluating the Readiness of Complex Technical Systems Taking into Account the Indicators of Diagnosing Quality [Model' otsenivaniya gotovnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem s uchetom pokazateley kachestva diagnostirovaniya], *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy [Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhayskogo]*, 2019, Is. 669, Pp. 124–132.

12. Bochkov A. P., Baranovskii A. M., Gilvanov R. G. Assessment of Consistency and Compatibility of Technical Systems in Complex Organizational and Technical Systems [Otsenka soglasovannosti i sovmestimosti tekhnicheskikh sistem v sostave slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistem], *Systems of Control, Communication and Security [Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti]*, 2020, No. 1, Pp. 284–301. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109.

# Архитектура системы автоматизированного распознавания единиц подвижного состава

С. Е. Фролова, к.и.н. А. В. Забродин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

Санкт-Петербург, Россия

frolova.svetlana19@yandex.ru, zabrodin@pgups.ru

**Аннотация.** Рассмотрено решение задачи автоматизированного распознавания параметров единиц подвижного состава в режиме реального времени. Рассмотрены существующие системы распознавания номеров железнодорожных вагонов. Представлен анализ архитектур и краткий обзор существующих систем распознавания номеров железнодорожных вагонов: APCIS, SecurOS Transit, АСКИН, решение для ж.-д. транспорта на основе «Авто-Интеллекта». Проанализирована возможность внедрения существующих систем на предприятии. Выбрана архитектура автоматизированной системы для решения задачи по распознаванию основных идентификационных знаков единиц подвижного состава в режиме реального времени. Приведен пример реализации предлагаемой в статье архитектуры в виде диаграммы UML.

**Ключевые слова:** идентификация стандартных знаков грузовых вагонов, системы распознавания номеров железнодорожных вагонов, знаки и надписи на вагонах.

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня важным аспектом эффективности использования железнодорожного транспорта и контроля его состояния является идентификация вагонов подвижного состава (ПС) по инвентарному номеру. Основная проблема оптимизации производственных процессов на станции заключается в том, что процесс контроля передвижения объектов подвижного состава железнодорожного транспорта, включая идентификацию, на станции его обработки не автоматизирован [1]. Контролем подвижного состава на сегодняшний день занимаются сотни сотрудников ОАО «РЖД», обеспечивающих соответствующие производственно-технологические процессы (осмотрщик вагонов по единому тарифно-квалификационному справочнику [2]). Ввиду того, что осмотр вагонов осуществляется вручную, на конечные операции с вагоном тратится большое количество времени, и этот процесс является экономически затратным.

Очевидным способом значительно ускорить и удешевить процесс осмотра вагонов подвижного состава является разработка автоматизированных систем идентификации вагонов и распознавания трафаретов, нанесенных на вагон. Распознавание параметров единиц ПС является актуальным, поскольку с каждым днем увеличивается потребность автоматизации контроля въезда на территорию объектов и снижения влияния человеческого фактора. В связи с этим возникает задача автоматизированного распознавания параметров единиц ПС в режиме реального времени, решение которой возможно осуществить с помощью нейронных сетей.

Целью разработки программного комплекса является распознавание не только номера вагона, но и таких пара-

метров единиц ПС, как знак калибровки котла, код администрации и пр.

В статье представлена архитектура, выбранная для решения задачи по автоматизированному распознаванию основных идентификационных знаков единиц ПС в режиме реального времени на основе использования нейронных сетей, а также представлен анализ существующих систем распознавания номеров железнодорожных вагонов.

## АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

На каждый вагон в подвижном составе наносятся несколько основных трафаретов: номер вагона, знак калибровки котла, кодовый номер ж.-д. администрации, грузоподъемность и др. Знаки и надписи, предусмотренные альбомом «Знаки и надписи на вагонах грузового парка колеи 1520 мм», должны наноситься на все типы грузовых вагонов колеи 1520 мм любой формы собственности, имеющих право выхода на пути общего пользования [3]. Основным трафаретом, наносимым на грузовой вагон, является инвентарный номер. Это вызвано тем, что уникальный инвентарный номер, который присваивается вагону, может рассказать его основные характеристики и обеспечивает кодовую защиту достоверности считывания номера вагона. Именно решению задачи распознавания основных трафаретов посвящена настоящая статья.

Рассмотрим положение дел с идентификацией вагона и распознаванием трафаретов, наносимых на вагон, на примере APCIS (ARSCIS). Это семейство решений по идентификации вагонов, управлению отгрузкой продукции ж.-д. транспортом, коммерческому осмотру вагонов, контролю передвижения и местонахождения вагонов, построенное на платформе системы распознавания номеров вагонов и решающее задачи служб метрологии, логистики и безопасности [4].

Представленное программное средство распознавания позволяет решать большой комплекс задач: идентификация каждого вагона в подвижном составе по инвентарному номеру, отслеживание местоположения вагонов, осмотр вагонов без присутствия персонала на ж.-д. путях, контроль дислокации и перемещения вагонов и многое другое [4].

Также на рынке представлена система распознавания номеров железнодорожных вагонов SecurOS Transit [5]. Система интеллектуального видеоанализа SecurOS Transit обеспечивает автоматизацию процесса регистрации и контроля передвижения объектов подвижного состава (вагонов, цистерн и платформ) железных дорог [5].

Функционал системы позволяет также эффективно решать целый ряд рутинных задач, связанных с идентификацией вагонов, контролем перевозок и состояния грузов, при этом зна-

чительно увеличивает скорость получения и обработки данных [5]. Внедрение такой системы позволит решить задачу идентификации вагона по инвентарному номеру.

Кроме этого, существует решение по идентификации вагонов подвижного состава от ведущего российского разработчика программного обеспечения для интеллектуальных интегрированных систем безопасности и видеонаблюдения ITV [6].

Решение для железнодорожного транспорта на основе «Авто-Интеллекта» автоматически распознает номера пассажирских и грузовых железнодорожных вагонов по видеоизображению, определяет направление движения, ведет подсчет вагонов в составе и вносит полученные данные, синхронизированные с видеозаписью, в базу данных [7]. Система позволяет получить по каждому железнодорожному вагону отчет, содержащий время прохождения поста контроля, название поста и связанные видеокдры [7]. Таким образом обеспечивается надежный контроль оборота подвижного состава на выбранном маршруте или на территории предприятия [7].

Последней в статье рассмотрена система, разработанная АО «Альфа-Прибор», — автоматизированная система контроля инвентарных номеров вагонов (АСКИН) [8]. Основными направлениями деятельности компании являются: разработка и поставка широкого спектра продукции и готовых отраслевых решений, предназначенных для использования в сфере обеспечения безопасности и охраны объектов; разработка и поставка продукции, предназначенной для использования в сфере обеспечения безопасности и автоматизации технологических процессов на железнодорожном транспорте и др. [8].

Система АСКИН предназначена для автоматического считывания номеров вагонов прибывающих или отправляющихся составов, их распознавания, формирования справки и передачи ее в АСУ станции, где результаты распознавания проверяются на соответствие телеграмме — натурному листу (ТНЛ) поезда, либо иным справочным данным, применяемым на территории предприятия [8].

Можно заметить, что все рассмотренные в статье программные средства распознавания позволяют решать большой комплекс задач, связанных с контролем подвижного состава и дистанционным управлением железнодорожными грузоперевозками. Однако они не пригодны для задачи рас-

познавания других параметров вагона, а именно трафаретов: знак калибровки котла, кодовый номер ж.-д. администрации и грузоподъемность. Так как разрабатываемая автоматизированная система является подобным программным обеспечением, только с расширенным функционалом, имеет смысл рассмотреть архитектуры существующих систем распознавания номеров железнодорожных вагонов.

В статье представлен краткий обзор существующих систем распознавания номеров железнодорожных вагонов:

- 1) АРСИС;
- 2) SecurOS Transit;
- 3) решение для ж.-д. транспорта на основе «Авто-Интеллекта»;
- 4) АСКИН.

Рассмотрим архитектуры этих систем.

1. АРСИС — это решение, представленное компанией «Малленом Системс» [9]. Архитектура данной системы, представленная на рисунке 1, включает в себя камеры, прожекторы, датчики колесных пар, шкаф АРСИС, сервер и автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора [4, 9].

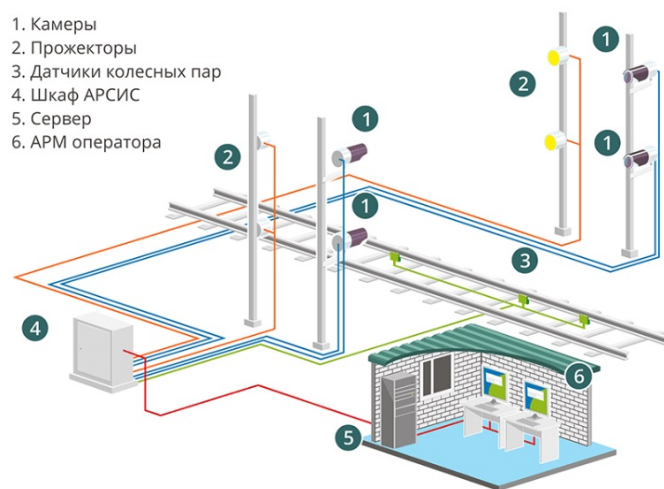


Рис. 1. Состав системы распознавания номеров АРСИС

2. SecurOS Transit — решение от компании ISS [10]. В состав системы входят камеры фиксации, обзорная камера, видеосервер, базы данных (БД) и АРМ оператора. Возможный вариант архитектуры представлен на рисунке 2 [5, 10].



Рис. 2. Архитектура SecurOS Transit

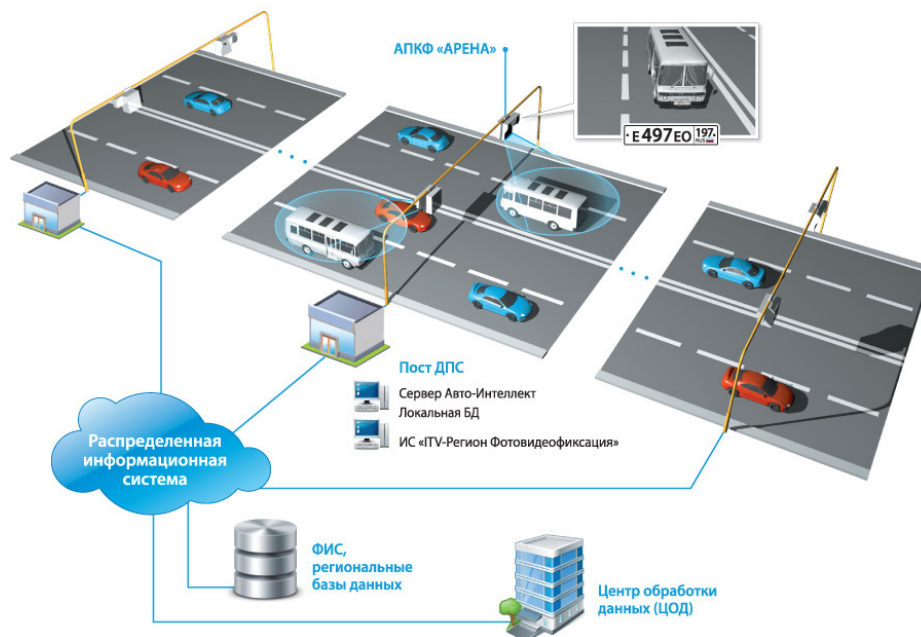


Рис. 3. Вариант структуры системы «Авто-Интеллект»



Рис. 4. Структура АСКИН

3. Решение для железнодорожного транспорта на основе «Авто-Интеллекта» от разработчика программного обеспечения ITV [6, 7]. В единую систему может быть объединено неограниченное количество видеокамер, серверов хранения и обработки данных, а также автоматизированных рабочих мест оператора (рис. 3) [7].

4. АСКИН обеспечивает формирование видеоизображений, содержащих инвентарные номера вагонов, распознавание восьмизначных инвентарных номеров вагонов по сформированным видеоизображениям, формирование номерного списка вагонов поезда и многое другое [8]. В состав системы АСКИН входят: напольное оборудование постов считывания (ПСЧ); подсистема телевизионного наблюдения; подсистема освещения; подсистема счета вагонов; подсистема передачи информации; сервер распознавания (рис. 4) [11].

Сравнительный анализ архитектур рассмотренных программных средств распознавания инвентарных номеров грузовых вагонов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Состав средств распознавания инвентарных номеров грузовых вагонов

Системы распознавания			
АРСИС	SecureOS Transit	«Авто-Интеллект»	АСКИН
Камеры Прожекторы Датчики	Камеры фиксации Обзорная камера	Видеокамеры	ПСЧ
Шкаф АРСИС	БД	Сервер хранения	Сервер распознавания
Сервер	Видеосервер	Сервер обработки данных	
АРМ	АРМ	АРМ	АРМ

Можно заметить, что общая структура архитектур систем по распознаванию образов очень схожа и позволяет распознавать идентификационные номера вагонов с высокой точностью, однако функционал программного обеспечения имеет ограниченные возможности.

АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПО РАСПОЗНАВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЕДИНИЦ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Имеется возможность доработать все рассмотренные программные средства так, чтобы распознавать не только номер вагона, однако возникает ряд трудностей.

Во-первых, часть систем поставляется «под ключ»: ими можно пользоваться, но нельзя доработать, поскольку нет прав на это. Заниматься доработкой (модификацией) могут

только либо правообладатель, либо лицо, уполномоченное правообладателем на изменение и модификацию (получившее соответствующие права). Все предлагаемые системы закрыты и нет возможности для бесплатной модификации.

Во-вторых, в процессе интеграции нового ПО будут проблемы, связанные с совместимостью. Каждая система обладает своей структурой и при внедрении нового ПО это необходимо учитывать. Для удачного внедрения скорее необходимо будет либо изменить существующую структуру бизнес-процессов или структуру информационного обмена (документооборот) на предприятии, либо разрабатывать интерфейсы взаимодействия программ.

В-третьих, одним из этапов внедрения является сопровождение. Для того чтобы осуществлять сопровождение стороннего ПО на своем предприятии, необходимо постоянно нанимать администратора программного комплекса или заключать договор с фирмой-разработчиком, которая будет предоставлять сотрудника для решения технических проблем. Также имеется риск того, что компания может обанкротиться или прекратить поддержку ПО.

Есть еще один момент — избыточность функционала в существующих системах. Функционал программ зачастую является избыточным и требует дополнительных ресурсов для действий, которые могут оказаться ненужными. С целью экономии финансовых средств очень важно, чтобы функционал предоставляемого ПО соответствовал тому, который требуется на предприятии.

Основной сложностью будет являться обучение персонала для работы с новым ПО. До тех пор пока персонал не будет обучен, имеется достаточно большой риск возникновения ошибок. Также интерфейс может значительно отличаться от общекорпоративного, что вызовет дополнительные трудности в обучении. Кроме этого, даже незначительная ошибка в процессе работы может сказаться на безопасности движения железнодорожного транспорта в целом.

Опираясь на анализ архитектур существующих систем по распознаванию образов, можно сделать вывод о том, что структура разрабатываемой автоматизированной системы по распознаванию параметров единиц подвижного состава будет состоять из следующих компонентов: рамка с камерами, датчик движения, сервер с программой по распознаванию, а также АРМ пользователя.

Пример реализации модели «Автоматизированная система распознавания единиц подвижного состава» представлен с помощью диаграммы вариантов использования на рисунке 5.

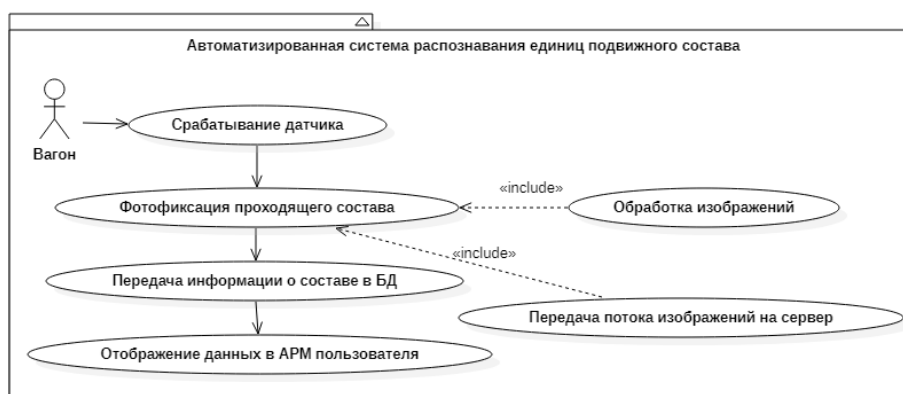


Рис. 5. Диаграмма вариантов использования

Работа системы осуществляется следующим образом: после срабатывания датчиков при прохождении состава через рамку с камерами происходит фотофиксация каждого вагона подвижного состава с нескольких ракурсов, далее все изображения передаются на сервер в режиме реального времени, где они хранятся и обрабатываются (распознаются доступные идентификационные знаки, имеющиеся на вагонах). После прохождения подвижного состава через рамку и обработки всех полученных изображений информация о составе передается в пользовательское автоматизированное рабочее место. Для пользователя доступна основная информация: дата и время распознавания, идентификационный номер, знак калибровки котла, код администрации и грузоподъемность.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены решение задачи автоматизированного распознавания параметров единиц подвижного состава в режиме реального времени, а также существующие системы распознавания номеров железнодорожных вагонов. Представлен анализ архитектур существующих систем распознавания номеров железнодорожных вагонов. Выбрана архитектура разрабатываемой системы. Приведен конкретный пример реализации предлагаемой в статье архитектуры с помощью средств языка программирования UML, а именно диаграммы вариантов использования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Веснин, Е. Распознавание номеров вагонов: принципы решения и приложение в промышленности / Е. Веснин, В. Царев, А. Михайлов // Control Engineering Россия. 2014. № 1 (49). С. 60–66.
2. Общероссийские классификаторы и справочники — Справочная система Etki.Info. URL: <http://etki.info> (дата обращения 17.01.2021).
3. 632-2011 ПКБ ЦВ. Знаки и надписи на вагонах грузового парка железных дорог колеи 1520 мм. Альбом-справочник: [Утвержден Советом по ж.-д. транспорту государств участников Содружества (протокол от 16-17.10.2012 № 57) с изм. и доп., утв. на 58-м, 59-м, 63-м,

70-м, 73-м заседаниях СЖТ СНГ (с внесенными изменениями по извещениям: 32 ЦВ 1-2013; 32 ЦВ 27-2013; 32 ЦВ 28-2013; 32 ЦВ 7-2019; 32 ЦВ 25-2019)] / Дирекция Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества. — 2012. — 63 с. URL: <http://myrailway.ru/directory/znaki-i-nadpisi-na-vagonah-gruzovogo-parka-kolei-1520-mm1> (дата обращения 10.01.2021).

4. APCIS (ARSCIS) // Mallenom Systems. URL: <http://www.mallenom.ru/products/videokontrol-i-uchet-zhd-transporta/arscis> (дата обращения 20.01.2021).

5. ISS SecurOS Transit — автоматизация процесса регистрации и контроля передвижения объектов подвижного состава (вагонов, цистерн и платформ) железных дорог // ISS — Интеллектуальные Системы Безопасности. URL: <http://iss.ru/products/secur-os-transit#overview> (дата обращения 21.01.2021).

6. ITV — системы безопасности и видеонаблюдения. URL: <http://www.itv.ru> (дата обращения 22.01.2021).

7. Распознавание номеров вагонов / ITV|AxxonSoft // «Авто-Интеллект» — система распознавания автомобильных номеров и обеспечения безопасности дорожного движения. URL: <http://www.itv.ru/products/intellect/autointellect/raspoznovaie-nomerov-vagonov.php> (дата обращения 23.01.2021).

8. Автоматизированная система контроля инвентарных номеров вагонов (АСКИН) // ОАО НПП «Альфа-Прибор». URL: <http://www.alfa-pribor.ru/products/automated-inspection-system/askin> (дата обращения: 24.01.2021).

9. Компания «Малленом Системс»: Системы технического зрения. Системы распознавания номеров. Системы моделирования. URL: <https://www.mallenom.ru> (дата обращения 15.01.2021).

10. ISS — Интеллектуальные Системы Безопасности. URL: <http://iss.ru> (дата обращения 17.01.2021).

11. АСКИН — автоматизированная система контроля инвентарных номеров вагонов. URL: <http://www.alfa-pribor.ru/pdf%20files/askin.pdf> (дата обращения 27.01.2021).

# The Architecture of the System of Automated Recognition of Rolling Stock Units

S. E. Frolova, PhD A. V. Zabrodin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Saint Petersburg, Russia

frolova.svetlana19@yandex.ru, zabrodin@pgups.ru

**Abstract.** The article considers the solution of the problem of automated recognition of the parameters of rolling stock units in real time. The existing systems for recognition of numbers of railway cars are considered. An analysis of the architectures of existing systems for recognizing numbers of railway cars is presented: ARSIS, SecurOS Transit, ASKIN, a solution for railway transport based on «Auto-Intelligence». The possibility of introducing existing systems to an enterprise has been analyzed. The architecture of an automated system is chosen to solve the problem of recognizing the main identification marks of rolling stock units in real time. A specific example of the implementation of the architecture proposed in the article in the form of a UML diagram is given.

**Keywords:** identification of standard signs of freight cars, recognition systems for numbers of railway cars, signs and inscriptions on railway cars.

## REFERENCES

1. Vesnin E., Tsarev V., Mikhailov A. Recognition of Wagon Numbers: Solution Principles and Application in Industry [Raspoznavanie numerov vagonov: printsipy resheniya i prilozhenie v promyshlennosti], *Control Engineering Russia [Control Engineering Rossiya]*, 2014, No. 1 (49), Pp. 60–66.
2. All-Russian Classifiers and Reference Books — Reference System EtkS.Info [Obshcherossiyskie klassifikatory i spravochniki — Spravochnaya sistema EtkS.Info.]. Available at: <http://etks.info> (accessed 17 Jan 2021).
3. 632-2011 PKB TsV. Signs and inscriptions on the wagons of the freight fleet of 1520 mm gauge railways. Reference album [632-2011 PKB TsV. Znaki i nadpisi na vagonakh gruzovogo parka zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Al'bom-spravochnik]. 2012, 63 p. Available at: <http://myrailway.ru/directory/znaki-i-nadpisi-na-vagonah-gruzovogo-parka-kolei-1520-mm1> (accessed 10 Jan 2021).
4. ARSCIS, *Mallenom Systems*. Available at: <http://www.mallenom.ru/products/videokontrol-i-uchet-zhd-transporta/arscis> (accessed 20 Jan 2021).
5. ISS SecurOS Transit — video analytic tools for registration of railway vehicles [ISS SecurOS Transit — avtomatizatsiya protsessa registratsii i kontrolya peredvizheniya ob'ektov podvizhnogo sostava (vagonov, tsistem i platform) zheleznykh dorog], *ISS — Intelligent Security Systems [ISS — Intellektualnyye sistemy bezopasnosti]*. Available at: <http://iss.ru/products/secur-os-transit#overview> (accessed 21 Jan 2021).
6. ITV — security and video surveillance systems [ITV — sistemy bezopasnosti i videonablyudeniya]. Available at: <http://www.itv.ru> (accessed 22 Jan 2021).
7. Recognition of wagon numbers [Raspoznavaniye numerov vagonov], *ITV|AxxonSoft*. Available at: <http://www.itv.ru/products/intellect/autointellect/raspoznovaie-numerov-vagonov.php> (accessed 23 Jan 2021).
8. Automated system for monitoring the inventory numbers of wagons (ASKIN) [Avtomatizirovannaya sistema kontrolya inventarnykh numerov vagonov (ASKIN)], *Research and Production Enterprise «Alfa-Pribor» JSC [OAO NPP «Alfa-Pribor»]*. Available at: <http://www.alfapribor.ru/products/automated-inspection-system/askin> (accessed 24 Jan 2021).
9. Mallenom Systems: Machine vision systems. ANPR and railcar number recognition systems. Computer modeling systems [Kompaniya «Mallenom Systems»: Sistemy tekhnicheskogo zreniya. Sistemy raspoznavaniya numerov. Sistemy modelirovaniya]. Available at: <http://www.mallenom.ru> (accessed 15 Jan 2021).
10. ISS — Intelligent Security Systems [ISS — Intellektualnyye sistemy bezopasnosti]. Available at: <http://iss.ru> (accessed 17 Jan 2021).
11. ASKIN — Automated system for monitoring the inventory numbers of wagons [ASKIN — avtomatizirovannaya sistema kontrolya inventarnykh numerov vagonov]. Available at: <http://www.alfapribor.ru/pdf%20files/askin.pdf> (accessed 27 Jan 2021).

# Симплициальные и мультиплициальные комплексы в мультимодальных транспортных системах

Д.э.н., к.т.н. П. В. Куренков

Российский университет транспорта (МИИТ)

Москва, Россия

petrkurenkov@mail.ru

**Аннотация.** Предложен Q-анализ, как инструментальный алгебраический топологии для моделирования и определения характеристик структуры мультимодальной транспортной системы как сложного многомерного геометрического образования, состоящего из множества симплициальных и мультиплициальных комплексов; построена модель топологии взаимодействия между субъектами транспортного рынка в системе мультимодальных перевозок, позволяющая в оперативной обстановке в нужной иерархии расположить те или иные мультиплициальные комплексы с целью выбора приоритетных для обеспечения устойчивого функционирования мультимодальной системы доставки внешнеторговых грузов.

**Ключевые слова:** элемент, поток, система, взаимодействие, доставка, вагон, груз, симплекс, мультиплекс, комплекс, топология.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач, определенных Транспортной стратегией РФ на период до 2030 года, является «отработка и внедрение высокоэффективных комплексных транспортно-логистических технологий, обеспечивающих интеграцию всех видов транспорта, грузоотправителей, грузовладельцев, грузополучателей и других участников транспортного процесса в единую технологически совместимую систему, интеллектуальное управление транспортно-логистическими процессами в цепях поставок товаров, а также снижение времени обработки партий грузов в терминальной логистической сети». Для решения этой задачи особую важность приобретает исследование и моделирование топологии мультимодальных систем внешнеторговых перевозок с применением методов мультиагентной самоорганизации, многоуровневой декомпозиции и структурной (или конкурентной) логики.

Важным фактором при управлении внешнеторговыми перевозками является наличие информации о: работе морских портов; заполнении складов; наличии судов на подходах, на рейдах и на причалах портов; погрузке экспортных грузов, в частности угля, черных металлов и т. д.; следовании поездов с выделенными грузами в адрес портов. Причем важна информация о дислокации и продвижении внешнеторговых грузопотоков по конкретным контрактам в режиме реального времени. Для эффективной организации внешнеторговых перевозок необходим структурный и топологический анализ взаимодействия между грузоотправителями, грузополучателями, грузовладельцами, администрациями железных дорог, таможенными и сертификационными органами, а также другими субъектами транспортного рынка в системе мультимодальных перевозок.

За последние десятилетия становится все более и более очевидным, что традиционные научные подходы не эффективны по отношению к широкому диапазону систем в самых разнообразных областях. Это и физические системы, встречающиеся в физике, химии, биологии; социальные системы, встречающиеся в психологии, социологии и политике; искусственные системы, встречающиеся в технике, промышленности и дизайне; логистические системы, с которыми сталкиваются на транспорте, в экономике и в самой логистике.

Так или иначе, эти системы при исследовании «слишком сложны» для обычных и широко известных подходов. Как это ни парадоксально, но не существует общепринятого удовлетворительного определения того, что означает «сложная система».

Поэтому очень важным для повышения эффективности функционирования мультимодальных систем внешнеторговых перевозок является исследование и моделирование их топологической структуры с применением методов мультиагентной самоорганизации, многоуровневой декомпозиции и структурной (или конкурентной) логики.

**Основные элементы научной новизны** заключаются в следующем:

1) предложен Q-анализ, как инструментальный алгебраический топологии для моделирования и определения характеристик структуры мультимодальной транспортной системы как сложного многомерного геометрического образования, состоящего из множества симплициальных и мультиплициальных комплексов;

2) построенная модель топологии взаимодействия между субъектами транспортного рынка в системе мультимодальных перевозок позволяет в сложившейся оперативной обстановке в нужной иерархии расположить те или иные мультиплициальные комплексы с целью выбора приоритетных для обеспечения устойчивого функционирования мультимодальной системы доставки внешнеторговых грузов.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

Мультимодальные (смешанные) перевозки — это современная транспортная технология, обеспечивающая высокое качество и эффективность перевозок за счет максимизации преимуществ каждого вида транспорта, участвующего в перевозке грузов. Маршруты следования осуществляются по единому транспортному документу, под руководством единого оператора, действующего в качестве юридического лица в отношениях с грузовладельцами

и субподрядчиками, выполняющими перевозки, работы и услуги по договору с оператором. Каждый из отдельных видов транспорта со своими технико-технологическими особенностями имеет свое рациональное применение, и в условиях рыночной экономики возрастает конкуренция за перевозки. Поэтому требуются усилия по совершенствованию технических средств и технологий.

Это подтверждается опытом развития транспортных систем в странах ЕС и США. Основными видами наземного транспорта в странах ЕС являются железнодорожный и автомобильный транспорт, на долю которых приходится около 80 % внутреннего европейского грузооборота. За последние 25 лет грузооборот автомобильного транспорта в этом регионе увеличился почти в 2,5 раза, в то время как железнодорожный транспорт сократился на 23 %. Это говорит о том, что железные дороги теряют свои позиции на европейском рынке грузовых перевозок.

Основной причиной данного положения железнодорожного транспорта США является высокая производительность труда и относительно низкие железнодорожные тарифы. Обладая неоспоримыми преимуществами по энергопотреблению, безопасности движения, экологическим показателям и запасам пропускной способности, железные дороги уступают автомобильному транспорту по скорости доставки грузов и качеству обслуживания.

Тарифы на железнодорожные перевозки в несколько раз ниже, чем на автомобильном транспорте. Однако в отношении качества предоставляемых клиентам услуг этого недостаточно для успешной конкуренции на рынке перевозок.

В то же время опыт грузовых перевозок в Западной Европе показывает, что резкий рост автомобильного транспорта ухудшает эксплуатационную обстановку на автомагистралях и пограничных переходах, а также оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Объединение этих двух основных видов наземного транспорта (железнодорожного и автомобильного) в единый транспортный трубопровод, превращение их из конкурентов в союзников и дает транспортной отрасли возможность работать эффективнее.

Одной из самых современных технологий, направленных на реализацию этих принципов, является комбинированная транспортная система. Эффективность этой системы подтверждается опытом США по реализации контейнерных перевозок по схеме «вагон — поезд — вагон» с установкой их на железнодорожные платформы в два яруса. Именно применение этой системы способствовало повышению производительности труда и эффективности перевозок на американских железных дорогах. Комбинированные перевозки «магистраль — железная дорога — шоссе» в настоящий момент стали неперенным атрибутом транспортной инфраструктуры, так как в условиях интенсивного движения по дорогам европейских стран они позволяют, помимо повышения эффективности перевозок, разгрузить автомобильные магистрали и ограничить негативное воздействие грузовых автомобилей на экологию.

В целом, необходимость применения системы смешанных (мультимодальных) перевозок диктуется большими расстояниями и географическими особенностями перевозок. Например, чтобы доставить груз из Америки в Казахстан, необходимо перевезти его морским транспортом по воде, затем по суше по железной дороге и автомобильным транспортом, то есть использовать мультимодальные перевозки. В соответствии с рыночными реформами отправители могут выбирать между различными видами транспорта. Мультимодальные перевозки сочетают в себе сильные стороны разнообразных видов транспорта, сводя к минимуму негативные аспекты.

ПРИМЕНЕНИЕ Q-АНАЛИЗА ДЛЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕТОРГОВЫХ ПЕРЕВОЗОК

Возможные схемы взаимодействия между субъектами рынка транспортных услуг (РТУ) и различными видами транспорта при внешнеторговых перевозках в смешанных сообщениях приведены на рисунке 1.

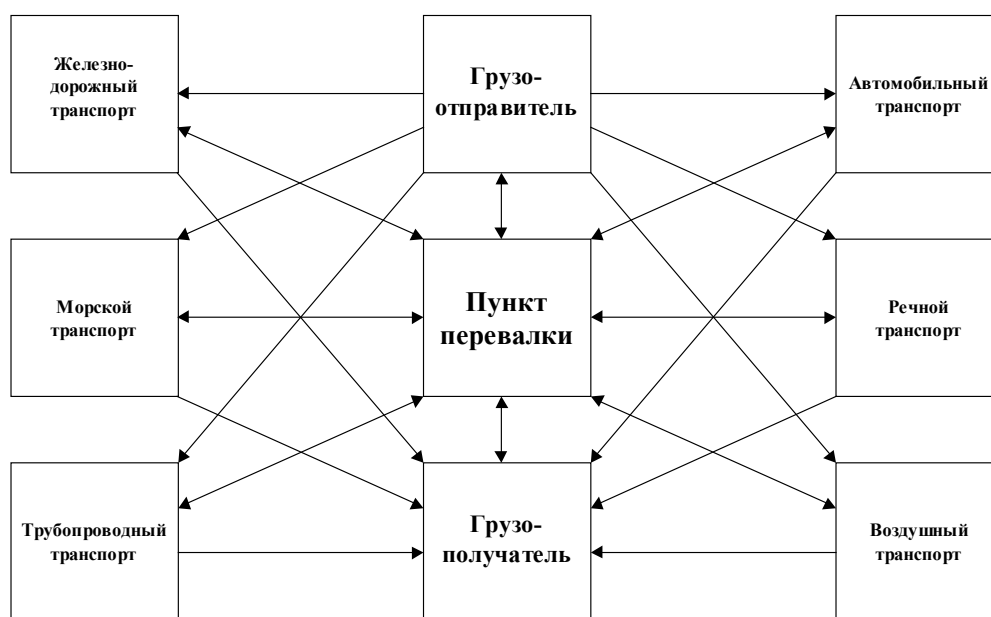
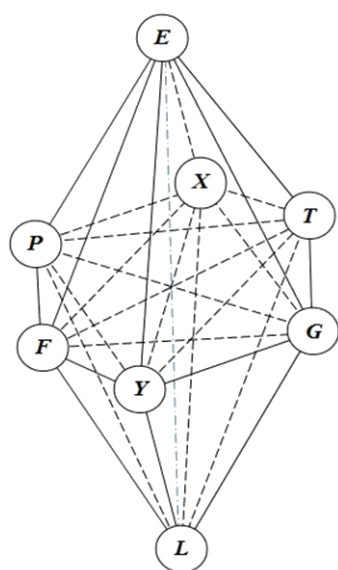


Рис. 1. Схемы взаимодействия различных видов транспорта и субъектов РТУ в системе смешанных сообщений

Помимо комплексного, системного или, как сейчас принято называть, логистического подхода к управлению транспортными, грузовыми, информационными, финансовыми и людскими потоками при определенных правовых связях между

субъектами должен быть учтен каждый параметр, характеризующий перемещение транспортных и грузовых единиц.

На рисунке 2 изображена структура логистической системы доставки грузов (ЛСДГ), вершинами которой являются ее элементы, потоки различных типов.



Условные обозначения:

- $X$  — элементы;
- $T$  — транспортные потоки (потоки подвижного состава);
- $G$  — грузовые потоки (потоки товарной массы);
- $Y$  — информационные потоки;
- $F$  — финансовые потоки;
- $P$  — правовая база;
- $E$  — энергетические потоки;
- $L$  — людские потоки.

Рис. 2. Связь элементов и потоков в структуре ЛСДГ

Серьезным методологическим препятствием при исследовании многомерных систем является сложность подбора эффективного математического аппарата. Хорошо известны различные математические инструментариумы для исследования [1–5]: теория графов, кластерный анализ, теория катастроф, теория взаимодействующих процессов и др.

Как отмечается рядом исследователей, одним из перспективных математических методов исследования структурно сложных систем является Q-анализ. Q-анализ — это соединение классических идей комбинаторной топологии и новых понятий связности, паттернов и препятствий, в рамках которой может быть исследован широкий класс задач, связанных с глобальными системами.

Техника Q-анализа берет свое начало в работах Р. Эткина и Дж. Касти [3, 6] и впоследствии получила широкое применение для математического моделирования самых разнообразных систем, например:

- модели функционирования действующей структуры налоговых органов;
- модели ментального восприятия и построения персональных образов (концепций) в психологическом пространстве;
- модели состояния водных экосистем;
- когнитивные модели сложных систем;
- модели управления территориальной рекреационной системой;
- модели развития региональных социально-экономических систем;
- модели управления технологическими процессами углеобогатительной фабрики;
- модели анализа структурной связности электроэнергетических систем.

Большой вклад в развитие теории q-анализа внесли работы [1–7]; следует отметить также работу [8], содержащую описание алгоритмов комбинаторной топологии, применимые при решении задач q-анализа.

Опишем кратко сущность Q-анализа, следуя [1–7]. Поскольку в социально-экономической сфере многосторонние, или мультиплексные связи играют большую роль, чем односторонние или двусторонние, важное значение имеют средства, позволяющие детально исследовать такие связи, в частности при взаимодействии множества потоков (одного или разных видов). Наличие двусторонней связи между объектами  $z_1$  и  $z_2$  изображается линией между точками, представляющими эти объекты, или в виде обозначения  $\langle z_1, z_2 \rangle$ . Это хорошо известная концепция теории графов. Множество связей такого вида образует граф. Трехсторонняя связь между объектами  $z_1, z_2$  и  $z_3$  может быть изображена треугольником с вершинами, представляющими эти объекты, или также в виде обозначения  $\langle z_1, z_2, z_3 \rangle$ . В общем случае запись  $\langle z_1, z_2, \dots, z_n \rangle$  используется для обозначения  $n$ -сторонней связи между объектами  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , что представляет собой многомерный аналог линии между точками (или, в более современной терминологии, ребра между вершинами) в графе — симплекс. Если рассматривается  $n$ -мерный симплекс, то он имеет  $n+1$  вершину. Одна точка образует 0-симплекс, отрезок образует 1-симплекс, треугольник образует 2-симплекс, тетраэдр — 3-симплекс и т. д. Множество симплексов образует симплицеальное семейство. Любое множество из  $q+1$  вершины симплекса образует  $q$ -мерную грань этого симплекса. Если в симплицеальном семействе вместе с каждым симплексом содержатся также все его грани меньших размерностей, образуется симплицеальный комплекс.

Размерностью симплициального комплекса считается наивысшая размерность входящего в него симплекса (рис. 3).

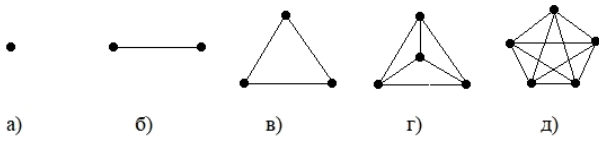


Рис. 3. Симплексы  
 а — 0-мерный; б — 1-мерный; в — 2-мерный;  
 г — 3-мерный; д — 4-мерный

Простейшим примером симплициального комплекса служит  $K_1 = (Z, S)$ , где  $Z$  — множество целых чисел,  $S = \{<n> | n \in Z\} \cup \{<n, n + 1> | n \in Z\}$ . Размерность симплициального комплекса  $K_1$  равна 1. Другой пример — симплициальный комплекс  $K_{1,n} = (Z_n, S)$ , где  $Z_n = \{1, 2, \dots, n\}$ , а  $S$  определяется аналогично (рис. 4).

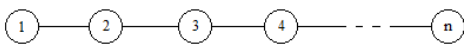


Рис. 4. Геометрическая реализация комплекса  $K_{1,n}$

Два симплекса  $S_1$  и  $S_2$  могут иметь общую грань  $G$ . Если  $G$  — наибольшая общая грань этих симплексов, то пишем  $G = S_1 \cap S_2$ , а сами симплексы  $S_1$  и  $S_2$  называем  $q$ -смежными. На рисунке 5 изображены 0-смежные (а), 1-смежные (б) и 2-смежные симплексы (в).

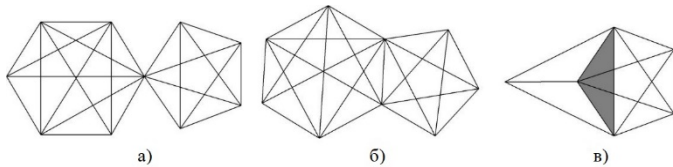


Рис. 5.  $q$ -смежные симплексы  
 а — с 1 общей вершиной; б — с 2 общими вершинами;  
 в — с 3 общими вершинами

Два симплекса  $S_i$  и  $S_j$  комплекса  $K = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  называются  **$q$ -связными**, если они соединены **цепью  $q$ -связи**, т. е. если существует последовательность симплексов  $S_i, S_k, S_l, \dots, S_j$  в  $K$  такая, что два последовательных симплекса обладают общей гранью размерности не менее  $q$ . На рисунке 6 изображены 0-связные (а) и 1-связные (б) симплексы.

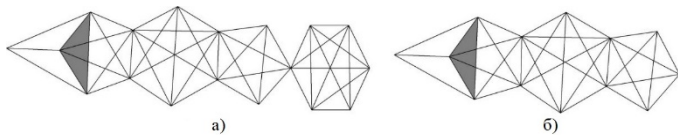


Рис. 6.  $q$ -связные симплексы  
 а — 0-связный; б — 1-связный

Понятие  $q$ -связности симплексов является отношением эквивалентности, и, таким образом, задача изучения глобальной структуры связности комплекса  $K$  сводится к рассмотрению классов эквивалентности  $q$ -связности. Если комплекс  $K$  имеет размерность  $n$ , то для каждого значения  $q = 0, 1, \dots, n$  можно определить число различных классов эквивалентности  $q$ -связности  $Q_q$  и составить **структурный вектор комплекса**  $Q = (Q_n, Q_{n-1}, \dots, Q_1, Q_0)$ .

Если между какими-либо множествами  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  и  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  установлено отношение  $\lambda$ , то оно определяет два симплициальных семейства и соответствующие им симплициальные комплексы. Отношение  $\lambda$  может быть представлено матрицей инцидентности  $\Lambda = (\lambda_{ij})$ ,  $\lambda_{ij} = 1$  при  $(a_i, b_j) \in \lambda$ ,  $\lambda_{ij} = 0$  при  $(a_i, b_j) \notin \lambda$ .

Матрица инцидентности  $\Lambda$  представляет собой булеву (0,1)-матрицу, изучение которой может производиться комбинаторными методами [3, 6, 7].

Переход от структуры отношений к симплициальному комплексу осуществляется через симплексы  $s_a = \langle b_{\alpha_0}, b_{\alpha_1}, \dots, b_{\alpha_p} \rangle$ , где  $b_{\alpha_j}$  — вершина симплекса  $s_a$ , если  $(a, b_{\alpha_j}) \in \lambda$ ; и симплициальное семейство

$$F_A(B, \lambda) = \{s_a | \text{для всех } a \in A\}.$$

Построенный на основе этого симплициального семейства симплициальный комплекс  $K_A(B, \lambda)$  состоит из всех симплексов и подсимплексов семейства.

Аналогично определяется через симплексы  $s_b = \langle a_{\beta_0}, a_{\beta_1}, \dots, a_{\beta_p} \rangle$ , где  $a_{\beta_i}$  — вершина симплекса  $s_b$ , если  $(b, a_{\beta_i}) \in \lambda^{-1}$ , или, что то же самое,  $(a_{\beta_i}, b) \in \lambda$ , симплициальное семейство

$$F_B(A, \lambda) = \{s_b | \text{для всех } b \in B\}$$

и соответствующий симплициальный комплекс  $K_B(A, \lambda)$ .

Симплициальной звездой вершины  $b$  называется подмножество симплициального комплекса  $K_A(B, \lambda)$ , в которое входят симплексы, содержащие заданную вершину  $b$ . С точки зрения структуры потоков, такие подкомплексы состоят из симплексов, соответствующих тем конфигурациям (объединениям), которые конкурируют между собой за заданную вершину.

Структурный  $Q$ -анализ основывается на предположении, что изменения в структуре потоков сложных систем могут передаваться только между  $q$ -смежными симплексами, распространяясь вдоль цепей  $q$ -связи, формируя тем самым  $q$ -трансмиссионные фронты трафика в сетях многомерных потоков (см. рис. 7).

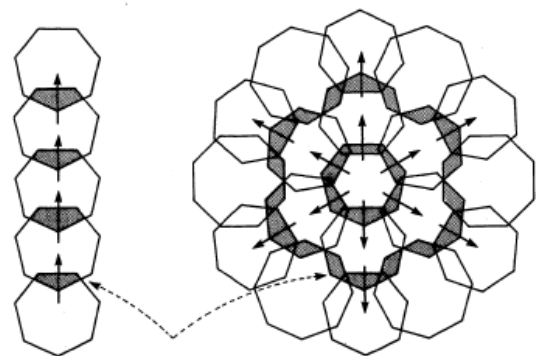


Рис. 7.  $q$ -трансмиссионные фронты  
 а — вдоль цепи  $q$ -связи;  
 б — радиальный от центрального симплекса

Типичная схема взаимодействия между информационными и финансовыми потоками приведена на рисунке 8.

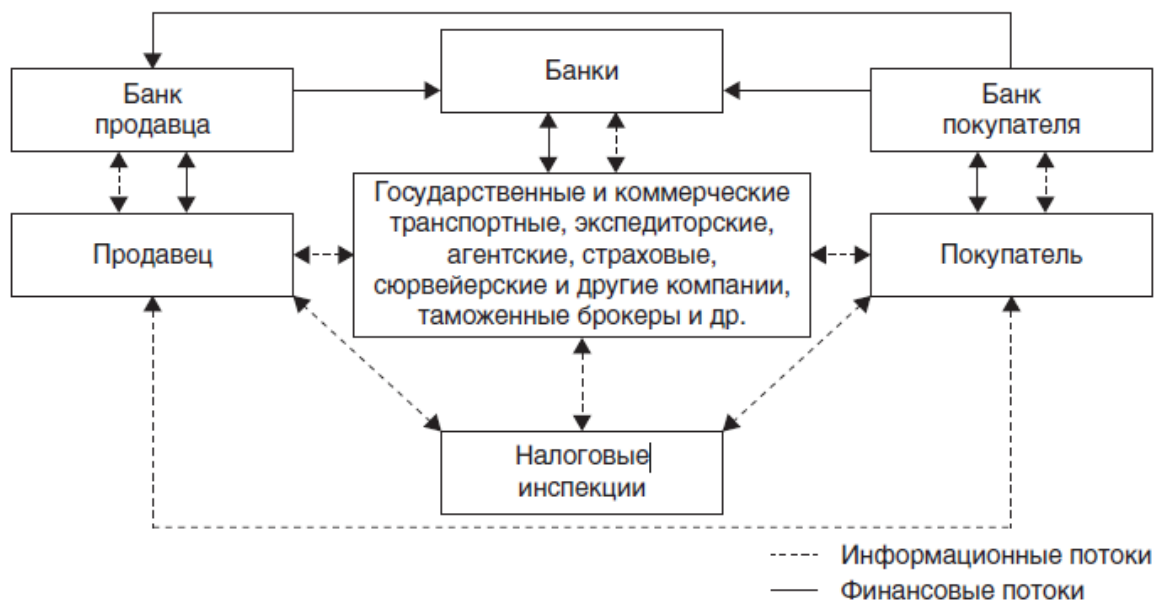


Рис. 8. Схема взаимодействия финансовых и информационных потоков

На этой схеме представлены 7 элементов. Таким образом, множество  $X = \{x_1 \text{ (банки)}, x_2 \text{ (банк продавца)}, x_3 \text{ (банк покупателя)}, x_4 \text{ (продавец)}, x_5 \text{ (покупатель)}, x_6 \text{ (компании, оказывающие транспортные услуги)}, x_7 \text{ (налоговые инспекции)}\}$ . Имеется 9 информационных потоков и 6 финансовых потоков, т. е.  $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9\}$ ,  $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$ . Между множествами элементов и потоков  $X, Y, F$  имеются многосторонние (мультиагентные и мультиплексные) отношения  $\lambda_Y^X, \lambda_X^Y, \lambda_F^Y, \lambda_Y^F, \lambda_X^F, \lambda_F^X$ . Отношения  $\lambda_Y^X, \lambda_X^Y, \lambda_F^Y, \lambda_Y^F, \lambda_X^F, \lambda_F^X$  представляются матрицами инцидентности  $\Lambda_Y^X, \Lambda_X^Y, \Lambda_F^Y, \Lambda_Y^F, \Lambda_X^F, \Lambda_F^X$ , которые отображены в таблицах 1–3 (пустые клетки соответствуют значению 0).

Таблица 3

Матрица инцидентности  $\Lambda_F^Y$

$\Lambda_F^Y$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$
$f_1$	1	1							
$f_2$	1		1						
$f_3$		1	1						
$f_4$	1			1	1				1
$f_5$		1		1		1	1		
$f_6$			1		1	1		1	

Таким образом, комплексы  $K_Y(X, \lambda)$  и  $K_F(X, \lambda)$  одномерны и представляют собой графы (диаграммы), изображенные на рисунке 9; в то время как комплекс  $K_F(Y, \lambda)$  имеет размерность 3 и, кроме трех 1-мерных симплексов, содержит три 3-мерных симплекса:  $f_4 = \langle y_1, y_4, y_5, y_9 \rangle$ ,  $f_5 = \langle y_2, y_4, y_6, y_7 \rangle$ ,  $f_6 = \langle y_3, y_5, y_6, y_8 \rangle$ .

Каждый симплекс в этом случае отображает информационную нагрузку конкретного финансового потока и содержит в себе те информационные потоки, которые непосредственно связаны с данным финансовым потоком через те или иные элементы. Весь комплекс изображен на рисунке 9.

Матрица инцидентности  $\Lambda_Y^X$

$\Lambda_Y^X$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
$y_1$	1					1	
$y_2$		1		1			
$y_3$			1		1		
$y_4$				1		1	
$y_5$					1	1	
$y_6$				1	1		
$y_7$				1			1
$y_8$					1		1
$y_9$						1	1

Таблица 1

Матрица инцидентности  $\Lambda_F^X$

$\Lambda_F^X$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
$f_1$	1	1					
$f_2$	1		1				
$f_3$		1	1				
$f_4$	1					1	
$f_5$		1		1			
$f_6$			1		1		

Таблица 2

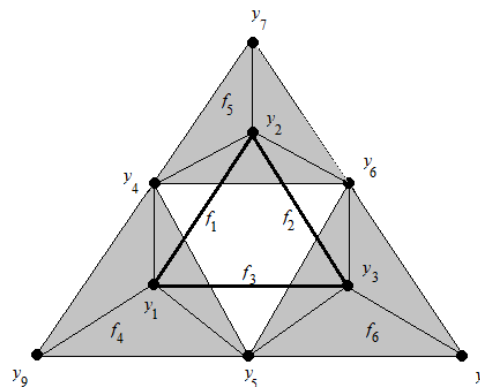


Рис. 9. Симплициальный комплекс  $K_F(Y, \lambda)$ : три ребра —  $f_1, f_2, f_3$  и три тетраэдра —  $f_4, f_5, f_6$

Проведем анализ связности. Помимо структурного вектора  $Q = (3, 3, 3, 1)$  комплекса  $K_F(Y, \lambda)$ , важной характеристикой является эксцентриситет, определяющий степень интегрированности каждого отдельного симплекса в структуре всего комплекса. Эксцентриситет симплекса  $S$  вычисляется по формуле:

$$e(S) = \frac{d(S) - q(S)}{q(S) + 1},$$

где  $d(S)$  — размерность симплекса  $S$ ,  $q(S)$  — наибольшее значение  $q$ , при котором симплекс  $S$  становится связанным с каким-либо другим симплексом из  $K$ . Поскольку в рассматриваемом комплексе имеются лишь цепи 0-связи, значение  $q(S)$  для любого симплекса  $S$  равно 0 (см. табл. 4).

Таблица 4

Характеристики симплексов комплекса  $A_F^Y$

Симплекс $S$	$d(S)$	$q(S)$	$e(S)$
$f_1$	1	0	1
$f_2$	1	0	1
$f_3$	1	0	1
$f_4$	3	0	3
$f_5$	3	0	3
$f_6$	3	0	3

Ненулевые значения эксцентриситетов, наряду с очевидными из анализа рисунка 9 дырами в комплексе  $A_F^Y$ , образованными 1-мерными циклами  $(y_1, y_2, y_3)$ ,  $(y_1, y_2, y_4)$ ,  $(y_1, y_3, y_5)$ ,  $(y_2, y_3, y_6)$ ,  $(y_4, y_5, y_6)$ , указывают на несбалансированность и высокую степень эксцентричности финансовых потоков по отношению к информационным.

Для объяснения работы логистики перевозок открывается новая отрасль и направление науки — топология, которая находится за пределами функций 2PL-, 3PL-, 4PL-, 5PL-, 6PL-, 7PL-провайдеров, то есть является новым измерением логистики — 3D-логистикой, в отличие от плоской, матричной логистики со всем известной Транспортной задачей, Теорией массового обслуживания, Имитационным моделированием, методами линейного и динамического программирования и т. д. и т. п.

АНАЛИЗ СВЯЗНОСТИ МУЛЬТИПЛИЦИАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ВНЕШНЕТОРГОВЫХ ПЕРЕВОЗОК

Каждое из множеств  $X, T, G, Y, F, E, P$  и  $L$  может быть описано более детально как объединение других множеств. В частности, из элементов можно выделить следующие подмножества элементов однородного типа [1–9]: угледобывающие предприятия; станции, на которых формируются грузовые потоки; транзитные ж.-д. станции проследования и переработки вагонопотоков; морские порты — своеобразные перекрестья, в которых фокусируются разнообразные интересы субъектов РТУ, а также стыкуются и взаимодействуют различные типы потоков и правовых связей; грузовладельцы и другие субъекты транспортного рынка, приведенные в [10, 11]; внешнеторговые грузы различных наименований согласно существующей номенклатуре.

Проведем анализ связности применительно к системе, охватывающей трафик внешнеторговых грузов через припортовые ж.-д. станции и порты Дальнего Востока в 2018–2019 гг., для чего симплексы припортовых станций обозначим буквами  $S$ , а следующие в направлении этих станций грузы — буквами  $G$  (см. табл. 5). Подробнее рассмотрим подсистемы, включающие в себя номенклатурную группу грузов «уголь каменный».

Для исследуемой системы построим матрицу трафика (табл. 6) через припортовые ж.-д. станции различных категорий грузов. Источником информации являются справки об объемах перевозок внешнеторговых грузов через порты Дальнего Востока в 2018 г. и в 2019 г. Центральной дирекции управления движением ОАО «РЖД».

Таблица 5

Обозначения симплексов станций назначения и грузов

Станции назначения	Симплекс	Виды грузов	Симплекс
Находка-Восточная	S1	Уголь	G1
Находка	S2	Кокс	G2
Мыс Астафьева	S3	Нефть	G3
Рыбники	S4	Руда	G4
Крабовая	S5	Чермет	G5
Владивосток	S6	Цветмет	G6
Мыс Чуркин	S7	Удобрения	G7
Гайдамак	S8	Лес	G8
Хмыловский	S9	Химия	G9
Посьет	S10	Зерно	G10
Блюхер	S11	Бумага	G11
Сухановка	S12	Импорт	G12
Ванино	S13	Транзит	G13
Сов. Гавань	S14		

Затем преобразуем матрицу трафика в матрицу инцидентий (табл. 7), являющуюся булевой (0,1)-матрицей, в которой наличие трафика соответствует элементу 1, отсутствие трафика — элементу 0 (подчеркнутые элементы во второй матрице соответствуют измененным значениям в 2019 г. по сравнению с 2018 г.). Тем самым устанавливается связь в виде реально имеющихся грузовых (а также информационных, финансовых и правовых) потоков. Далее проводится Q-анализ связности согласно методу, приведенному в [12–15], по данным за 2018 г. и за 4 месяца 2019 г. порядком, аналогичным описанному в работе [16].

Трафик через припортовые железнодорожные станции различных категорий грузов, тыс. т

2018 г.		Уголь	Кокс	Нефть	Руда	Чер-мет	Цвет-мет	Удобр.	Лес	Химия	Зерно	Бумага	Им-порт	Тран-зит
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
Находка-Восточная	S1	21 512,7		239,8	1,1	87,8	236,0	0,0	278,5	125,4	0,4	217,4	1 292,4	0,0
Находка	S2	2 855,4					422,7		115,7				28,2	0,0
Мыс Астафьева	S3	996,6	115,5			3 461,6	79,0	42,8	59,5				8,3	0,0
Рыбники	S4	490,0			27,1	5,9	6,1	5,5	221,5	8,8			159,7	0,0
Крабовая	S5			4 609,6										
Владивосток	S6		549,9		3,5	1 069,9	0,0		161,2	100,9	15,0	243,6	1 187,7	0,0
Мыс Чуркин	S7	804,9			21,1	158,0			52,8				58,9	0,0
Гайдамак	S8												1,1	0,0
Хмыловский	S9			15 093,9										
Посъет	S10	4 484,3												
Блюхер	S11			813,6					27,2					
Сухановка	S12												55,2	0,0
Ванино	S13	13 088,4		1 987,0		180,0	126,6		345,8				1 307,0	0,0
Сов. Гавань	S14	15,4			60,3								0,1	
4 мес. 2019 г.		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
Находка-Восточная	S1	7 045,3		211,1	0,5	41,0	70,3		163,5	39,6	0,3	102,1	463,6	118,1
Находка	S2	1 417,6					91,7		54,2				10,7	3,6
Мыс Астафьева	S3	706,0	7,2			1 173,4	12,1	0,0	45,0				2,4	4,8
Рыбники	S4	119,1			46,6	34,8			7,7	0,0			54,0	8,5
Крабовая	S5			1 395,8										
Владивосток	S6		143,6		0,3	127,7			46,4	42,4	0,0	81,9	451,8	6,6
Мыс Чуркин	S7	415,7	3,0		5,3	52,4			18,0				57,9	3,4
Гайдамак	S8												0,0	
Хмыловский	S9			1 000,4										
Посъет	S10	1 319,1												
Блюхер	S11			322,6					11,3					
Сухановка	S12												2,0	1,1
Ванино	S13	5 620,3		489,5		243,3	19,9		16,8				330,4	0,0
Сов. Гавань	S14	5,2			5,0									

Таблица 7

Матрицы инцидентов, соответствующие внешнеторговому трафику (2018 г.)

		Уголь	Кокс	Нефть	Руда	Чер-мет	Цвет-мет	Удобр.	Лес	Хи-мия	Зерно	Бу-мага	Им-порт	Тран-зит
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
Находка-Восточная	S1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Находка	S2	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
Мыс Астафьева	S3	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
Рыбники	S4	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
Крабовая	S5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Владивосток	S6	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
Мыс Чуркин	S7	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
Гайдамак	S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Хмыловский	S9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Посъет	S10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Блюхер	S11	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Сухановка	S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Ванино	S13	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
Сов. Гавань	S14	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Таблица 8

Матрицы инцидентов, соответствующие внешнеторговому трафику (4 месяца 2019 г.)

		Уголь	Кокс	Нефть	Руда	Чер-мет	Цвет-мет	Удобр.	Лес	Хи-мия	Зерно	Бу-мага	Им-порт	Тран-зит
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
Находка-Восточная	S1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Находка	S2	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
Мыс Астафьева	S3	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
Рыбники	S4	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
Крабовая	S5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Владивосток	S6	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
Мыс Чуркин	S7	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
Гайдамак	S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Хмыловский	S9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Посъет	S10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Блюхер	S11	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Сухановка	S12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Ванино	S13	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0
Сов. Гавань	S14	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Таблица 9

Матрицы общих вершин для S-симплексов по состоянию на 2018 и 2019 гг.

		S-симплексы													
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
<b>2018</b>	<b>S1</b>	11	5	6	8	1	8	6	1	1	1	2	2	7	3
	<b>S2</b>	5	5	5	5	0	3	4	1	0	1	1	2	5	2
	<b>S3</b>	6	5	8	7	0	5	5	1	0	1	1	2	6	2
	<b>S4</b>	8	5	7	9	0	6	6	1	0	1	1	2	6	3
	<b>S5</b>	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
	<b>S6</b>	8	3	5	6	0	9	5	1	0	0	1	2	4	2
	<b>S7</b>	6	4	5	6	0	5	6	1	0	1	1	2	5	3
	<b>S8</b>	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	<b>S9</b>	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
	<b>S10</b>	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1
	<b>S11</b>	2	1	1	1	1	1	1	0	1	0	2	0	2	0
	<b>S12</b>	2	2	2	2	0	2	2	1	0	0	0	2	2	1
	<b>S13</b>	7	5	6	6	1	4	5	1	1	1	2	2	7	2
	<b>S14</b>	3	2	2	3	0	2	3	1	0	1	0	1	2	3
<b>2019</b>	<b>S1</b>	11	5	6	7	1	7	6	1	1	1	2	2	6	3
	<b>S2</b>	5	5	5	5	0	3	4	1	0	1	1	2	4	2
	<b>S3</b>	6	5	7	6	0	5	6	1	0	1	1	2	5	2
	<b>S4</b>	7	5	6	8	0	5	6	1	0	1	1	2	5	3
	<b>S5</b>	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
	<b>S6</b>	7	3	5	5	0	8	6	1	0	0	1	2	3	2
	<b>S7</b>	6	4	6	6	0	6	7	1	0	1	1	2	4	3
	<b>S8</b>	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	<b>S9</b>	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
	<b>S10</b>	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1
	<b>S11</b>	2	1	1	1	1	1	1	0	1	0	2	0	2	0
	<b>S12</b>	2	2	2	2	0	2	2	1	0	0	0	2	1	1
	<b>S13</b>	6	4	5	5	1	3	4	1	1	1	2	1	6	2
	<b>S14</b>	3	2	2	3	0	2	3	1	0	1	0	1	2	3

Матрицы общих вершин для G-симплексов по состоянию на 2018 и 2019 гг.

2018	G-симплексы												
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
G1	8	1	2	4	5	5	2	6	2	1	1	7	6
G2	1	2	0	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2
G3	2	0	5	1	2	2	0	3	1	1	1	2	2
G4	4	1	1	5	4	2	1	4	3	2	2	5	4
G5	5	2	2	4	6	4	2	6	3	2	2	6	6
G6	5	1	2	2	4	5	2	5	2	1	1	5	5
G7	2	1	0	1	2	2	2	2	1	0	0	2	2
G8	6	2	3	4	6	5	2	8	3	2	2	7	7
G9	2	1	1	3	3	2	1	3	3	2	2	3	3
G10	1	1	1	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2
G11	1	1	1	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2
G12	7	2	2	5	6	5	2	7	3	2	2	10	8
G13	6	2	2	4	6	5	2	7	3	2	2	8	8
2019	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
G1	8	2	2	4	5	5	1	6	1	1	1	7	5
G2	2	3	0	2	3	1	0	3	1	0	1	3	3
G3	2	0	5	1	2	2	0	3	1	1	1	2	1
G4	4	2	1	5	4	2	1	4	2	1	2	5	4
G5	5	3	2	4	6	4	1	6	2	1	2	6	5
G6	5	1	2	2	4	5	1	5	1	1	1	5	4
G7	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
G8	6	3	3	4	6	5	1	8	2	1	2	7	6
G9	1	1	1	2	2	1	0	2	2	1	2	2	2
G10	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
G11	1	1	1	2	2	1	0	2	2	1	2	2	2
G12	7	3	2	5	6	5	1	7	2	1	2	10	7
G13	5	3	1	4	5	4	1	6	2	1	2	7	7

Прежде всего, имея матрицу инцидентий  $A = A_S^G$  и рассматривая ее как определяющую матрицу для симплицального комплекса  $K_S(G, \lambda)$ , построим матрицу общих вершин  $C = (c_{ij})$ , в которой указывается количество общих вершин  $c_{ij}$  для каждой пары симпlices  $S_i, S_j$ :  $C = A A^T$ . Аналогичное построение проводим для матрицы данных за 2019 г. и для сопряженного ком-

плекса  $K_C(S, \lambda)$ , соответствующего матрице  $A = A_C^S$ , транспонированной к матрице  $A_S^G$ . Все упомянутые матрицы приведены в таблицах 8–10. Из каждой матрицы общих вершин, следуя алгоритму Q-анализа, составляем список q-связных компонент  $K_q$  и структурный вектор  $Q$  (табл. 11–12). Курсивом и жирным выделены комплексы 2019 г., отличающиеся от комплексов 2018 г.

Таблица 11

Списки q-связных компонент комплексов  $K_S(G, \lambda)$

$K_S(G, \lambda)$	2018		2019	
	Q <sub>q</sub>	K <sub>q</sub>	Q <sub>q</sub>	K <sub>q</sub>
10	1	{S1}	1	{S1}
9	1	{S1}	1	{S1}
8	3	{S1}, {S4}, {S6}	1	<i>{S1}</i>
7	2	{S1, S4, S6}, {S3}	3	<i>{S1}, {S4}, {S6}</i>
6	1	{S1, S3, S4, S6, S13}	3	<i>{S1, S4, S6}, {S3}, {S7}</i>
5	1	{S1, S3, S4, S6, S7, S13}	1	{S1, S3, S4, S6, S7, S13}
4	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S13}	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S13}
3	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S13}	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S13}
2	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S13, S14}	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S13, S14}
1	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S11, S12, S13, S14}	1	{S1, S2, S3, S4, S6, S7, S11, S12, S13, S14}
0	1	{все S}	1	{все S}

Списки q-связных компонент комплексов  $K_G(S, \lambda)$

$K_G(S, \lambda)$		2018		2019	
q	Q <sub>q</sub>	K <sub>q</sub>		Q <sub>q</sub>	K <sub>q</sub>
9	1	{G12}		1	{G12}
8	1	{G12}		1	{G12}
7	3	{G1}, {G8}, {G12, G13}		3	{G1}, {G8}, {G12}
6	1	{G1, G8, G12, G13}		1	{G1, G8, G12, G13}
5	1	{G1, G5, G8, G12, G13}		1	{G1, G5, G8, G12, G13}
4	2	{G3}, {G1, G4, G5, G6, G8, G12, G13}		2	{G3}, {G1, G4, G5, G6, G8, G12, G13}
3	2	{G3}, {G1, G4, G5, G6, G8, G12, G13}		2	{G3}, {G1, G4, G5, G6, G8, G12, G13}
2	1	{G1, G3, G4, G5, G6, G8, G9, G12, G13}		1	{G1, G2, G3, G4, G5, G6, G8, G12, G13}
1	1	{все G}		1	{G1, G2, G3, G4, G5, G6, G8, G9, G11, G12, G13}
0	1	{все G}		1	{все G}

Для симплексов  $S$  комплекса  $K_S(G, \lambda)$  и для симплексов  $G$  сопряженного комплекса  $K_G(S, \lambda)$  определим величины  $d$  — размерность симплекса,  $q$  — размерность наибольшей общей грани симплекса и  $e$  — эксцентриситет симплекса (как указано в [2]). Результаты приведены в таблицах 13–14.

Таблица 13

Характеристики симплексов комплекса  $K_S(S, \lambda)$

$K_S(G, \lambda)$	2018			2019		
	Симплекс	$d$	$q$	$e$	$d$	$q$
S1	10	7	0,3750	10	6	0,5714
S2	4	4	0	4	4	0
S3	7	6	0,1429	6	5	0,1667
S4	8	7	0,1250	7	6	0,1429
S5	0	0	0	0	0	0
S6	8	7	0,1250	7	6	0,1429
S7	5	5	0	6	5	0,1667
S8	0	0	0	0	0	0
S9	0	0	0	0	0	0
S10	0	0	0	0	0	0
S11	1	1	0	1	1	0
S12	1	1	0	1	1	0
S13	6	6	0	5	5	0
S14	2	2	0	2	2	0

Рассмотрим подкомплекс комплекса  $K_S(G, \lambda)$ , являющийся симплицальной звездой вершины G1 («уголь»), иначе говоря, подкомплекс, объединяющий те конфигурации (порты и припортовые станции), которые конкурируют между собой за заданную вершину G1, ввиду того, что сферой нашего непосредственного исследования являются экспортные перевозки угля.

Симплициальная звезда вершины G1 («уголь») состоит из тех симплексов, которые содержат G1 в качестве элемента: S1, S2, S3, S4, S7, S10, S13, S14. Из матрицы инцидентий  $A_S^G$ , определяющую комплекс  $K_S(G, \lambda)$ , имеем:

- S1 = {G1, G3, G4, G5, G6, G8, G9, G10, G11, G12, G13},
- S2 = {G1, G6, G8, G12, G13},
- S3 = {G1, G2, G5, G6, G7, G8, G12, G13},
- S4 = {G1, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G12, G13},
- S7 = {G1, G4, G5, G8, G12, G13},
- S10 = {G1},
- S13 = {G1, G3, G5, G6, G8, G12, G13},
- S14 = {G1, G4, G12}.

Таким образом, между симплексами существуют структурные зависимости по отношению включения: S10  $\subset$  S13  $\subset$  S1, S10  $\subset$  S2  $\subset$  S1, S10  $\subset$  S14  $\subset$  S7  $\subset$  S1, S2  $\subset$  S3, S2  $\subset$  S4, S7  $\subset$  S4, что отражено на рисунке 10.

Таблица 14

Характеристики симплексов комплекса  $K_G(S, \lambda)$

$K_G(S, \lambda)$	2018			2019		
	Симплекс	$d$	$q$	$e$	$d$	$q$
G1	7	6	0,1429	7	6	0,1429
G2	1	1	0	2	2	0
G3	4	2	0,6667	4	2	0,6667
G4	4	4	0	4	4	0
G5	5	5	0	5	5	0
G6	4	4	0	4	4	0
G7	1	1	0	0	0	0
G8	7	6	0,1429	7	6	0,1429
G9	2	2	0	1	1	0
G10	1	1	0	0	0	0
G11	1	1	0	1	1	0
G12	9	7	0,2500	9	6	0,4286
G13	7	7	0	6	6	0



Рис. 10. Граф отношения включения между симплексами (2018 г.)

Ввиду того, что симплексы S2, S7, S10, S13, S14 являются подсимплексами S1, для структурного анализа данного комплекса достаточно рассмотреть симплексы S1, S3, S4. Состав вершин этих симплексов позволяет группировать все вершины, выделив 5 кластеров (отмеченных разными цветами в табл. 15). Кластеры выделены исходя из

того, что вершины, относимые к одному кластеру, принадлежат одному и тому же набору симплексов.

Таблица 15

Группировка вершин симплексов по кластерам (2018 г.)

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
S1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
S3	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
S4	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1

С учетом выделенных кластеров

$$K1 = \langle G1, G5, G6, G8, G12, G13 \rangle,$$

$$K2 = \langle G2 \rangle,$$

$$K3 = \langle G3, G10, G11 \rangle,$$

$$K4 = \langle G4, G9 \rangle,$$

$$K5 = \langle G7 \rangle.$$

Структура симплицеального комплекса значительно упрощается: каждый из трех симплексов S1, S3, S4 становится 2-мерным и они формируют цепь 1-связи S1-S4-S3, как показано на рисунке 11.

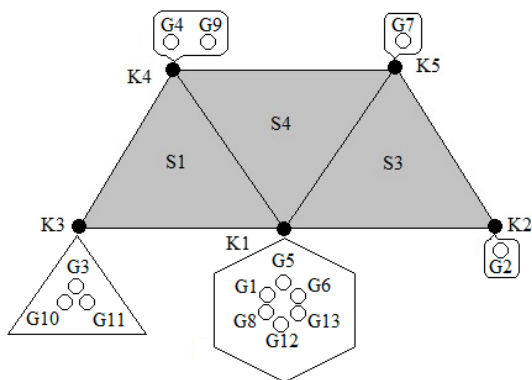


Рис. 11. Подкомплекс звезды вершины G1 с вершинами, объединенными в кластеры (2018 г.)

Проведенный структурный анализ подкомплекса симплицеальной звезды вершины G1 («уголь») основан на данных 2018 г. Аналогичные построения по состоянию на 2019 г. приводят к следующему.

В состав S7 добавился элемент G2; из состава S3 выведен элемент G7, из S4 — G9, из S13 — G13. Следующие отношения включения между симплексами становятся теперь недействительными:  $S7 \not\subset S1$ ,  $S7 \not\subset S4$ , что отражено на рисунке 12.

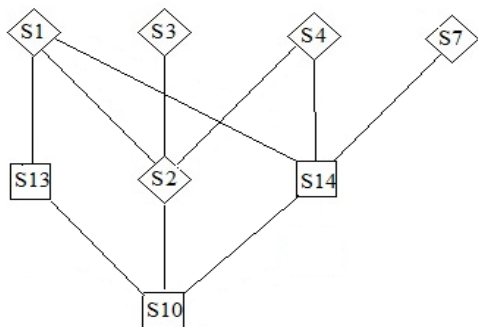


Рис.12. Граф отношения включения между симплексами (2019 г.)

В сложившейся обстановке для структурного анализа следует рассмотреть уже не 3, а 4 симплекса: S1, S3, S4 и S7. Группировкой вершин выделим 6 кластеров (табл. 16).

Таблица 16

Группировка вершин симплексов по кластерам (2019 г.)

	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
S1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
S3	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
S4	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
S7	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1

Таким образом, структура симплицеального комплекса является уже не столь простой. Матрица  $A = A_S^K$  имеет вид, приведенный в таблице 17.

Таблица 17

Матрица  $A = A_S^K$

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
S1	1	0	1	1	0	1
S3	1	1	0	0	0	1
S4	1	0	0	1	1	1
S7	1	1	0	1	0	0

Элемент G9 перешел из кластера K4 в K3, а G6 образовал отдельный кластер K6, в результате чего осталось два мультиэлементных кластера

$$K1 = \langle 1, 5, 8, 12, 13 \rangle,$$

$$K3 = \langle 3, 9, 10, 11 \rangle.$$

Симплексы S1 и S4 3-мерные и имеют общую грань {K1, K4, K6}. Симплексы S3 и S7 2-мерные и имеют общую грань {K1, K2} (рис. 13).

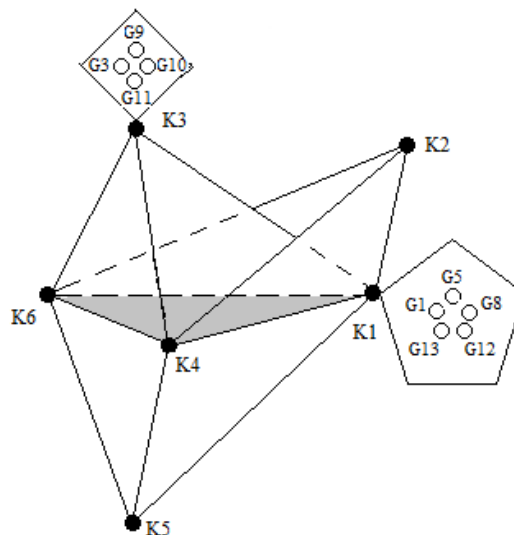


Рис.13. Подкомплекс звезды вершины G1 (2019 г.)

Структурный вектор данного подкомплекса равен

$$(Q_3, Q_2, Q_1, Q_0) = (2, 3, 1, 1).$$

Характеристики подкомплекса ( $d$  — размерность симплекса,  $q$  — размерность наибольшей общей грани симплекса и  $e$  — эксцентриситет симплекса) указаны в таблице 18.

Таблица 18

Характеристики симплексов подкомплекса звезды вершины G1

Симплекс	d	q	e
S1	3	2	0,333
S3	2	1	0,5
S4	3	2	0,333
S7	2	1	0,5

Проведенный структурный Q-анализ приводит к выводу, что компоненты структурных векторов, то есть величины  $Q_i$  для различных комплексов имеют значения  $\leq 3$ . Эти факты свидетельствуют о наполненности имеющихся связей в рассматриваемой СЭПКУ. Эксцентриситеты элементов не превышают 1, что также свидетельствует об отсутствии значительных перегрузок, однако положительные значения эксцентриситетов сигнализируют об умеренной перегрузке припортовых станций Находка-Восточная, Мыс Астафьева, Рыбники, Владивосток, по состоянию на 2019 г. — также Мыс Чуркин.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За счет применения структурного Q-анализа структуры мультимодальной системы доставки внешнеторговых грузов, состоящей из множества симплициальных и мультиплициальных комплексов, в данной статье:

– построена топологическая модель грузовых перевозок;

– установлены степени связности между различными симплексами и мультиплексами — взаимодействующими между собой грузоотправителями, грузополучателями и грузовладельцами, администрациями железных дорог отправления и обслуживающих морские порты, таможенными и другими государственными контролирующими органами, станциями погрузки, отправления, переработки вагонопотоков, назначения и выгрузки, банками, страховыми компаниями и другими субъектами транспортного рынка;

– построены прямые и обратные матрицы инцидентий (взаимодействия) между ними;

– установлены степени связности между различными типами и категориями элементов, потоков, правовых связей и интересов субъектов транспортного рынка в общей мультимодальной Системе доставки внешнеторговых грузов (СДВТГ) и в мультимодальной Системе экспортных перевозок каменных углей (СЭПКУ) в частности, представляющих собой симплексы и мультиплексы;

– определены эксцентриситеты того или иного симплекса или мультиплекса в СДВТГ и в СЭПКУ посредством Q-анализа и ранжира качества;

– определены структурные вектора качества функционирования СДВТГ и СЭПКУ;

– выполнено ранжирование грузо-, вагоно- и поездопотоков, субъектов транспортного рынка, симплексов и мультиплексов по степени значимости — степени вложенности в общую структуру — топологическую структуру СДВТГ и СЭПКУ.

Все это позволяет осуществить:

– выбор по ранжиру качества и в зависимости от меры сложности ту или иную мультимодальную схему поставки груза на экспорт через морские порты с учетом взаимодействия различных типов и категорий элементов, потоков, правовых связей и интересов субъектов транспортного рынка;

– построить информационно-советующую (подсказывающую) систему, помогающую в выборе объективных приоритетов тому или иному симплексу или мультиплексу при управлении экспортными перевозками;

– цифровизацию, логистизацию и интеллектуализацию СДВТГ и СЭПКУ.

Построенная модель топологии взаимодействия между субъектами транспортного рынка в системе мультимодальных перевозок позволяет в сложившейся оперативной обстановке в нужной иерархии расположить те или иные мультиплициальные комплексы с целью выбора приоритетных для обеспечения устойчивого функционирования мультимодальной системы доставки внешнеторговых грузов.

Но решающая роль в любом случае должна отводиться командам руководящих оперативных работников системы управления перевозочным процессом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горелова, Г. В. Структурный анализ сложных моделей когнитивных систем / Г. В. Горелова, Е. Н. Захарова // Сборник трудов VI Международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (CASC'2006) (Москва, 11–12 октября 2006 г.) / под ред. З. К. Авдеевой, С.В. Ковриги. — Москва: Институт проблем управления РАН, 2006. — С.172–184.

2. Зубов, Д. А. Автоматическое управление технологическими процессами углеобогащательной фабрики: Монография / Д. А. Зубов; М-во образования и науки Украины, Восточноевропейский национальный университет имени Владимира Даля. — Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2003. — 172 с.

3. Касти, Дж. Большие системы: Связность, сложность и катастрофы / Пер. с англ. под ред. Ю. П. Гупало, А. А. Пионтковского. — Москва: Мир, 1982. — 216 с. — (Техника и экология).

4. Кашаев, О. Ю. Методы и средства исследования структурно сложных систем на основе симплициальных комплексов: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.13.01 / Кашаев Олег Юрьевич; Московская гос. акад. приборостроения и информатики. — Москва, 2001. — 135 с.

5. Сулейманов, В. Н. Математический аппарат структурного анализа электроэнергетической системы / В. Н. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе, Л. Ю. Скачек // Электротехнические комплексы и системы управления. 2007. № 2. С. 32–36.

6. Эткин, Р. Х. Городская структура // Математическое моделирование / Под ред. Дж. Эндрюса, Р. Мак-Лоуна; пер. с англ. Ю. П. Гупало. — Москва: Мир, 1979. — С. 235–248.

7. Тараканов, В. Е. Комбинаторные задачи и (0, 1)-матрицы. — Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. — 192 с. — (Проблемы науки и технического прогресса).

8. Яковлев, Е. И. Вычислительная топология: Учебник для студентов, обучающихся по направлению 510200 —

Прикладная математика и информатика и по специальности 010200 — Прикладная математика и информатика / Е. И. Яковлев; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Нижегород. гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского. — Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2005. — 213 с.

9. Lake Ecosystems: A Polyhedral Dynamics Representation / J. Casti J, J. Kempf, L. Duckstein, M. Fogel // *Ecological Modelling*. 1979. Vol. 7, Is. 3. Pp. 223–237.

DOI: 10.1016/0304-3800(79)90071-1.

10. Багимов, А. В. Систематизация различных типов потоков в логистических системах доставки грузов // *ЛОГИСТИКА*. 2014. № 1 (86). С. 32–35.

11. Куренков, П. В. Внешнеторговые перевозки в смешанном сообщении. Экономика. Логистика. Управление: Монография / П. В. Куренков, А. Ф. Котляренко. — Самара: СамГАПС, 2003. — 634 с.

12. Griffiths, H. V. Using Mathematics to Simplify Q-Analysis // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 1983. Vol. 10, Is. 4. Pp. 403–422. DOI: 10.1068/b100403.

13. Degtyarev, K. Y. Prototype-Based Categorization of Structural Complexity Estimates of Simplicial Complexes // *Proceedings of the 10th International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS-2012)* (Lisbon, Portugal, 29–30 August 2012) / R. Aliev, [et al.] (eds). — Kaufering: b-Quadrat Verlag, 2012. — Pp. 27–37.

14. Johnson, J. H. Some Structures and Notation of Q-Analysis // *Environment and Planning B: Planning and Design*. 1981, Vol. 8, Is. 1. Pp. 73–86. DOI: 10.1068/b080073.

15. Johnson, J. H. q-Transmission in Simplicial Complexes // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1982. Vol. 16, Is. 4. Pp. 351–377. DOI: 10.1016/S0020-7373(82)80046-1.

16. Куренков, П. В. Моделирование топологии взаимодействия элементов и потоков различных типов в системе внешнеторговых перевозок // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2020. № 2 (22). С. 5–17.

# Simplicial and Multiplicial Complexes in Multimodal Transportation Systems

Grand PhD in Econ. Sc., PhD in Eng. Sc. P. V. Kurenkov

Russian University of Transport (MIIT)

Moscow, Russia

petrkurenkov@mail.ru

**Abstract.** Q-analysis is proposed as a toolkit of algebraic topology for modeling and determining the characteristics of the structure of a multimodal transport system as a complex multidimensional geometric formation consisting of a set of simplicial and multiplicative complexes; a model of the topology of interaction between the subjects of the transport market in the system of multimodal transportation has been built, which allows in an operational situation in the necessary hierarchy to arrange certain multiplicative complexes in order to select priority ones to ensure the stable functioning of a multimodal system for the delivery of foreign trade cargo.

**Keywords:** element, flow, system, interaction, delivery, wagon, cargo, simplex, multiplex, complex, topology.

## REFERENCES

- Gorelova G. V., Zakharova E. N. Structural Analysis of Complex Models of Cognitive Systems [Strukturnyy analiz slozhnykh modeley kognitivnykh sistem], *Proceedings of the VI International Conference «Cognitive Analysis and Management of Situations Development» [Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoy konferentsii «Kognitivnyy analiz i upravlenie razvitiem situatsiy»] (CASC'2006), Moscow, Russia, October 11–12, 2006*, Moscow, Institute of Control Sciences of RAS, 2006, Pp.172–184.
- Zubov D. A. Automatic control of technological processes of a coal-processing plant: Monography [Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami ugleobogatitel'noy fabрики: Monografiya]. Lugansk, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2003, 172 p.
- Casti J. Connectivity, complexity, and catastrophe in large-scale systems [Bol'shie sistemy: Svyaznost', slozhnost' i katastrofy]. Moscow, Mir Publishers, 1982, 216 p.
- Kashaev O. Yu. Methods and Tools for Studying Structurally Complex Systems Based on Simplicial Complexes [Metody i sredstva issledovaniya strukturno slozhnykh sistem na osnove simplitsial'nykh kompleksov]: diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). Moscow, 2001, 135 p.
- Suleimanov V. N., Katsadze T. L., Skachek L. Yu. Mathematical Apparatus of Structural Analysis of the Electric Power System [Matematicheskiy apparat strukturnogo analiza elektroenergeticheskoy sistemy], *Electrotechnical Complexes and Control Systems [Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya]*, 2007, No. 2. Pp. 32–36.
- Jetkin R. H. City Structure [Gorodskaya struktura]. In: *Mathematical modeling [Matematicheskoe modelirovanie]*. Moscow, Mir Publishers, 1989, Pp. 235–248.
- Tarakanov V. E. Combinatorial problems and (0,1)-matrices [Kombinatornye zadachi i (0,1)-matritsy]. Moscow, Nauka Publishers, 1985, 192 p.
- Yakovlev E. I. Computational Topology: Textbook [Vychislitel'naya topologiya: Uchebnik]. Nizhny Novgorod, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 2005, 213 c.
- Casti J., Kempf J., Duckstein L., Fogel M. Lake Ecosystems: A Polyhedral Dynamics Representation, *Ecological Modelling*, 1979, Vol. 7, Is. 3, Pp. 223–237. DOI: 10.1016/0304-3800(79)90071-1.
- Bagimov A. V. Systematization of Different Types of Flows in Logistics Systems of Cargo Delivery [Sistemati-zatsiya razlichnykh tipov potokov v logisticheskikh sistemakh dostavki gruzov], *LOGISTICS [LOGISTIKA]*, 2014, No. 1 (86), Pp. 32–35.
- Kurenkov P. V., Kotlyarenko A. F. Foreign trade transportations in mixed traffic. Economy. Logistics. Management: Monograph [Vneshnetorgovye perevozki v smeshannom soobshchenii. Ekonomika. Logistika. Upravlenie: Monografiya]. Samara, Samara State Transport Academy, 2003, 634 p.
- Griffiths H. B. Using Mathematics to Simplify Q-Analysis, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1983. Vol. 10, Is. 4. Pp. 403–422. DOI: 10.1068/b100403.
- Degtyarev K. Y. Prototype-Based Categorization of Structural Complexity Estimates of Simplicial Complexes. In: *Aliiev R., et al. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS-2012) Lisbon, Portugal, August 29–30, 2012*. Kaufering, b-Quadrat Verlag, 2012, Pp. 27–37.
- Johnson J. H. Some Structures and Notation of Q-Analysis, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1981, Vol. 8, Is. 1, Pp. 73–86. DOI: 10.1068/b080073.
- Johnson J. H. q-Transmission in Simplicial Complexes, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1982, Vol. 16, Is. 4, Pp. 351–377. DOI: 10.1016/S0020-7373(82)80046-1.
- Kurenkov P. V. Modeling the Topology of the Interaction of Elements and Flows of Various Types in the System of Foreign Trade Transportation [Modelirovanie topologii vzaimodeystviya elementov i potokov razlichnykh tipov v sisteme vneshnetorgovykh perevozok], *Intellectual Technologies on Transport [Intellektual'nye tekhnologii na transporte]*, 2020, No. 2 (22), Pp. 5–17.

# Актуальные проблемы автоматического управления транспортными средствами

к.ф.-м.н. А. Р. Ураков, Т. В. Тимеряев

Уфимский государственный авиационный технический университет

Уфа, Россия

urakov@ufanet.ru, timeryaev@gmail.com

**Аннотация.** Рассматривается задача автоматического управления автомобильными транспортными средствами. Проведен обзор проблем в целом и некоторых ее подзадач, приведены ссылки на существующие оценки их алгоритмической сложности. Рассмотрены задачи управления беспилотным автотранспортом. Приведены этапы решения задачи автоматического управления. Рассмотрены сложности проектирования управляющей системы беспилотным автотранспортом. Формулируются дополнительные проблемы, к которым приводит высокая сложность задачи в совокупности со специфическими условиями использования транспортных средств. Оцениваются подходы, применяемые для решения затронутых проблем, и перспективы их реализации на практике. Читателю предлагается самостоятельно оценить вероятность появления автоматически управляемых автомобильных транспортных средств в ближайшее время.

**Ключевые слова:** автономное транспортное средство, беспилотный автомобиль, автоматизация, робототехника, искусственный интеллект, принятие решений, безопасность, страхование.

## ВВЕДЕНИЕ

Беспилотным автотранспортом (БА) называют транспортные средства, способные анализировать текущую дорожную ситуацию и осуществлять безопасное передвижение по правилам дорожного движения (ПДД) без вмешательства человека. В основе системы управления БА лежит программное обеспечение, которое для оценки текущей ситуации использует совокупность различных устройств: камеры, лидары, радары, системы спутниковой навигации и т. д.

Классификацию автомобилей по автоматизации управления (степени ответственности автоматизированной системы управления) принято разделять на 6 уровней [1]:

0. «Без автоматизации». Полное управление автомобилем человеком. Система может лишь выдавать предупреждения и вмешиваться в экстренных ситуациях торможением или рулением;

1. «Помощь водителю». Используя информацию об окружающей обстановке, система может помогать в определенных режимах вождения либо рулевым управлением, либо ускорением/замедлением. За все остальные аспекты вождения отвечает водитель.

2. «Частичная автоматизация». Используя информацию об окружающей обстановке, система может помогать в определенных режимах вождения рулевым управлением и ускорением/замедлением. За все остальные аспекты вождения отвечает водитель.

3. «Условная автоматизация». Система полностью управляет автомобилем в определенных режимах вождения, ожидая адекватного вмешательства водителя по запросу.

4. «Высокая автоматизация». Система полностью управляет автомобилем в определенных режимах вождения, даже при отсутствии адекватного вмешательства водителя по запросу.

5. «Полная автоматизация». Система полностью управляет автомобилем при любых дорожных обстоятельствах и условиях окружающей среды, при которых способен водить человек.

При этом предполагается, что в уровнях 0–2 за мониторинг окружающей обстановки отвечает человек, а в уровнях 3–5 — автоматизированная система управления. Уровни 0–1 реализованы во многих выпускаемых в настоящее время автомобилях. Примеры подобных систем: антиблокировочная система, система динамической стабилизации автомобиля, помощник при парковке, круиз-контроль. Уровень 2 в своих автомобилях реализован несколькими автопроизводителями, это, например, такие системы помощи водителю, как Mercedes-Benz Distronic Plus, Nissan ProPilot Assist и Tesla Autopilot. Будем подразумевать под БА автотранспорт с автоматизацией управления уровня 5.

Особый практический интерес вызывает именно уровень 5 автоматизации, так как предполагается [2, 3], что его реализация и массовое распространение будет иметь ряд позитивных последствий:

- уменьшение числа пострадавших и смертности в автомобильных авариях за счет исключения фактора человеческих ошибок;
- увеличение производительности труда из-за высвобождения времени и усилий, которые тратятся на управление автомобилем;
- позитивный экономический эффект как следствие удешевления автомобильных перевозок без оплаты водительского труда;
- увеличение мобильности инвалидов, пожилых людей и детей;
- более эффективное градостроительное планирование благодаря использованию земли, освободившейся за счет переноса парковок и пр.

Технический прогресс в разработке датчиков, используемых автоматизированными системами управления автотранспортом, приведший к увеличению их точности и удешевлению, развитие существующих и появление совершенно новых — таких, как глубокие нейронные сети — алгоритмических подходов, а также проведение значимых соревнований с государственной поддержкой [4, 5], произошедшие в последние 20 лет, привели к усилению интереса к этой области и способствовали ряду серьезных достижений. Последние несколько лет различные автопроизводители при содействии технологических компаний

на регулярной основе анонсируют появление БА в течение ближайших 3–10 лет. Однако пока появление такого автотранспорта так и не произошло, и в настоящее время имеющийся прогресс сводится к испытаниям в определенных условиях достаточно ограниченного числа частично автоматизированных автомобилей с присутствием инженера на водительском сиденье, способным взять управление автомобилем на себя в критических или нештатных ситуациях.

В этой связи возникает естественный вопрос о принципиальной возможности реализации БА при использовании текущих подходов и имеющихся технологиях, а также о том, какие при этом могут возникнуть проблемы. Статья устроена следующим образом. В начале дается краткий обзор задач, возникающих при построении системы управления БА, часть из которых не решается точно. В разделе 2 рассматривается влияние неточности решений на характер функционирования БА. Разделы 3 и 4 посвящены сложностям, присущим разработке системы принятия решений БА, и проблеме страхования БА.

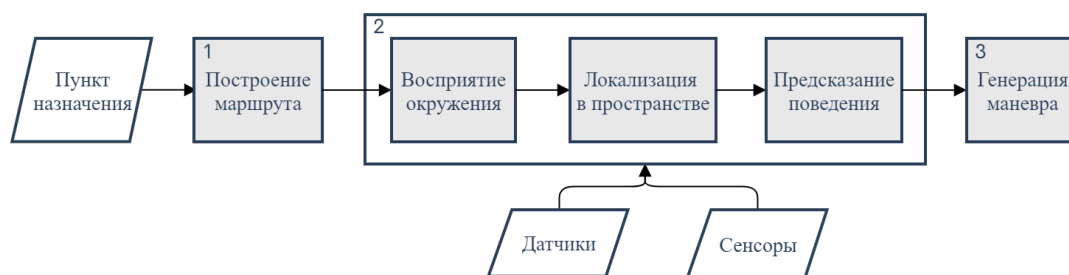


Рис. 1. Этапы решения задачи автоматического управления

Кратко опишем указанные этапы, укажем, где это возможно, вычислительную сложность и точность применяемых на каждом из этапов способов решения.

При построении маршрута для БА используются данные о дорожной сети местности, в пределах которой осуществляется перевозка. В математике этот класс проблем называется *задачей о кратчайшем пути* [9]. При этом дорожная сеть моделируется графом, вершины которого представляют собой пункты отправления/назначения, а ребра соответствуют расстояниям (или другой метрике, например времени в пути) между этими пунктами. Эта задача хорошо изучена и может быть решена точно достаточно эффективно, с вычислительной сложностью  $O(m + n \log n)$ , где  $n$  — количество вершин,  $m$  — количество ребер [10]. В случаях, когда дорожная сеть местности является достаточно большой, с целью уменьшения времени построения последующих маршрутов могут быть использованы алгоритмы, которые на начальном этапе выполняют предрасчет [11].

Этап 2а может быть разбит на 2 основные задачи: детектирование объектов и их отслеживание. В задаче детектирования объектов [12] необходимо по данным камер и лидаров идентифицировать и определить местоположение и размер имеющихся в сцене трехмерных объектов из интересующего набора категорий, таких как автомобили, пешеходы, препятствия, знаки и т. д. Это одна из фундаментальных задач компьютерного зрения, сложность решения которой зависит как от количества распознаваемых категорий, так и от количества положений, в которых распознаваемые объекты могут находиться, и масштабов, которые

## ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ БА

Задачу управления автотранспорта автоматической системой согласно разным источникам [6–8] можно разделить на несколько основных этапов или подзадач (рис. 1):

1. Построение маршрута для перемещения из исходного пункта в пункт назначения.

2. Принятие решений при движении по построенному маршруту:

а) восприятие окружающей обстановки, выделение и интерпретация находящихся в ней объектов;

б) построение карты окружающего пространства и локализация БА в этом пространстве;

в) предсказание поведения остальных участников дорожного движения (УДД).

3. Нахождение траектории и скорости движения БА для принятого системой решения.

они могут принимать. Так как задача не является строго формализованной, то принято говорить не о ее теоретической сложности, а о скорости работы алгоритмов решения, важно, чтобы она была приемлема для использования в реальном времени. На текущий момент доминирующий подход к решению задачи базируется на методах глубокого обучения, а лучшие из существующих алгоритмов имеют ошибку детектирования, превышающую 15 % [13].

Выделенные в сцене нестатичные объекты необходимо сопоставить с их наблюдаемым до текущего момента движением и на основании этого предсказать траекторию и скорость движения в ближайшем будущем. Формально это соответствует еще одной проблеме из области компьютерного зрения — задаче отслеживания объектов [14]. На текущий момент методы глубокого обучения показывают лучшие результаты при решении данной задачи, которые принято оценивать с применением агрегированных метрик. На известных наборах данных существующие алгоритмы демонстрируют верное решение задачи не более чем в 60 % случаев [15].

Для решения задачи, возникающей на этапе 2б, существует несколько подходов, среди которых можно выделить три, показывающих наилучшие результаты.

1. GPS/IMU Fusion [16] — совместное использование системы глобального позиционирования (СГП, GPS) и инерциального измерительного модуля (гиросtabilизатора, IMU). В этом подходе показания гиросtabilизатора с определенной частотой корректируются с учетом показаний СГП. Погрешность определения местоположения

СГП, а значит и погрешность полученного решения, затрудняет применение этого метода в реальных городских условиях.

2. SLAM — одновременная локализация и построение карты [17]. Для приближенного решения возникающей при формулировке задачи системы линейных уравнений, как правило, используют расширенный фильтр Калмана. Сама постановка задачи имеет вероятностный характер и не может иметь точного решения.

3. Подходы, в которых сопоставлением текущих показаний сенсоров БА с заранее подготовленной детальной картой местности определяется наиболее вероятное положение БА [18]. Существенным недостатком таких подходов является необходимость иметь актуальные детализированные карты для всех доступных для использования автотранспортом дорог, что в ближайшее время не представляется возможным.

Полученные на этапе 2а предсказания траекторий движения остальных УДД имеют механический характер и основываются лишь на наблюдениях за их перемещением до текущего момента. Однако водитель автомобиля или пешеход в любой момент может принять решение, которое существенно изменит его траекторию или скорость. Причем выбранный маневр может не всегда соответствовать ПДД, казаться нелогичным или выполняться внезапно. Поэтому возникает необходимость предсказания поведения УДД (этап 2в). Подходы к решению этой задачи используют различные статистические инструменты: методы машинного обучения с применением скрытых Марковских моделей, байесовских сетей и т. д. [19]. Вероятностная природа данной задачи не предполагает получения точного, безошибочного решения.

Полученные решения задач этапов 2а–2в являются исходными данными для системы принятия решений БА. Эта информация может использоваться вместе с заложенными в систему инструкциями — ПДД, поведенческими моделями, ценностными установками и т. д. — для выбора в каждый момент времени следующего корректного поведения БА. Можно выделить несколько подходов к процессу принятия решений: на основе системы правил и знаний, эвристические алгоритмы, методы нечеткой логики, имитация человеческого мышления [20]. Ни один из этих подходов не гарантирует принятия системой управления корректного, безошибочного решения: в каких-то случаях из-за проблемы сбора и поддержки полной базы знаний, в других — из-за сложности обучения искусственного интеллекта принятию правильных решений для всего многообразия возможных ситуаций, а где-то — по самому определению используемых методов.

Для тех принятых системой решений, которые касаются передвижения, необходимо найти траекторию и скорость движения БА в пространстве, реализующие выбранный маневр без столкновений. В робототехнике эта проблема соответствует задаче планирования движения (Motion Planning, [21]). Даже для голономного робота (робота, способного двигаться в любом направлении) нахождение точного решения задачи при условии двигающихся помех является очень вычислительно сложным, и в зависимости от наложенных ограничений задача может принадлежать следующим классам сложности: NP, PSPACE [22],

NEXPTIME [23]. В этой связи на практике для решения задачи используется ряд методов, дающих приближенное решение [24].

Следует отметить, что также существует подход, при котором задача управления решается без разбиения на подзадачи с помощью монолитной системы (рис. 2), которая в неявном виде учитывает все вышеописанные этапы [25]. Такие системы строятся на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), и с этим связано несколько трудностей в их практическом применении. Во-первых, сложность обучения. Необходим очень большой массив данных для обучения ИНС, желательный учитывающий каждую из возможных ситуаций, возникающих на реальных дорогах. Во-вторых, периодическая необходимость переобучения. Например, при изменении или добавлении пункта ПДД необходимо заново обучать ИНС, так как принимаемые системой решения могут противоречить нововведениям. В-третьих, при создании ИНС невозможно явно задать правила поведения, касающиеся безопасности, которые должны жестко соблюдаться системой управления в любых ситуациях, т. е. нельзя гарантировать безопасность принимаемых системой решений. Из-за указанных особенностей автомобили такого вида системой управления не тестировались на дорогах общего пользования, поэтому возможность их практического применения остается неясной. Будем считать, что далее в статье рассматриваются системы управления БА описанного выше типа — с декомпозицией на этапы.

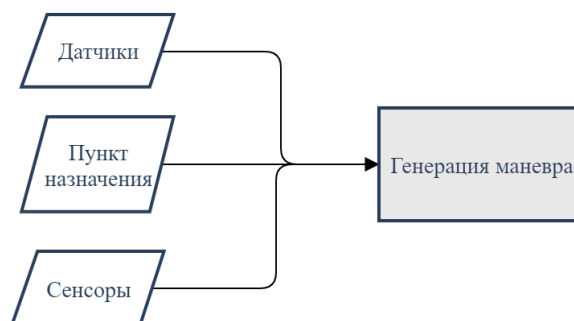


Рис. 2. Решение задачи автоматического управления монолитной системой

Как видно, задача управления БА является достаточно сложной, с необходимостью учитывать множество возможных комбинаций правил и разнообразие дорожных ситуаций, распознавать элементы окружения и определять свое местоположение относительно них, отслеживать движение и предсказывать поведение остальных УДД. При этом, как показано выше, часть подзадач не может быть решена точно: в каких-то случаях сама постановка задачи не предполагает существования точного решения, какие-то из задач слишком вычислительно сложны и поэтому решаются с помощью приближенных методов. Следовательно, необходимо рассмотреть влияние приближенного характера решения задачи управления на функционирование БА.

#### РЕЖИМЫ ОПЕРИРОВАНИЯ БА

После того как становится ясно, что точное решение задачи управления невозможно, приходится рассматривать результаты решения в приближенном виде. Одним из следствий этого является то, что не все комбинации входной информации будут корректно обработаны системой управления БА.

Реакцию системы управления на все многообразие входных данных можно условно разделить на следующие группы — режимы оперирования:

А. Система понимает и правильно обрабатывает входную информацию.

АЕ. Система понимает входную информацию, но обрабатывает ее неправильно из-за ошибок в программной реализации (в идеальном случае в полностью отлаженной системе подобное невозможно).

В. Система не имеет возможности правильно обработать входную информацию, однако распознает это и переходит в режим корректного выхода из ситуации. Корректный выход может предполагать: немедленную остановку работы, перезапуск системы, обращение к оператору для перехода на ручное управление.

С. Система не имеет возможности не только корректно обработать входную информацию, но и распознать эту ситуацию, поэтому принимает ошибочные управляющие решения.

Простые системы, не жизненно важные, не связанные с механическим управлением не нуждаются в режиме В. При переходе к режиму С система продолжает некорректную работу, пользователь сам решает, взаимодействовать ли с системой дальше или прекратить ей пользоваться (возможно, форсировать режим В).

В сложных системах, управляющих большими механическими объектами, режим оперирования С недопустим, так как может привести к тяжелым последствиям: серьезным повреждениям, человеческим травмам. В таком случае задача управляющей системы — отличить режим А от С, и при малейшей вероятности отклонения от режима А перевести систему в режим В, то есть запустить процедуру корректного выхода. Причем чем выше опасность объекта, тем более строгие требования к точности определения аварийных режимов В и С.

Основная проблема управления транспортными системами без оператора заключается в том, что режима оперирования В может не существовать. Массивный движущийся механический объект представляет опасность сам по себе, поэтому перезагрузка не является выходом из ситуации. Мгновенная остановка быстро движущегося объ-

екта в лучшем случае невозможна из-за его инерции и времени реакции механической системы, в худшем случае попытка мгновенной остановки может привести к более разрушительным последствиям, чем ошибки управления, которых требовалось избежать. Попытка переключиться в режим В в таких системах означает переход к режиму С.

Так как БА предполагает отказ от использования режима В, требуется покрытие системой управления БА всех возможных вариантов входных данных режимом А. Как показано выше, система управления БА не может гарантировать корректность решения во всех возможных случаях, поэтому придется допустить функционирование БА при определенных условиях в режиме С, рассчитывая на достаточно малую вероятность такого рода событий.

Понимая неизбежность перехода к режиму С и губительные последствия такого перехода, разработчики системы управления БА должны сделать все возможное, чтобы минимизировать подобные случаи. Это означает, что нужно не только корректно обработать все события, известные на момент разработки. По мере обнаружения новых случаев перехода к режиму С следует оперативно корректировать систему управления, добиваясь правильной реакции системы на подобные ситуации. Далее рассмотрим трудности разработки сложной управляющей системы в подобном режиме.

#### СЛОЖНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Процесс разработки управляющей системы (рис. 3) можно упрощенно описать следующим образом. Рассматривается некий набор условий и состояний, в которых система должна работать, т. е. выдавать корректные управляющие решения, в соответствии с определенными правилами (ограничениями, пожеланиями). Далее эти условия, состояния и правила формализуются. В ходе формализации определяются некие сущности. Одни сущности соответствуют объектам, другие — состояниям и свойствам, третьи — неким закономерностям и правилам взаимодействия объектов. Весь этот набор сущностей объединяется в модель, на основе которой строится управляющая система: разрабатываются алгоритмы и реализуются в виде программного обеспечения.

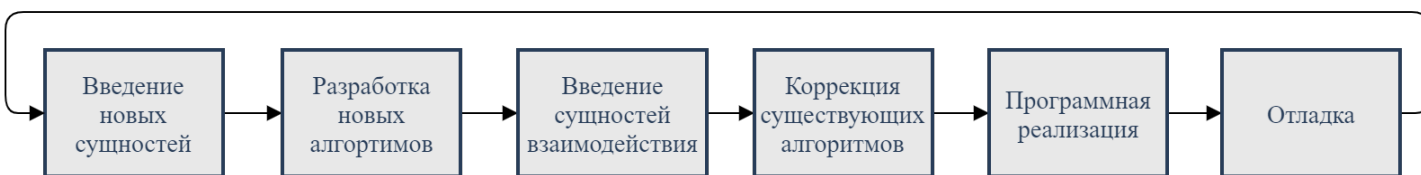


Рис. 3. Процесс разработки управляющей системы

Разработка сложной управляющей системы происходит поэтапно. На каждом этапе реализуется небольшая часть планируемого функционала, для определенных ситуаций и режимов работы, т. е. реализуется определенный сравнительно ограниченный набор сущностей. Часть управляющей системы, разработанная на каждом этапе, должна адекватно реагировать на некоторый ограниченный набор условий. Если система достаточно простая и полностью покрывает все возможные сочетания сущностей, то после отладки программного обеспечения можно считать разработку законченной.

Если система достаточно сложная, как в случае с БА, количество этапов разработки оказывается довольно большим. Мы говорим о единой управляющей системе, все сущности, которыми она оперирует, связаны между собой. Это значит, что появление новых сущностей должно предусматривать их взаимодействие со всеми сущностями, уже реализованными системой. Для осуществления такого взаимодействия также придется вводить новые взаимодействующие сущности (правила, статусы, алгоритмы), причем их количество пропорцио-

нально количеству уже реализованных сущностей. Другими словами, прирост количества сущностей у зависит от этапа  $x$  по правилу

$$dy \sim ydx . \quad (1)$$

Это означает, что количество сущностей по мере разработки системы будет расти экспоненциально.

Если предполагать, что разработка системы заключается во введении и кодировании новых сущностей, указанная экспоненциальность означает следующее. Ресурсы на разработку (количество специалистов и общее время их работы) также должны расти экспоненциально (экспоненциальный рост числа специалистов, в свою очередь, экспоненциально увеличивает число связей между ними и затраты на организацию процесса). Экспоненциальный рост требуемого ресурса постоянно отодвигает окончание разработки тем дальше, чем дольше идет разработка. Экспоненциальный рост числа сущностей также требует экспоненциального роста размера памяти ЭВМ, управляющей БА.

Может ли не быть экспоненциального роста? Отсутствие такого роста означает, что правая часть выражения (1) не содержит  $y$ . Сущности отражают не только объекты, но и связи между ними. Если объем добавляемых сущностей не зависит от объема текущей реализации (количества сущностей, учтенных системой), это означает, что разрабатываемую задачу можно разбить на большое количество частей. Для задачи управления БА это могут быть такие части (приведены лишь некоторые примеры): учет разметки, обработка знаков дорожного движения, учет состояния дороги, природных условий, объезд препятствий. Далее все части связываются между собой фиксированными неизменяемыми протоколами и при необходимости могут разрабатываться параллельно. Важно, чтобы протоколы, т. е. наборы сущностей, передаваемых через них, были определены заранее. Если такая фиксация произошла, можно говорить о переходе к полиномиальному росту размера программного кода, значит, задача становится реализуемой на практике.

Если сложность системы сравнительно высока, количество сущностей велико и фиксация протоколов взаимодействия между ее частями невозможна. Выход заключается в принудительном упрощении реализуемой модели и в неполной реализации. Первое означает, что условия, в которых будет работать управляющая система, ограничены специальным образом: закрытая территория, помещение, допуски — так, чтобы значительно ограничить список сущностей, которые требуется реализовать. Второе означает, что не все сущности будут реализованы, а в случае появления непредусмотренной ситуации произойдет переход либо в режим В (остановка или передача управления человеку), либо в режим С (принятие ошибочного решения; такое допустимо, если это не приведет к нежелательным последствиям).

К сожалению, работа БА предполагается в таких условиях, в которых невозможно как принудительное упрощение модели, так и переход в режим В, а режим С может привести к разрушительным последствиям. Сказанное выше означает, что разработка БА должна начинаться со строгой формализации связей между частями системы. Например, до начала разработки должна быть однозначным

образом решена задача определения оптимальной и максимально допустимой скорости для каждого участка пути при любых внешних условиях. После такой формализации разработка подзадач может происходить одновременно.

Насколько реальна такая формализация? С одной стороны, нельзя рассчитывать на полную непротиворечивую систему правил (аксиом), с другой стороны, полная система на практике и не требуется. Достаточно реализовать такую формализацию связей, которая будет охватывать только практически осуществимые или реальные ситуации. Более того, использование системы страхования (см. ниже) позволяет не реализовывать уникальные или неповторяемые ситуации. Остается требование, чтобы формализованные протоколы не влияли друг на друга (формализация, реализация и отладка одного протокола не могла изменять содержание остальных) и не приводили к комбинаторному росту их сложности. Возможно ли это при том, что подобных формализаций для сложных реальных систем пока не происходило? Вопрос остается открытым.

Несмотря на то, что подобные формализации отсутствуют, разработчики БА в настоящее время уже реализуют будущие части системы, т. е. функционал, который обеспечивает управление для определенных частных случаев. Можно делать расчет на то, что как алгоритмы, так и их программная реализация случайным образом будут соответствовать или почти соответствовать формальным правилам, которые пока не сформулированы и появятся гораздо позже. Однако подобное случайное совпадение кажется маловероятным. Скорее всего, понадобится перестройка уже реализованных алгоритмов под формализованные правила. Тогда список сущностей разделится на: а) реализованные; б) излишние по новым правилам; в) требующие корректировки; г) нереализованные. Добавление сущностей из группы «г» и редактирование сущностей из группы «в» вызовет необходимость согласования связей этих сущностей с уже существующими, что приведет к комбинаторному усложнению задачи. В такой ситуации окажется, что разработать все алгоритмы заново проще, чем пытаться переделывать старые.

#### ПРОБЛЕМА СТРАХОВАНИЯ БА

Высокая вычислительная сложность решения задачи управления БА, как показано выше, исключает получение точного решения. Следовательно, возникает необходимость оценки безопасности БА. Используемый сейчас для дорожных транспортных средств стандарт ISO 26262 («Дорожные средства — Функциональная безопасность») [26] не может быть использован для БА, так как касается только функциональных неисправностей аппаратного и программного обеспечения, но не рассматривает принятия БА ошибочных решений (в этом случае никаких функциональных неисправностей нет).

Существуют несколько подходов к оценке безопасности БА:

1. Подтверждение безопасности посредством большого количества пройденного испытываемым БА расстояния. В [27] показано, что данный подход может потребовать пробега в миллиарды километров, что кажется сложно реализуемым, так как для даже большого флота испытываемых автомобилей на это может потребоваться не один десяток лет. Кроме того, применение данного метода усложняет

необходимость доработки БА путем изменения программного обеспечения, возникающая в случае каждого обнаружения ошибки в управлении БА, что будет дополнительно увеличивать необходимое пройти расстояние.

2. Методы формального доказательства безопасности. Не могут быть использованы для БА, так как являются еще более вычислительно сложными, чем сама задача управления БА [28].

3. Подтверждение безопасности с помощью симуляции дорожных ситуаций. Этот подход также не может гарантировать безопасность БА, поскольку симуляция не может быть исчерпывающей, моделирующей все возможные сценарии и учитывающей разнообразные возникающие неопределенности (например, нерациональное поведение остальных участников дорожного движения) [29].

Отсутствие гарантии безопасного управления БА допускает возникновение ДТП по его вине с ущербом, причиненным как владельцу БА, так и третьим лицам. В этой связи возникает вопрос компенсации ущерба пострадавшим сторонам. В обычной практике это происходит через систему страхования.

Первый возникающий в этой связи вопрос: кто является страхователем? Или в такой постановке: чья ответственность за возможный ущерб, причиненный БА, должна быть застрахована? Так как БА по своей сути предполагает отсутствие лица, управляющего автомобилем, возможны следующие страхователи: пассажир БА, владелец БА, производитель БА.

Рассмотрим случай, когда страхователем является пассажир. Страхование БА по принципу изначально напоминает страхование ответственности при использовании каршеринга. Если пассажир хочет воспользоваться БА, он к стоимости использования доплачивает некую сумму, которая является страховой премией. Отличия заключаются не только в способе использования автомобиля, но и в моменте, когда начинает действовать страховка.

При каршеринге можно считать, что водитель получил услугу и оплатил ее вместе со страховкой в тот момент, когда он принимает на себя управление автомобилем, так как суть услуги заключается именно в предоставлении возможности управления. При пользовании БА в общем случае автомобиль должен самостоятельно добраться до той точки, где в него сядет пассажир. Так как ошибки управления возможны на этом участке точно так же, как и на всех остальных, необходимость страхования возникает с того момента, как БА начал движение к пассажиру.

Суть услуги по перевозке — в своевременной доставке пассажира из одной желаемой точки в другую. Совсем обязательно, что пассажир будет готов ждать приезда БА бесконечно долго (услуга имеет ценность только в ограниченном временном интервале). Если при оказании услуги по перевозке пассажира не был доставлен не по своей вине, можно считать, что услуга не предоставлена и пассажир имеет право ее не оплачивать. Однако в случае БА пассажир либо оплачивает страховку даже в том случае, когда он не получил услугу (не дождался приезда БА), либо возникает ситуация, когда перемещение БА не застраховано. Это означает, что в случае БА либо пассажир не может быть единственным страхователем (часть поездки страхователем является владелец БА), либо пользование БА пассажиром является не услугой по перевозке, а чем-то большим.

Следующий возможный вариант — страхователем является разработчик БА. Этот случай предполагает, что возможный ущерб от ошибок управления является непосредственной ответственностью разработчика. Компания, финансирующая разработку, страхует эту ответственность, выплачивает страховую премию страховщику, далее страховщик компенсирует возможный ущерб как владельцам БА, так и третьим лицам.

Использование такой схемы страхования имеет наибольший смысл при опытном или единичном производстве, причем в условиях, когда эксплуатация БА происходит под управлением разработчиков. При этом вероятность страхового случая соответствует вероятности ошибки управления БА, приводящей к ДТП. При массовом производстве каждая ошибка в схеме управления БА распространяется на все экземпляры и суммарная вероятность страхового случая для всех проданных БА пропорциональна: 1) объему продаж, 2) времени эксплуатации проданных БА. Это означает, что страховая премия, выплачиваемая разработчиком, не может быть фиксированной, а должна увеличиваться пропорционально этим двум величинам.

Чтобы реализовать подобное, страховая премия должна быть включена в продажную стоимость каждого БА и в стоимость его технического обслуживания (ТО). Получается, владелец опосредованным образом выплачивает страховую премию, рассчитывая на компенсацию возможного ущерба со стороны страховой компании. С учетом того, что разработчики не в состоянии управлять тем, как владельцы эксплуатируют БА, страхование ответственности разработчика становится аналогичным страхованию ответственности владельца БА.

Таким образом, оба случая, когда страхователем является либо пассажир, либо производитель БА, частично или полностью фактически сводятся к случаю, когда страхователем является владелец БА.

При страховании транспорта в настоящее время владелец либо сам является управляющим лицом, либо передает права управления некоторому ответственному лицу. Рассмотрим второй случай, как более общий. Передача управления всегда происходит вместе с передачей ответственности за возможные последствия. Страхование не может покрывать убытки от управления в любом случае (безусловно), иначе у страхователя появится возможность имитировать страховое событие и получать доход от страховых выплат.

Страхование подразумевает выполнение следующих условий:

1. Лицо, получающее управление, может начать потенциально опасные действия (движение) только, если уверено в корректной работе всех необходимых органов управления. Другими словами, если у водителя есть подозрение, что сломан или некорректно работает некий узел управления, он должен либо: а) не использовать при управлении этот узел (круиз-контроль, датчик парковки); б) не начинать движение, если не использовать этот узел невозможно (тормозная система).

2. От владельца транспортного средства требуется в момент передачи управления проинформировать водителя обо всех известных ему недостатках или поломках в системе управления.

Таким образом, условия страхования требуют, чтобы любая ошибка в системе управления или поломка могли случиться только неожиданно как для водителя, так и для владельца. После того, как случилась поломка некоторого узла управления, водитель должен или перестать пользоваться этим узлом (если у него есть такая возможность), или прекратить движение до восстановления работоспособности. Игнорирование этих требований переносит ответственность со страховой компании на лицо, допустившее нарушение.

Рассмотрим теперь систему управления БА. Владелец БА знает, что управляющая программа БА может ошибиться, но пока не знает в чем, точно так же, как это происходит с обычным транспортом: владельцу и водителю известно, что машина может сломаться, но неизвестно, когда и как. Далее возникает расхождение. Программа управления БА обязательно содержит в себе подсистемы, которые ведут себя детерминировано. Это означает, что если при определенных условиях некая ошибка управления уже возникла на одной из БА, такая же (или почти такая же) ошибка, вполне вероятно, может возникнуть при схожих условиях на всех машинах под управлением этого же программного обеспечения.

В случае обнаружения ошибок в управлении БА, приводящих к ДТП, можно останавливать весь флот под управлением данного программного обеспечения на время устранения ошибки (вполне стандартная и регулярная процедура). Однако это существенно снижает пользу БА для владельцев и таким образом серьезно угрожает коммерческой привлекательности проекта для производителя из-за возможности высокой частоты таких случаев. Чтобы не терять коммерческого смысла, БА должен продолжать использоваться даже при обнаружении таких ошибок в расчете на покрытие возможных убытков со стороны страховых компаний.

Это означает, что застрахованный владелец, обнаружив подобную ошибку в управлении БА, может попытаться злонамеренно ее воспроизвести путем помещения БА в определенные условия и породить тем самым страховое событие, не нарушая условия страхования. Следовательно, актуальным становится вопрос о возможности исключения подобного злоупотребления страховым правом со стороны страхователя БА.

Возможным способом исключить злонамеренное поведение со стороны страхователя — владельца БА является устранение детерминированности в принятии решений системой управления БА. Если управляющая система будет действовать все время по-разному, владелец не будет знать реакцию БА заранее. Это означает, что владелец не будет знать, что программа перейдет к действиям в режиме С, как и при страховании обычного транспорта.

Рассмотрим момент, когда можно ввести недетерминированность. Как упоминалось выше, область оперирования системы управления БА можно условно разделить на режим А (система работает корректно) и режим С (система принимает ошибочные решения, осознавая или не осознавая этого). Вводить недетерминированность при оперировании в режиме С кажется наиболее удобным. Казалось бы, если система не может найти корректное решение, она может выбрать любое из ошибочных, имеющих одинаковую

оценку возможного ущерба. Однако введение недетерминированности в поведение системы нужно как раз для того, чтобы исключить ситуации, при которых владелец знает момент, когда начнется ошибочная реакция управляющей системы. Следовательно, если вводить недетерминированность при оперировании в режиме С, момент перехода к ошибочному поведению БА (и появлению страхового случая) останется тем же самым, просто появится разнообразие ошибочных исходов.

Введение недетерминированности в режиме оперирования А не имеет смысла, поскольку по определению поведение БА в этом режиме не может быть виной ДТП, и, значит, не предоставляет возможности злоупотребления страховым правом владельцем БА. Таким образом, исключением детерминированности проблема злоупотребления со стороны страхователя не решается.

При детерминированной реализации системы управления БА попытка на стадии проектирования БА исключить злоупотребление со стороны страхователя сталкивается с трудностями.

Страхователь оперирует общим с системой управления БА набором сущностей: ПДД, принципы здравого смысла (например, не задевать предметы), ценностные установки (приоритет человеческой жизни и здоровья над повреждением имущества), погодные условия и т. д. Страхователь в состоянии распознать и принять адекватное (допустимое) управляющее решение для любой комбинации известных ему сущностей. Он изначально ожидает такой же реакции от управляющей системы БА.

Соответственно, в случае принятия системой управления БА ошибочных решений, ведущих к страховым случаям, страхователь имеет возможность выделить подмножество факторов (упоминаемых выше сущностей), которые привели к аварийной ситуации. Страхователь не может строго определить границы перехода управляющей системы БА к оперированию в режиме С, но ему и не требуется. Страхователю достаточно найти некоторую область, набор частных случаев, для которой прямая связь между сочетанием входных данных и переходом к режиму С, будет если не выражена в строгих формулировках, то хотя бы интуитивно понятна. С учетом ограниченного, эвристического подхода к решению задачи управления БА, размер пространства возможных комбинаций сущностей будет многократно превышать пространство успешно решаемых системой управления БА вариантов и поиск комбинаций, приводящих к ДТП, — просто вопрос времени.

Таким образом, страхователь имеет теоретическую возможность для злонамеренного генерирования страховых случаев путем помещения БА в определенные условия (например, заданием маршрута) с последующим получением денежных выплат, при этом формально не нарушая условий страхования. Из этого следует, что вопрос страхования БА в данный момент является открытым.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокий экономический эффект, который возник бы после решения задачи автоматического управления автомобильным транспортом, некоторое время назад привлек к этой проблеме очень большое количество ресурсов. Незначительность комбинаторного усложнения на первых шагах

позволила получить довольно быстрое решение (разработанное программное обеспечение) для некоторых подзадач. Благодаря этому у всех заинтересованных сторон появилось ощущение возможности решения проблемы за разумное время. Однако по мере разработки таких систем управления сложность их реализации увеличивалась, разработчики стали сталкиваться с проблемами, приведенными в том числе и в этой статье. Уровень сложности задачи сейчас вырос в достаточной степени, чтобы решение или исключение приведенных в статье проблем оказалось обязательным для получения результата, имеющего практический смысл. Поэтому нам представляется преждевременным планирование окончания разработки подобного рода управляющих систем. Требуется либо формализация задачи и разработка новых принципов страхования, либо внедрение других способов управления, использующих алгоритмические подходы, принципиально отличающиеся от применяемых на данный момент.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Deliverable D2.1. System Classification and Glossary // *Adaptive — Automated Driving*. URL: <http://www.adaptive-ip.eu/files/adaptive/content/downloads/Deliverables%20&%20papers/Adaptive-SP2-v12-DL-D2.1-System%20Classification.pdf> (дата обращения 01.11.2020).
2. Gruel, W. Assessing the Long-Term Effects of Autonomous Vehicles: A Speculative Approach / W. Gruel, J. M. Stanford // *Towards Future Innovative Transport: Visions, Trends and Methods: Selected Proceedings of the 43rd European Transport Conference (Frankfurt, Germany, 28–30 September 2015)* / P. Coppola (ed.) // *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 13. Pp. 18–29. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.003.
3. Duarte, F. The Impact of Autonomous Vehicles on Cities: A Review / F. Duarte, C. Ratti // *Journal of Urban Technology*. 2018. Vol. 25, Is. 4. Pp. 3–18. DOI: 10.1080/10630732.2018.1493883.
4. The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic / M. Buehler, K. Iagnemma, [et al.] (eds). — Berlin: Springer-Verlag, 2009. — 663 p. — (Springer Tracts in Advanced Robotics; Vol. 56).
5. The Grand Cooperative Driving Challenge 2016: Boosting the Introduction of Cooperative Automated Vehicles / C. Englund, L. Chen, J. Ploeg, [et al.] // *IEEE Wireless Communications*. 2016. Vol. 23, Is. 4. Pp. 146–152. DOI: 10.1109/MWC.2016.7553038.
6. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles / B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong, [et al.] // *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. 2016. Vol. 1, Is. 1. Pp. 33–55. DOI: 10.1109/TIV.2016.2578706.
7. A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies / E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo, K. Takeda // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 58443–58469. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983149.
8. CAAD: Computer Architecture for Autonomous Driving / S. Liu, J. Tang, Z. Zhang, J.-L. Gaudiot // *Computer*. 2017. Vol. 50, Is. 8. Pp. 18–25. DOI: 10.1109/MC.2017.3001256.
9. Ураков, А. Р. Алгоритм поиска кратчайших путей для разреженных графов большой размерности / А. Р. Ураков, Т. В. Тимеряев // *Прикладная дискретная математика*. 2013. № 1 (19). С. 84–92.
10. *Introduction to Algorithms. Third Edition* / T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. — Cambridge (MA): MIT Press, 2009. — 1292 p.
11. *Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks* / R. Geisberger, P. Sanders, D. Schultes, D. Delling // *Proceedings of the 7th International Conference on Experimental Algorithms (WEA'08) (Provincetown, MA, USA, 30 May–01 June 2008)*. — Berlin: Springer-Verlag, 2009. — Pp. 319–333. — (Theoretical Computer Science and General Issues. Lecture Notes in Computer Science; Vol. 5038). DOI: 10.1007/978-3-540-68552-4.
12. *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection* / J. Redmon, S. Divvala, R. B. Girshick, A. Farhadi // *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2016) (Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016)*. — Los Alamitos (CA), [et al.]: Conference Publishing Services: IEEE Computer Society, 2016. — Vol. 1. — Pp. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
13. *Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning* / C. Szegedy, S. Ioffe, V. Vanhoucke, A. A. Alemi // *Proceedings of the 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'17) (San Francisco, CA, USA, 04–09 February 2017)*. — AAAI Press, 2017. — Vol. 5. — Pp. 4278–4284.
14. Yilmaz, A. *Object Tracking: A Survey* / A. Yilmaz, O. A. Javed, M. Shah // *ACM Computing Surveys*. 2006. Vol. 38, Is. 4. Article No. 13. 45 p. DOI: 10.1145/1177352.1177355.
15. *Deep Learning in Video Multi-Object Tracking: A Survey* / G. Ciaparrone, F. L. Sánchez, S. Tabik, [et al.] // *Neurocomputing*. 2020. Vol. 381. Pp. 61–88. DOI: 10.1016/j.neucom.2019.11.023.
16. *An Innovative Information Fusion Method with Adaptive Kalman Filter for Integrated INS/GPS Navigation of Autonomous Vehicles* / Y. Liu, X. Fan, C. Lv, [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 100. Pp. 605–616. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.07.051.
17. *Durrant-Whyte, H. Simultaneous Localization and Mapping: Part I* / H. Durrant-Whyte, T. Bailey // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2006. Vol. 13, Is. 2. Pp. 99–110. DOI: 10.1109/MRA.2006.1638022.
18. *Robust Localization Using 3D NDT Scan Matching with Experimentally Determined Uncertainty and Road Marker Matching* / N. Akai, L. Y. Morales, E. Takeuchi, [et al.] // *Proceedings of the 28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'2017) (Redondo Beach, CA, USA, 11–14 June 2017)*. — IEEE, 2017. — Pp. 1356–1363. DOI: 10.1109/IVS.2017.7995900.
19. *Human Motion Trajectory Prediction: A Survey* / A. Rudenko, L. Palmieri, M. Herman, [et al.] // *The International Journal of Robotics Research*. 2020. Vol. 39, Is. 8. Pp. 895–935. DOI: 10.1177/0278364920917446.
20. *A Study on AI-Based Approaches for High-Level Decision Making in Highway Autonomous Driving* / L. Claussmann, M. Revilloud, S. Glaser, D. Gruyer // *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2017) (Banff, AB, Canada, 05–08 October 2017)*. — IEEE, 2017. — Pp. 3671–3676. DOI: 10.1109/SMC.2017.8123203.
21. *LaValle, S. M. Planning Algorithms*. — New York (NY): Cambridge University Press, 2006. — 844 p.

22. Reif, J. Motion Planning in the Presence of Moving Obstacles / J. Reif, M. Sharir // Proceedings of the 26th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (SFCS'85) (Portland, OR, USA, 21–23 October 1985). — Washington (DC): IEEE Computer Society, 1985. — Pp. 144–154. DOI: 10.1109/SFCS.1985.36.

23. Canny, J. New Lower Bound Techniques for Robot Motion Planning Problems / J. Canny, J. Reif // Proceedings of the 28th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (SFCS'87) (Los Angeles, CA, USA, 12–14 October 1987). — Washington (DC): IEEE Computer Society, 1987. — Pp. 49–60. DOI: 10.1109/SFCS.1987.42.

24. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles / D. González, J. Pérez, V. Milanés, F. Nashashibi // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016. Vol. 17, Is. 4. Pp. 1135–1145. DOI: 10.1109/TITS.2015.2498841.

25. End to End Learning for Self-Driving Cars / M. Bojarski, D. Del Testa, D. Dworakowski, [et al.] // ArXiv. 2016. Vol. 1604.07316. 9 p.

26. ISO 26262-1:2018. Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary. URL: <http://www.iso.org/standard/68383.html> (дата обращения 01.11.2020).

27. Kalra, N. Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability? / N. Kalra, S. M. Paddock // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2016. Vol. 94. Pp. 182–193. DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.010.

28. Facing ADAS Validation Complexity with Usage Oriented Testing / L. Raffaëlli, F. Vallée, G. Fayolle, [et al.] // ArXiv. 2016. Vol. 1607.07849. 13 p.

29. Safety Demonstration of Autonomous Vehicles: A Review and Future Research Questions / T. F. Koné, E. Bonjour, E. Levrat, [et al.] // Proceedings of the X International Conference on Complex Systems Design and Management (CSDM 2019) (Paris, France, 12–13 December 2019) / G. A. Boy, [et al.] (eds). — Cham: Springer Nature, 2020. — Pp. 176–188. DOI:10.1007/978-3-030-34843-4\_15.

# Actual Problems of Autonomous Vehicle Control

PhD A. R. Urakov, T. V. Timeryaev  
 Ufa State Aviation Technical University  
 Ufa, Russia  
 urakov@ufanet.ru, timeryaev@gmail.com

**Abstract.** The problem of automatic control of motor vehicles is considered. A review of the problems in general and some of its subtasks carried out, and links to existing estimates of their algorithmic complexity are given. The problems of unmanned vehicle management are considered. The stages of solving the problem of automatic control are given. The difficulties of designing a control system for unmanned vehicles are considered. Additional problems formulated, which caused by the high complexity of the task in conjunction with the specific conditions for the use of vehicles. The approaches used to solve the problems raised and the prospects for their implementation in practice assessed. The reader is invited to independently assess the likelihood of the appearance of automatically controlled automobile vehicles in the near future.

**Keywords:** autonomous vehicle, self-driving car, automation, robotics, artificial intelligence, decision making, safety, insurance.

## REFERENCES

1. Deliverable D2.1. System Classification and Glossary, *AdaptiVe — Automated Driving*. Available at: <http://www.adaptive-ip.eu/files/adaptive/content/downloads/Deliverables%20&%20papers/AdaptiVe-SP2-v12-DL-D2.1-System%20Classification.pdf> (accessed 01 Nov 2020).
2. Gruel W., Stanford J. M. Assessing the Long-Term Effects of Autonomous Vehicles: A Speculative Approach. In: Coppola P (ed.) *Towards Future Innovative Transport: Visions, Trends and Methods: Selected Proceedings of the 43rd European Transport Conference, Frankfurt, Germany, September 28–30, 2015. Transportation Research Procedia*, 2016, Vol. 13, Pp. 18–29. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.003.
3. Duarte F., Ratti C. The Impact of Autonomous Vehicles on Cities: A Review, *Journal of Urban Technology*, 2018, Vol. 25, Is. 4, Pp. 3–18. DOI: 10.1080/10630732.2018.1493883.
4. Buehler M., Iagnemma K., et al. (eds) *The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic*. Berlin, Springer-Verlag, 2009, 663 p.
5. Englund C., Chen L., Ploeg J., et al. The Grand Cooperative Driving Challenge 2016: Boosting the Introduction of Cooperative Automated Vehicles, *IEEE Wireless Communications*, 2016, Vol. 23, Is. 4, Pp. 146–152. DOI: 10.1109/MWC.2016.7553038.
6. Paden B., Čáp M., Yong S. Z., et al. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, Vol. 1, Is. 1, Pp. 33–55. DOI: 10.1109/TIV.2016.2578706.
7. Yurtsever E., Lambert J., Carballo A., Takeda K. A Survey of Autonomous Driving: Common Practices and Emerging Technologies, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, Pp. 58443–58469. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983149.
8. Liu S., Tang J., Zhang Z., Gaudiot J.-L. CAAD: Computer Architecture for Autonomous Driving, *Computer*, 2017, Vol. 50, Is. 8, Pp. 18–25. DOI: 10.1109/MC.2017.3001256.
9. Urakov A. R., Timeryaev T. V. All-Pairs Shortest Paths Algorithm for High-Dimensional Sparse Graphs [Algoritm poiska kratchayshikh putey dlya razrezhennykh grafov bol'shoy razmernosti], *Applied Discrete Mathematics [Prikladnaya diskretnaya matematika]*, 2013, No. 1 (19), Pp. 84–92.
10. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. Third Edition. Cambridge (MA), MIT Press, 2009, 1292 p.
11. Geisberger R., Sanders P., Schultes D., Delling D. Contraction Hierarchies: Faster and Simpler Hierarchical Routing in Road Networks, *Proceedings of the 7th International Conference on Experimental Algorithms (WEA'08), Provincetown, MA, USA, May 30–June 01, 2008. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5038. Berlin, Springer-Verlag, 2009, Pp. 319–333.
12. Redmon J., Divvala S., Girshick R. B., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, *Proceedings of the 29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016), Las Vegas, NV, USA, June 27–30, 2016, Volume 1*. Los Alamitos (CA), Conference Publishing Services, IEEE Computer Society, 2016, Pp. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
13. Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A. A. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning, *Proceedings of the 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'17), San Francisco, CA, USA, February 04–09, 2017, Volume 5*. AAAI Press, 2017, Pp. 4278–4284.
14. Yilmaz A., Javed O.A., Shah M. Object Tracking: A Survey, *ACM Computing Surveys*, 2006, Vol. 38, Is. 4, Article No. 13, 45 p. DOI: 10.1145/1177352.1177355.
15. Ciaparrone G., Sánchez F. L., Tabik S., et al. Deep Learning in Video Multi-Object Tracking: A Survey, *Neurocomputing*, 2020, Vol. 381, Pp. 61–88. DOI: 10.1016/j.neucom.2019.11.023.
16. Liu Y., Fan X., Lv C., et al. An Innovative Information Fusion Method with Adaptive Kalman Filter for Integrated INS/GPS Navigation of Autonomous Vehicles, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, Vol. 100, Pp. 605–616. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.07.051.
17. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localization and Mapping: Part I, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, Vol. 13, Is. 2, Pp. 99–110. DOI: 10.1109/MRA.2006.1638022.
18. Akai N., Morales L. Y., Takeuchi E., et al. Robust Localization Using 3D NDT Scan Matching with Experimentally Determined Uncertainty and Road Marker Matching, *Proceedings of the 28th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'2017), Redondo Beach, CA, USA, June 11–14, 2017*. IEEE, 2017, Pp. 1356–1363. DOI: 10.1109/IVS.2017.7995900.
19. Rudenko A., Palmieri L., Herman M., et al. Human Motion Trajectory Prediction: A Survey, *The International Journal of Robotics Research*, 2020, Vol. 39, Is. 8, Pp. 895–935.

DOI: 10.1177/0278364920917446.

20. Claussmann L., Revilloud M., Glaser S., Gruyer D. A Study on AI-Based Approaches for High-Level Decision Making in Highway Autonomous Driving, *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2017), Banff, AB, Canada, 05–08 October 2017*. IEEE, 2017, Pp. 3671–3676.

DOI: 10.1109/SMC.2017.8123203.

21. LaValle S. M. *Planning Algorithms*. New York (NY), Cambridge University Press, 2006, 844 p.

22. Reif J., Sharir M. Motion Planning in the Presence of Moving Obstacles, *Proceedings of the 26th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (SFCS'85), Portland, OR, USA, October 21–23, 1985*. Washington (DC), IEEE Computer Society, 1985, Pp. 144–154. DOI: 10.1109/SFCS.1985.36.

23. Canny J., Reif J. New Lower Bound Techniques for Robot Motion Planning Problems, *Proceedings of the 28th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (SFCS'87), Los Angeles, CA, USA, October 12–14, 1987*. Washington (DC), IEEE Computer Society, 1987, Pp. 49–60.

DOI: 10.1109/SFCS.1987.42.

24. González D., Pérez J., Milanés V., Nashashibi F. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, Vol. 17, Is. 4, Pp. 1135–1145.

DOI: 10.1109/TITS.2015.2498841.

25. Bojarski M., Del Testa D., Dworakowski D., et al. End to End Learning for Self-Driving Cars, *ArXiv*, 2016, Vol. 1604.07316, 9 p.

26. ISO 26262-1:2018. Road vehicles — Functional safety — Part 1: Vocabulary. Available at: <http://www.iso.org/standard/68383.html> (accessed 01 Nov 2020).

27. Kalra N., Paddock S. M. Driving to Safety: How Many Miles of Driving Would It Take to Demonstrate Autonomous Vehicle Reliability? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, Vol. 94, Pp. 182–193.

DOI: 10.1016/j.tra.2016.09.010.

28. Raffaëlli L., Vallée F., Fayolle G., et al. Facing ADAS Validation Complexity with Usage Oriented Testing, *ArXiv*, 2016, Vol. 1607.07849, 13 p.

29. Koné T. F., Bonjour E., Levrat E., et al. Safety Demonstration of Autonomous Vehicles: A Review and Future Research Questions. In: *Boy G. A., et al. (eds) Proceedings of the X International Conference on Complex Systems Design and Management (CSDM 2019), Paris, France, December 12–13, 2019*. Cham, Springer Nature, 2020, Pp. 176–188.

DOI:10.1007/978-3-030-34843-4\_15.

# Программа генерации графических tex-файлов

д.ф.-м. н. В. Н. Фоменко  
ООО «Новые технологии и сервис»  
Санкт-Петербург, Россия  
vfomenko1943@gmail.com

к.т.н. В. В. Гарбарук  
Петербургский государственный  
университет путей сообщения  
Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
vvgarbaruk@mail.ru

д.пед.н. Н. В. Попова  
Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия  
ninavaspo@mail.ru

**Аннотация.** Описываемый продукт создан объединением средств форматирования и графики LaTeX и гибкого языка программирования и вычислительных возможностей Fortran 95. Этот пакет позволяет создавать сложные рисунки с большим числом изменяющихся по определенному правилу элементов. Возможна автоматическая штриховка областей, границы которых заданы параметрически. Реализован алгоритм получения двухмерного изображения трехмерного объекта, наблюдаемого вдоль заданного направления. Предусмотрено автоматическое удаление невидимых линий и построение сечений выпуклых многогранников.

**Ключевые слова:** компьютерная графика, Latex, трехмерная графика, Фортран.

## ВВЕДЕНИЕ

LaTeX [1–3] — популярный пакет системы компьютерной верстки TeX, который облегчает набор сложных документов. Пакет позволяет автоматизировать многие задачи набора текста книг, учебных материалов, научных статей. При дистанционном обучении LaTeX активно используется для создания многовариантных заданий в различных дисциплинах [4, 5]. Большинство документов, создаваемых с помощью LaTeX, содержат также графики и иллюстрации для лучшего понимания текста. Добавление визуальных элементов в текст можно осуществлять разными путями.

Существует большое число различных систем для построения графиков и визуализации данных, которые можно сохранить в формате PDF. Эти объекты затем включаются в текст документа, подготовленный LaTeX [6]. Другой подход состоит в конвертации в LaTeX-код изображений и графиков из мощных математических пакетов программ MATLAB [7], Mathematica [8], GeoGebra [9] и многих других.

Перечислим отдельные пакеты, которые хорошо взаимодействуют с LaTeX, но подробное обсуждение их достоинств и недостатков выходит за рамки данной статьи. MetaPost [10] — редактор графики для LaTeX. Пакет основан на программе METAFONT [11], созданной Дональдом Кнудом (Donald Knuth) для разработки векторных шрифтов для TeX. В пакете Asymptote [12] преодолены некоторые ограничения MetaPost. В пакете

LaTeXDraw [13] генерируются PSTricks коды или сразу создаются PDF-рисунки. PGF/TikZ представляет собой тандем языков создания объектов векторной графики для геометрических и алгебраических приложений. PGF — это язык более низкого уровня, в то время как TikZ — набор макросов более высокого уровня, использующих PGF [14–19]. Тесная связь TikZ и PGFPlots позволяет хорошо интегрировать графики в различные рисунки, выполненные в TikZ, а также использовать возможности TikZ при работе с графиками [20].

В настоящей статье описывается программный продукт, имеющий целью облегчить (а во многих случаях сделать реальным на практике) создание сложных рисунков для тех, кто работает в системе LaTeX. Так как построение рисунков, в том числе и в системе Word, — задача не простая, наличие такого инструмента весьма полезно. В данном пакете пользователь должен написать программу на языке Fortran 95 [21]. Если рисунок вставляется в текст, то программа Fortran 95 завершается командой *subroutine final*, а начинается *subroutine prep(fn, dims, hrange, vrange, nh, nv, margin)*, где перечисляются параметры вставки. Результат также можно сохранить в формате PDF.

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПОДПРОГРАММ

Приведем краткое описание утилит (их более 80), которые можно использовать для создания рисунков. Прежде всего задается размер рисунка, затем указываются диапазоны вспомогательных координат по горизонтальной и вертикальной осям, выводятся координатные оси, они могут быть обеспечены нумерованными делениями и дополнительными отметками. Координаты точек на отображаемом изображении задаются в произвольных единицах измерения. Горизонтальный и вертикальный масштаб определяется исходя из размера изображения и диапазона координат в произвольных единицах вдоль горизонтальных и вертикальных линий. В большинстве случаев линии, образующие изображение, могут быть сплошными или пунктирными, а параметры размера штриха могут быть установлены пользователем. Ширина линии также может быть определена пользователем.

СОЗДАНИЕ РИСУНКОВ

Входной файл, созданный для системы LaTeX, перерабатывается транслятором LaTeX в изображения, показанные на рисунках ниже.

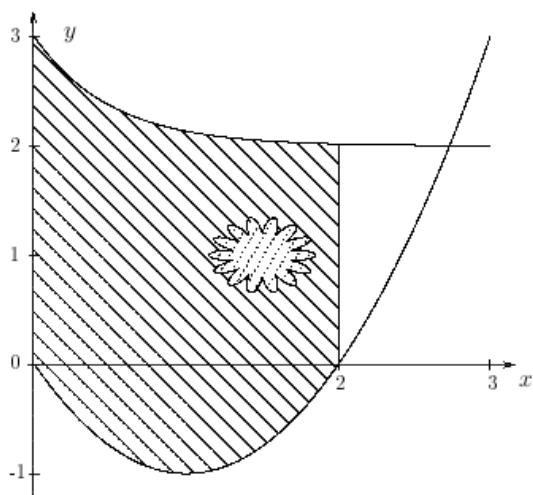


Рис. 1. Штриховка

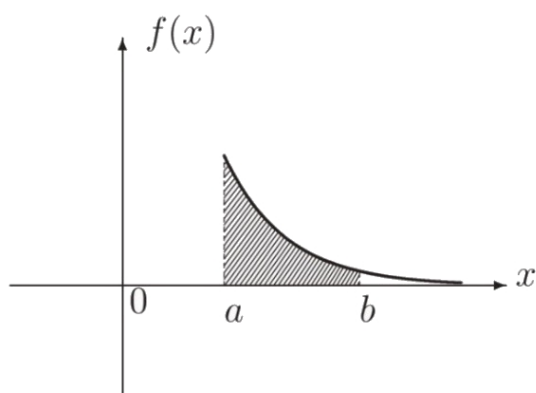


Рис. 2. График функции

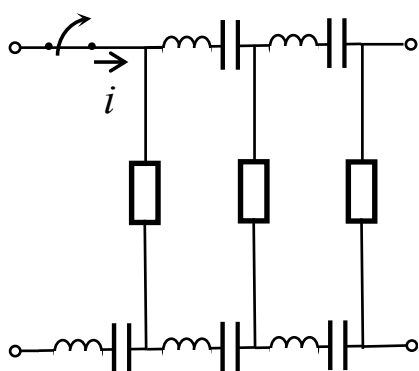


Рис. 3. Электрическая схема

Отметим следующие особенности рисунков, построенных с помощью описываемого программного пакета:

- автоматическая штриховка области с границей, заданной параметрически (рис. 1, 2);
- изображения плоских картин с повторяющимися элементами, например, электрических схем (рис. 3).

ИЗОБРАЖЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Реализованный в данной работе алгоритм получения двумерного изображения трехмерного объекта соответствует фотографированию с большого расстояния, когда размеры объекта малы по сравнению с расстоянием до него.

В частности, рассматриваются создания рисунков пространственных кривых и выпуклых многогранников. Направление, в котором рассматривается объект, задается вектором  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , определяющим направление перпендикуляра экрана. Для получения, например, изометрической проекции надо задать  $\alpha = 1/3, \beta = 1/3, \gamma = 1/3$ . Положение камеры относительно своей оси выбирается так, что вертикальные объекты изображаются как вертикальные же.

Для получения изображения выпуклого многогранника пользователь должен задать координаты вершин многогранника в декартовой, цилиндрической или сферической системах, а также для каждой грани указать вершины, принадлежащие ей. Программа автоматически вычисляет, какие вершины соединены ребрами. Также определяются ребра, скрытые при данном направлении наблюдения, при этом последние могут изображаться пунктиром. Возможно автоматизированное (программное) обозначение всех вершин многогранника. Кроме того, если задано уравнение некоторой плоскости, то программа также строит сечение многогранника этой плоскостью.

Отметим следующие особенности рисунков, построенных с помощью описываемого программного пакета:

- аутентичность, т.е. соблюдение геометрических свойств с точностью до изображающих рисунок пикселей;
- изображение пространственных объектов с точным соблюдением соотношений ортогональной проекции;
- изображение и штриховка плоских сечений пространственной фигуры;
- изображение объекта после поворота вокруг любой пространственной оси.

На рисунке 4 изображен правильный пятнадцатигранник. Ниже приводятся подпрограммы, обеспечивающие его двухмерное изображение.

1. Задание координат вершин многогранника.

```
n=7
do k=1,n
V(:,k)=(/cos(2*pi/n*k),sin(2*pi/n*k),0./)
V(:,k+n)=(/cos(2*pi/n*k),sin(2*pi/n*k),1./)
enddo
V(:,2*n+1)=(/0.,0.,2.3/)
```

2. Задание граней через указание трех вершин.

```
do k=1,n
f_index(:,k)=(/k,mod(k,n)+1,k+n/)
enddo
do k=1,n
f_index(:,n+k)=(/2*n+1,n+k,n+mod(k,n)+1/)
enddo
f_index(:,2*n+1)=(/1,2,3/)
```

3. Задание секущей плоскости.

```
T=(-0.5,1.,0.5)
```

4. Задание вектора, определяющего направление наблюдения.

$$SCREEN = (-1, 0.6, -0.8)$$

5. Изображение наименований вершин.

```
do k=1,n
write(ind,'(i2)')k
if (k/=3.and.k/=5) then
uhr=5
else if (k==3) then
uhr=2
else
uhr=9
endif
call put(V(:,k),'$A {trim(adjustl(ind))}' $',
d=5.,
uhr=uhr)
call put(V(:,k+n),'$B {trim(adjustl(ind))}' $',d=5.,
uhr=uhr)
enddo
```

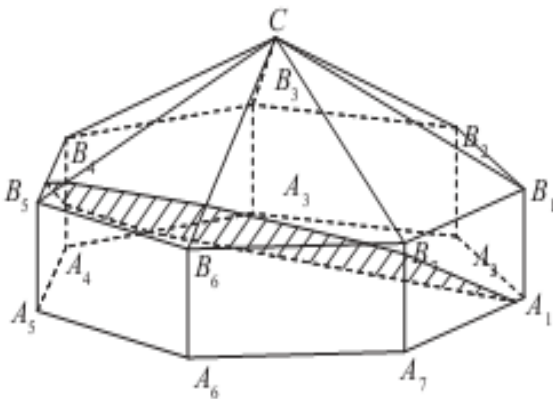


Рис. 4. Многогранник

Построенную пространственную фигуру можно рассмотреть с различных сторон, изменив вектор, определяющий направление наблюдения.

На рисунках 5 и 6 представлены виды сверху и сбоку построенного ранее многогранника. Этим рисункам соответствуют параметры векторов наблюдения  $SCREEN = (0, 0, -1)$  и  $SCREEN = (-1, 0, 0)$ .

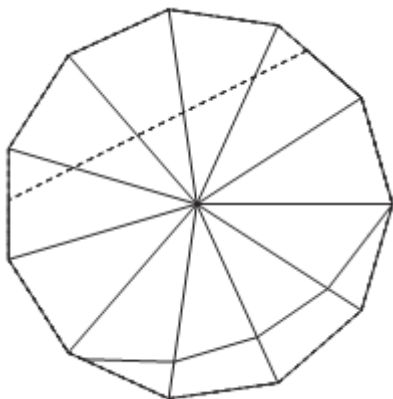


Рис. 5. Многогранник. Вид сверху

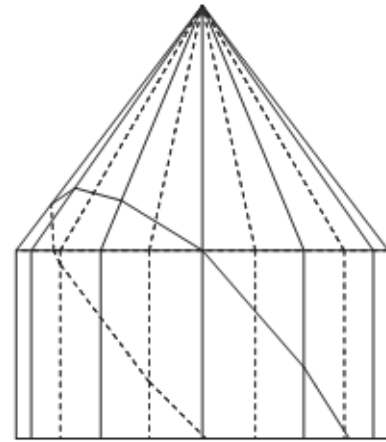


Рис. 6. Многогранник. Вид сбоку

Можно также получить изображение пространственного объекта после поворота вокруг любой пространственной оси, заданной направляющими косинусами  $c_x, c_y, c_z$ , на произвольный угол  $\theta$ . После поворота точка с координатами  $x, y, z$  перемещается в точку с координатами  $x', y', z'$  [22], которая вычисляется по формуле

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} y + \begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} z,$$

$$\text{где } \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2 \\ 2(-\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2) \\ 2(\lambda_0\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3) \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2) \\ \lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2 \\ 2(-\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3) \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(-\lambda_0\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3) \\ 2(\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3) \\ \lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \end{pmatrix}.$$

Параметры Родриго-Гамильтона  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  вычисляются по формулам:

$$\lambda_0 = \cos(\theta/2), \quad \lambda_1 = c_x \sin(\theta/2),$$

$$\lambda_2 = c_y \sin(\theta/2), \quad \lambda_3 = c_z \sin(\theta/2).$$

Эта подпрограмма удобна при анализе пространственных кривых. На рисунке 7 показаны различные виды конической винтовой линии, заданной параметрическими уравнениями вида

$$\begin{cases} x(t) = t \times \cos t; \\ y(t) = t \times \sin t; \\ z(t) = t. \end{cases}$$

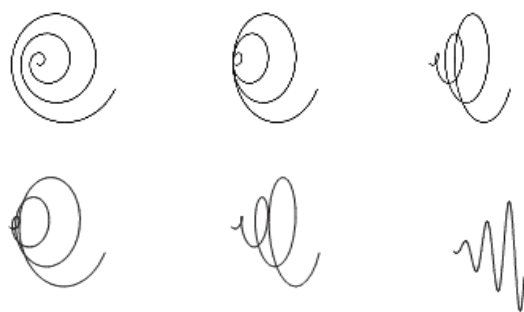


Рис. 7. Пространственная кривая

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ФУНКЦИЙ

Основной недостаток используемого в системе LaTeX графического пакета PICTURE и его расширений EPIC и EEPIC состоит в их ориентации на работу ручную. Так, например, они позволяют вывести график, но предполагается, что координаты точек будут вводиться программистом в качестве аргументов команды.

В этом пакете пользователь должен лишь написать программу на языке Fortran 95, задающую кривую параметрически. Для построения кривой следует вызвать соответствующую подпрограмму пакета, а имена процедуры, задающей кривую, включаются как параметры этой подпрограммы. Предусмотрена возможность в случае необходимости изображения большого количества иллюстрирующих элементов (стрелок, линий и т. п.). Для графической иллюстрации решения дифференциального уравнения  $y' + y = x^2$  создан рисунок 8, на котором показано как интегральная кривая пересекает изоклины под углом, задаваемым стрелками, исходящими из данной изоклины.

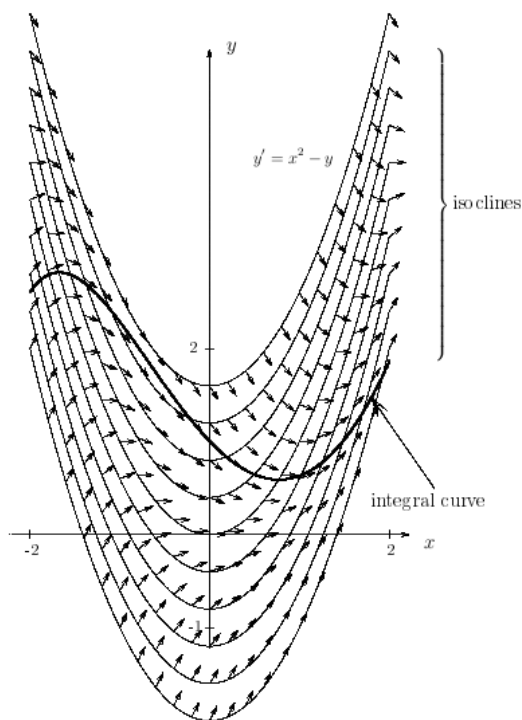


Рис. 8. Решение уравнения  $y' + y = x^2$

Ниже приводятся несколько подпрограмм, обеспечивающих построение рисунка 8.

1. Решение дифференциального уравнения.

```
real function y(t)
real t
y = t**2 - 2*t + 2 + C*exp(-t)
end function y
```

2. Описание изоклины.

```
real function qy(t)
real t
qy = t**2 - C1
end function qy
```

3. Вывод десяти изоклин.

```
N=10
do i=1,N
C1=(Cmax-Cmin)/N*i+Cmin
call curve(-2.,2.,qy,1000)
```

4. Вывод стрелок, задающих направление на изоклинах.

```
do k=0,kmax
call vector($L1((/q(-2.+4./kmax*k),
qy(-2.+4./kmax*k)/),&atan(C1),4.))
enddo
```

5. Вывод частного решения.

```
C = -1.
call curve(-2.,2.,qy,1000,width=5).
```

Графическая иллюстрация решения дифференциального уравнения  $y' = (y/x)^2$  представлена на рисунке 9.

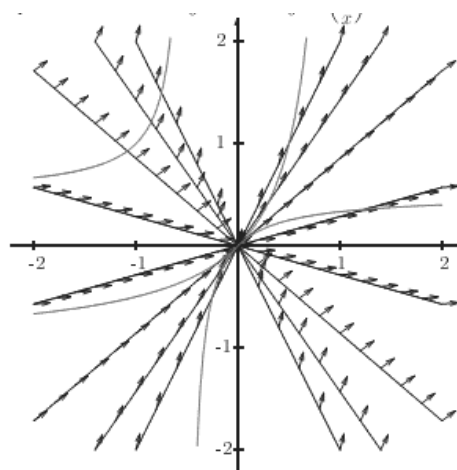


Рис. 9. Решение уравнения  $y' = (y/x)^2$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным отличием предложенного подхода к использованию графики LaTeX состоит в его гибридной природе. Программирование осуществляется не в рамках системы LaTeX, а средствами гибкого и хорошо развитого языка Fortran 95. Этот язык обладает богатой библиотекой встроенных функций, в частности функций, предназначенных для работы со строками, что особенно важно для создания исходных файлов tex. Напротив, развиваемые в данный момент графические приложения обычно ориентируются на программирование в самой системе LaTeX, имеющей меньшие возможности

реализации алгоритмов, в особенности вычислительных.

Существенным преимуществом этого подхода является его способность к расширению путем создания новых процедур на основе уже написанных на Фортране.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. The LaTeX Graphics Companion. Second Edition / M. Goossens, F. Mittelbach, S. Rahtz [et al.]. — Boston (MA): Addison-Wesley Professional, 2008. — 925 p. — (Tools and Techniques for Computer Typesetting).

2. Spivak, M. D. The Joy of TeX. Second Edition: A Gourmet Guide to Typesetting with the AMS-TeX Macro Package. — Providence (RI): American Mathematical Society, 2004. — 326 p.

3. Роженко, А. И. Искусство верстки в LATEX'e / А. И. Роженко; Сиб. отделение РАН, Ин-т вычисл. математики и мат. геофизики; отв. ред. А. С. Алексеев. — Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2005. — 397 с.

4. Карнаухов В. М. Приложение LATEX. Генератор вариантов контрольных работ: Монография. — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. — 100 с.

5. Лубягина, Е. Н. Подготовка учебных заданий в LaTeX / Е. Н. Лубягина, Е. С. Юрлова // Математический вестник педвузов и университетов Волго-Вятского региона: периодический межвузовский сборник научно-методических работ. Выпуск 16. — Киров: Изд-во ООО «Радуга-ПРЕСС», 2014. — С. 289–295.

6. Балдин, Е. М. Компьютерная типография LaTeX. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. — 304 с.

7. Gilat, A. Numerical Methods for Engineers and Scientists: An Introduction with Applications Using MATLAB. Third Edition / A. Gilat, V. V. Subramaniam; The Ohio State University. — Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, 2014. — 575 p.

8. Таранчук, В. Б. Введение в графику системы Mathematica: учеб. материалы для студентов ф-та прикладной математики и информатики / В. Б. Таранчук; Белорусский государственный ун-т. — Минск: БГУ, 2017. — 53 с.

9. Kovács, Z. Giac and GeoGebra — Improved Gröbner Basis Computations / Z. Kovács, B. Parisse // Computer Algebra and Polynomials: Applications of Algebra and Number Theory / J. Gutierrez, [et al.] (eds) // Lecture Notes in Computer Science. Vol. 8942. 2015. Pp. 126–138. DOI: 10.1007/978-3-319-15081-9\_7.

10. Hobby, J. D. A User's manual for MetaPost // AT&T Bell Laboratories Computing Science Technical Report No. 162. — Murray Hill (NJ), 1992. — 89 p.

11. Knuth, D. E. The METAFONTbook. — Reading (MA): Addison-Wesley Publishing Company, 1995. — 373 p.

12. Asymptote: The Vector Graphics Language // SourceForge.net. URL: <http://asymptote.sourceforge.net> (дата обращения 04.03.2021).

13. LaTeXDraw — A vector drawing editor for LaTeX // SourceForge.net. URL: <http://latexdraw.sourceforge.net> (дата обращения 04.03.2021).

14. Кирютенко, Ю. А. TikZ & PGF. Создание графики в LaTeX2e-документах / Ю. А. Кирютенко; Южный федеральный университет. — Ростов-на-Дону, 2014. — 277 с. URL: <http://elib.ict.nsc.ru/jspui/bitstream/ICT/1488/1/pgf-ru-all-method.pdf> (дата обращения 04.03.2021).

15. Tantau, T. The TikZ and PGF Packages. Manual for version 3.0.1a. August 29, 2015. — Institut für Theoretische Informatik Universität zu Lübeck, 2015. — 1161 p.

URL: <http://elib.ict.nsc.ru/jspui/handle/ICT/1487/1/pgfmanual.pdf> (дата обращения 04.03.2021).

16. Mertz, A. Graphics with PGF and TikZ / A. Mertz, W. Slough // TUGboat. 2007. Vol. 28, No. 1 — Proceedings of the Practical TEX 2006 Conference. Pp. 91–99.

URL: [http://bepress-attached-resources.s3.amazonaws.com/uploads/2e/e6/b7/2ee6b797-aa18-4147-8e49-035ea8fd76c1/fulltext\\_stamped.pdf](http://bepress-attached-resources.s3.amazonaws.com/uploads/2e/e6/b7/2ee6b797-aa18-4147-8e49-035ea8fd76c1/fulltext_stamped.pdf) (дата обращения 04.03.2021).

17. Feuersänger, C. Manual for Package PGFPLOTS: 2D/3D Plots in LaTeX. Version 1.15. May 06, 2017. — 566 p. URL: <http://elib.ict.nsc.ru/jspui/bitstream/ICT/954/4/pgfplots-.pdf> (дата обращения 04.03.2021).

18. Есаян, А. Р. Построение графиков средствами LaTeX-пакета pgfplots: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 02.03.01 «Математика и компьютерные науки» // А. Р. Есаян, В. Н. Чубариков, Н. М. Добровольский, А. В. Якушин; Мин-во образования и науки РФ, Тул. гос. пед. ун-т им. Л. Н. Толстого. — Тула: Изд-во ТГПУ, 2015. — 372 с.

19. PGFplots.net — Drawing plots and diagrams with LaTeX and PGFplots. URL: <http://pgfplots.net> (дата обращения 04.03.2021).

20. Getreuer, P. TikZ for High-Quality LaTeX Pictures // Pascal Getreuer. URL: <http://getreuer.info/tutorials/tikz-for-high-quality-latex-pictures/index.html> (дата обращения 04.03.2021).

21. Chapman, S. J. Fortran 90/95 for Scientists and Engineers. — Boston (MA), [et al.]: WCB/McGraw-Hill, 1998. — 890 p.

22. Лурье, А. И. Аналитическая механика. — Москва: Физматгиз, 1961. — 824 с.

# A Program for Generating Tex Source Files Producing Graphic Output

Grand PhD V. N. Fomenko  
New Technologies and Service LLC  
Saint Petersburg, Russia  
vfomenko1943@gmail.com

PhD V. V. Garbaruk  
Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
vvgarbaruk@mail.ru

Grand PhD N. V. Popova  
Peter the Great St. Petersburg Poly-  
technic University  
Saint Petersburg, Russia  
ninasvasp@mail.ru

**Abstract.** The product described was created by combining LaTeX formatting and graphics tools and the flexible programming and computing capabilities of Fortran 95. This package allows us to create complex drawings with a large number of elements changing according to a certain rule. It is possible to automatically hatch the areas, whose boundaries are set parametrically. An algorithm for obtaining a two-dimensional image of a three-dimensional object observed along a given direction has been implemented. Automatic removal of hidden lines and construction of convex polyhedron sections are provided.

**Keywords:** computer graphics, Latex, 3D graphics, Fortran.

## REFERENCES

1. Goossens M., Mittelbach F., Rahtz S., et al. The LaTeX Graphics Companion. Second Edition. Boston (MA), Addison-Wesley Professional, 2008, 925 p.
2. Spivak M. D. The Joy of TeX. Second Edition: A Gourmet Guide to Typesetting with the AMS-TeX Macro Package. Providence (RI), American Mathematical Society, 2004, 326 p.
3. Rozhenko A. I. The art of layout in LATEX [Iskusstvo verstki v LATEX'e]. Novosibirsk, The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, 2005, 397 p.
4. Karnaukhov V. M. LATEX application. Test work option generator: Monograph [Prilozhenie LATEX. Generator variantov kontrol'nykh rabot: Monografiya]. Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2012, 100 p.
5. Lubyagina E. N., Yurlova E. S. Preparation of educational assignments in LaTeX [Podgotovka uchebnykh zadaniy v LaTeX], *Mathematical Bulletin of Pedagogical Universities and Universities of the Volga-Vyatka Region [Matematicheskiiy vestnik pedvuzov i universitetov Volgo-Vyatskogo regiona]*, 2014, No. 16, Pp. 289–295.
6. Baldin E. M. LaTeX computer typography [Komp'yuternaya tipografiya LaTeX]. St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2008, 304 p.
7. Gilat A., Subramaniam V. V. Numerical Methods for Engineers and Scientists: An Introduction with Applications Using MATLAB. Third Edition. Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, 2014, 575 p.
8. Taranchuk V. B. Introduction to Mathematica graphics [Vvedenie v grafiku sistemy Mathematica]. Minsk, Belarusian State University, 2017, 53 p.
9. Kovács Z., Parisse B. Giac and GeoGebra — Improved Gröbner Basis Computations. In: *Gutierrez J. (eds) Computer Algebra and Polynomials: Applications of Algebra and Number Theory. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8942. 2015. Pp. 126–138. DOI: 10.1007/978-3-319-15081-9\_7.
10. Hobby J. D. A User's manual for MetaPost, *AT&T Bell Laboratories Computing Science Technical Report*, No. 162, Murray Hill (NJ), 1992, 89 p.
11. Knuth D. E. The METAFONTbook. Reading (MA), Addison-Wesley Publishing Company, 1995, 373 p.
12. Asymptote: The Vector Graphics Language, *SourceForge.net*. Available at: <http://asymptote.sourceforge.net> (accessed 04 Mar 2021).
13. LaTeXDraw — A vector drawing editor for LaTeX, *SourceForge.net*. Available at: <http://latexdraw.sourceforge.net> (accessed 04 Mar 2021).
14. Kiryutenko Yu. A. TikZ & PGF. Creating graphics in LaTeX2e documents [TikZ & PGF. Sozдание grafiki v LaTeX2e-dokumentakh]. Rostov-on-Don, 2014, 277 p. Available at: <http://elib.ict.nsc.ru/jspui/bitstream/ICT/1488/1/pgf-ru-all-method.pdf> (accessed 04 Mar 2021).
15. Tantau, T. The TikZ and PGF Packages. Manual for version 3.0.1a. August 29, 2015. Institut für Theoretische Informatik Universität zu Lübeck, 2015, 1161 p. Available at: <http://elib.ict.nsc.ru/jspui/handle/ICT/1487/1/pgfmanual.pdf> (accessed 04 Mar 2021).
16. Mertz A., Slough W. Graphics with PGF and TikZ, *TUGboat*, 2007, Vol. 28, No. 1 — Proceedings of the Practical TEX 2006 Conference, Pp. 91–99. Available at: [http://bepress-attached-resources.s3.amazonaws.com/uploads/2e/e6/b7/2ee6b797-aa18-4147-8e49-035ea8fd76c1/fulltext\\_stamped.pdf](http://bepress-attached-resources.s3.amazonaws.com/uploads/2e/e6/b7/2ee6b797-aa18-4147-8e49-035ea8fd76c1/fulltext_stamped.pdf) (accessed 04 Mar 2021).
17. Feuersänger C. Manual for Package PGFPLOTS: 2D/3D Plots in LaTeX. Version 1.15. May 06, 2017. 566 p. Available at: <http://elib.ict.nsc.ru/jspui/bitstream/ICT/954/4/pgfplots-.pdf> (accessed 04 Mar 2021).
18. Esayan A. R., Chubarikov V. N., Dobrovolskiy N. M., Yakushin A. V. Plotting with LaTeX package pgfplots: A study guide for university students [Postroenie grafikov sredstvami LaTeX-paketa pgfplots: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov]. Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University, 2015, 372 p.

19. PGFplots.net — Drawing plots and diagrams with LaTeX and PGFplots. Available at: <http://pgfplots.net> (accessed 04 Mar 2021).

20. Getreuer P. TikZ for High-Quality LaTeX Pictures, *Pascal Getreuer*. Available at: <http://getreuer.info/tutorials/tikz-for-high-quality-latex-pictures/index.html> (accessed 04 Mar 2021).

21. Chapman S. J. Fortran 90/95 for Scientists and Engineers. WCB/McGraw-Hill, 1998, 890 p.

22. Lurye A. I. Analytical mechanics [Analiticheskaya mekhanika]. Moscow, Fizmatgiz, 1961, 824 p.

# Когнитивно-синергетический подход к проектированию автоматических космических аппаратов с бортовыми системами, обладающими свойствами variability

В. С. Ковтун

Ракетно-космическая корпорация «Энергия»  
имени С. П. Королёва  
Королёв, Россия  
kovtun\_v11@mail.ru

А. Н. Павлов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский  
центр Российской академии наук  
Санкт-Петербург, Россия  
Pavlov62@list.ru

**Аннотация.** Увеличение ресурсного обеспечения полета автоматических космических аппаратов (АКА) при существующих проектных ограничениях по массе бортовых систем (БС) и мощности источников электроэнергии является важной научной проблемой. Один из способов решения проблемы заключается в формировании при проектировании и разработке систем управления взаимосвязей между элементами разных систем, позволяющих вести одновременное управление несколькими объектами управления (ОУ) с помощью одной системы, обеспечивая тем самым решение двух и более функциональных задач. При этом сокращается состав бортовых средств управления или при его сохранении образуются дополнительные функциональные резервы. Тем самым обеспечивается дополнительное ресурсное обеспечение и повышение живучести АКА.

В статье рассматривается общий подход к проектированию систем управления БС, одновременно выполняющих при синергетическом взаимодействии несколько функций. На примере проектирования фазированной антенной решетки бортового радиотехнического комплекса показана возможность практической реализации построения системы на основе предлагаемого подхода.

**Ключевые слова:** автоматический космический аппарат, фазированная антенная решетка, объект управления, синергия, variability, бортовые ресурсы, когнитивный, система.

## ВВЕДЕНИЕ

Для пополнения бортовых структурных и функциональных ресурсов АКА *синергетическими ресурсами* [1, 2], разработан *когнитивно-синергетический* («познающий совместную деятельность», от лат. *cognitio* «знание, познание» и греч. *συν-* — приставка со значением совместности и *εργον* «деятельность») системный подход к разработке и построению методов управления БС. Сущность подхода заключается в когнитивном системном исследовании характеристик АКА как открытой, нелинейной сложной технической системы с учетом синергетических явлений в его БС.

На основе когнитивно-синергетического подхода разработан новый принцип синергетически-variability проектирования систем управления, в состав которых входят *подсистемы*, обладающие *способностью управлять несколькими бортовыми процессами в разных объектах управления (свойством variability)*. Системы, имеющие такое свойство, получили название «variability систем-регуляторов процессов».

Для пояснения исходных положений принципа на рисунке 1 представлена схема динамической модели variability системы-регулятора процессов, где показаны две системы управления СУ1 и СУ2, имеющие синергетическую энергетическую взаимосвязь. Каждая из систем изначально состоит из управляющих подсистем УП1, УП2 и объектов управления ОУ1, ОУ2 [3]. В свою очередь каждый ОУ представлен своими блоками состояния БС1, БС2, являющимися бортовыми системами АКА, и блоками выхода БВ1, БВ2.

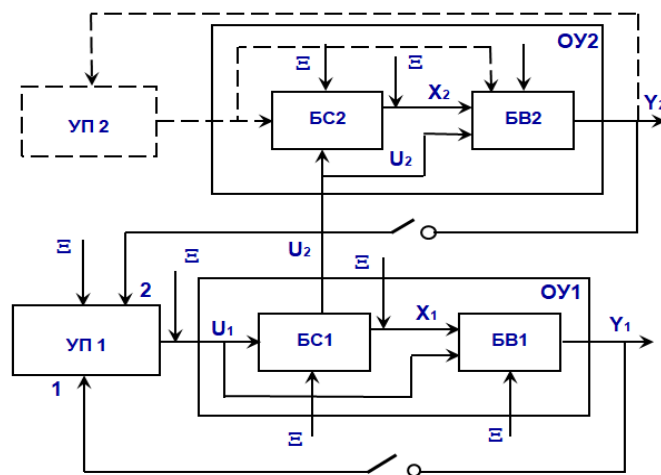


Рис. 1. Схема динамической модели variability системы-регулятора процессов в БС1, БС2

Кроме указанных, введены обозначения множеств:  $X_1, X_2$  — состояний ОУ1, ОУ2;  $Y_1, Y_2$  — выходов ОУ1, ОУ2;  $E$  — возмущающих воздействий;  $U_1, U_2$  — управляющих воздействий на ОУ1, ОУ2. При этом управление ведется через множества входных воздействий  $V_1$  и  $V_2$ , построенных на бинарных отношениях декартовых произведений  $V_1 = U_1 \times E, V_2 = U_2 \times E$ .

Как видно из рисунка 1, традиционное управление БС2 в СУ2 через УП2 заменено управлением через БС1, с учетом второй обратной связи между БВ2 и УП1. При этом выход БВ1 соединен с первым входом УП1. Управляющее воздействие  $U_1$  формируется с учетом того, что при выполнении БС1 своих функций, процессы одновременно формируют управляющее воздействие  $U_2$  для БС2. При этом соблюдается условие сохранения функциональности БС1, в том числе и после прекращения управления по линии  $U_2$ . БС1 в составе ОУ1 является «управляющей подсистемой» для БС2 в ОУ2. Наличие управления по линии  $U_2$  создает функциональный резерв управления ОУ2. Если линию не использовать, то для управления ОУ2 требуется задействовать дополнительную УП2. Таким образом, СУ1 обладает «свойством варибельности» в виде существующих вариантов управления БС1 или БС1 и БС2, то есть является одновременно системой-регулятором процессов в двух бортовых системах — БС1 и БС2.

Критерием для оценки свойства варибельной системы-регулятора процессов может служить коэффициент варибельности  $K_{var}$ , равный максимально возможному количеству процессов, управляемых одной системой. В рассмотренном случае  $K_{var} = 2$ . Использование синергетических явлений как результата взаимодействий процессов позволяет проектировать системы, управляющие сразу несколькими процессами.

В отличие от свойства многофункциональности систем, при котором отдельная система-регулятор процесса исполняет несколько функциональных назначений за счет своей структуры в виде множества элементов и отношений между ними, варибельные системы реализуют дополнительные функции за счет взаимодействия систем при наличии синергетических взаимосвязей в процессах. На рисунке 1 многофункциональность обозначалась бы множеством выходов ОУ1. Например, реактивные маховики (РМ), имеющие рекуперативные обмотки управления ротором, одновременно выполняют функции силового гироскопа и генератора электроэнергии при торможении ротора [4]. Тем самым каждый РМ является двухфункциональной системой. Следовательно, при соблюдении рассмотренного принципа синергетически-варибельного проектирования систем управления, многофункциональная система также может стать варибельной.

Задачей проектирования является получение и использование априорной информации о свойствах варибельности систем-регуляторов для создания новых методов управления АКА. Тем самым расширяется область поиска решений функциональных задач в сложном процессе управления полетом аппарата, дополняющих его структурные и функциональные бортовые ресурсы синергетическими ресурсами. Кроме того, варибельность систем-регуляторов процессов может обеспечить проведение заранее подготовленных технических мероприятий, повышающих

живучесть бортовых систем. Расчетным резервом для парирования аномальных полетных ситуаций при отказах являются элементы других варибельных систем управления, используемые в новом функциональном назначении.

#### ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время плоские фазированные антенные решетки (ФАР) находят все более широкое применение на борту АКА при решении задач обеспечения персональной спутниковой связи, в том числе ретрансляции сигналов персонального мобильного абонентского ствола и обмена специальной управляющей информацией с наземными средствами по магистральному каналу связи [5]. В силу целого ряда технических преимуществ ФАР постепенно «вытесняют» крупногабаритные зеркальные антенны. Первичным элементом ФАР являются излучатели радиосигнала, обеспечивающие электронное движение луча в одной плоскости [5]. Круговая управляемая (переключаемая) левого или правого направления вращения поляризация излучения и приема сигналов создается в системе ортогонально поляризованных излучателей с совмещенным фазовым центром.

Каждая ФАР содержит строительную плоскость, на которой размещается рабочая поверхность, сформированная из прямо-передающих модулей (ППМ) (рис. 2), объединенных в панели. Внешняя поверхность модулей состоит из набора излучателей одного вида.

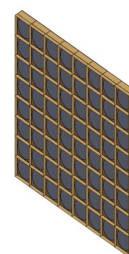


Рис. 2. Конструкция модуля ФАР

Каждый ППМ состоит из антенного полотна, выполненного в виде многослойной печатной платы, разбитой на ячейки (в качестве примера на рисунке 2 всего 64 квадратных ячейки с размещением  $8 \times 8$ ). При этом ППМ содержит излучатель, согласующую цепь, усилитель мощности, являющийся основным потребителем электроэнергии, аттенюатор и фазовращатель в каждой ячейке модульного элемента. Блоки управления аттенюаторами и фазовращателями, блок питания, распределительное устройство и устройства управления лучом и коррекции применяются по одному для нескольких ППМ одновременно [6], а их размещение на панелях позиционируется с размещением ППМ и производится внутри полотна на стыках модульных элементов. Высокочастотные токи, протекающие по несимметричным микрополосковым линиям и излучателям ППМ, постоянных магнитных моментов не создают [5]. Дополнительно в ФАР по цепям первичного и вторичного электропитания ППМ протекают токи, которые обладают собственными магнитными моментами [7].

Схема токовых контуров вторичного электропитания ППМ, спроецированная на рабочую поверхность модуля ФАР, представлена на рисунке 3, где показаны направления тока в модулях.

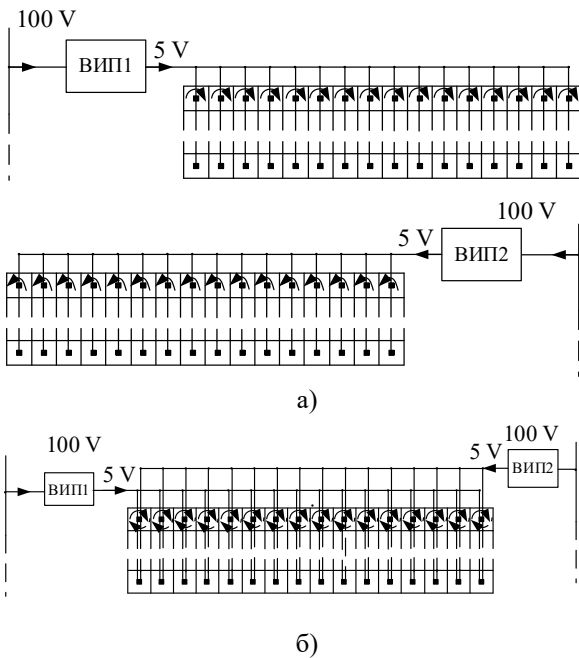


Рис. 3. Схема токовых контуров вторичного питания приемопередающих модулей  
 а — раздельного электропитания модулей;  
 б — с возможностью питания от одного из двух ВИП

Первичное электропитание обозначено линией с напряжением 100 В, а вторичное — линией с напряжением 5 В. При этом на рисунке 3, а показана схема раздельного электропитания модулей от вторичных источников питания (ВИП) ВИП1 и ВИП2 с разнонаправленным движением тока, а на рисунке 3, б — с возможностью электропитания модуля от одного из двух ВИП. Стрелками показаны направления тока в ППМ. Для примера рассмотрен ток потребления ППМ 30...40 мА, площадь контура, которую он охватывает в одной ячейке,  $\sim 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Количество ППМ в ФАР, со-

стоящей из четырех панелей, в каждой из которых 64 модульных элемента, содержащих по 64 ППМ, составит 16 384 шт. В результате расчета суммарный ток в цепях вторичного электропитания ППМ  $\sim 500 \dots 650 \text{ А}$ , а общая площадь контуров  $\sim 41 \text{ м}^2$ .

СИСТЕМА СИЛОВЫХ ГИРОСКОПОВ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Система силовых гироскопов (СГ) предназначена для управления угловым движением АКА. Управление ведется по закону сохранения кинетического момента для АКА как замкнутой системы путем обмена между кинетическими моментами корпуса АКА и системой СГ. Однако система не является полностью замкнутой, так как на нее действуют внешние силы, создающие возмущающие моменты, среди которых наиболее значимыми являются моменты гравитационных сил, светового давления и магнитного момента. При этом суммарный вектор кинетического момента аппарата  $\vec{G}(t)$  определен как сумма векторов кинетических моментов корпуса  $\vec{K}(t)$  и системы СГ  $\vec{H}(t)$  [8]:

$$\vec{G}(t) = \vec{K}(t) + \vec{H}(t), \quad \vec{G}(t) = \vec{G}_0(t) + \int_0^t M_\theta(t) dt,$$

где  $\vec{G}_0(t)$  — начальные значения вектора  $\vec{G}(t)$ ;  
 $M_\theta = M_{sd} + M_{ge} + M_{gm} + M_{gs} + M_{mm}$  — главный вектор внешнего момента ( $M_{sd}$  — момент силы светового давления  $F_{sd}$ ;  $M_{ge}, M_{gm}, M_{gs}$  — моменты от гравитационных сил Земли, Солнца и Луны соответственно);  
 $M_{mm} = \vec{L}_{cm} \times \vec{B}_E$ , — магнитный момент ( $\vec{L}_{cm}$  — собственный магнитный момент АКА,  $\vec{B}_E$  — вектор индукции магнитного поля Земли (МПЗ)).

Под действием  $M_\theta$  происходит накопление кинетического момента в системе СГ [9] до предельно возможных величин («насыщения») области  $S$  располагаемых значений. В качестве примера на рисунке 4 представлены варианты области  $S$  для разных конфигураций одноступенных СГ (реактивных маховиков).

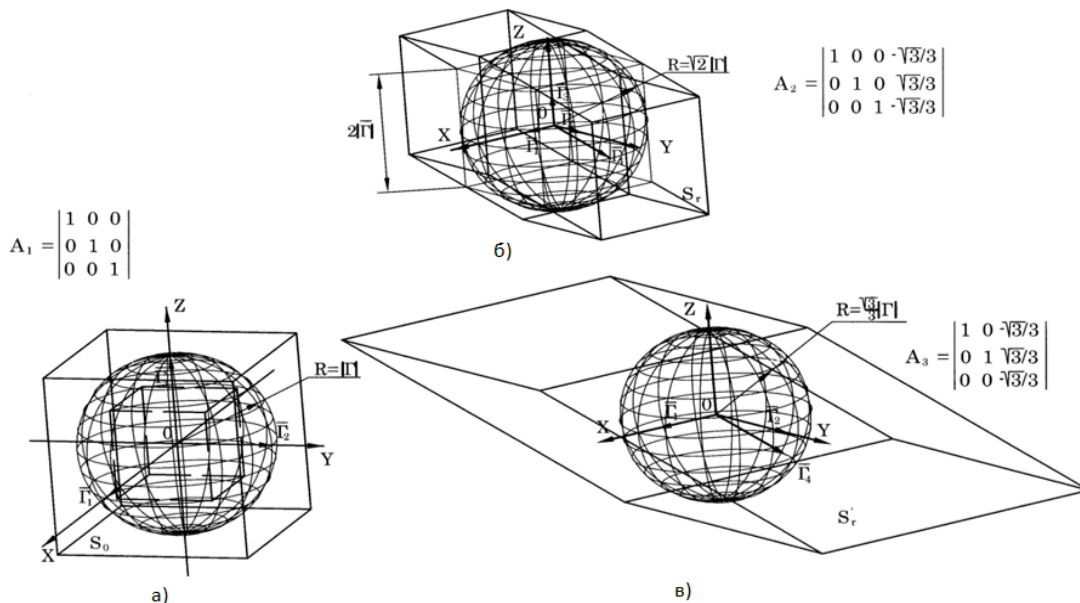


Рис. 4. Варианты области располагаемых значений вектора кинетического момента системы реактивных маховиков с осями вращения роторов трех маховиков вдоль осей связанного базиса и одного маховика — по диагонали куба с расположением ребер вдоль осей связанного базиса [10]

При этом приведены матрицы  $A$  направляющих косинусов кинетических моментов роторов однотипных маховиков  $\vec{L}_1 \dots \vec{L}_4$  и для сравнительного анализа проводится оценка областей  $S$  вписанной сферой радиусом  $R = |\vec{L}|$ .

После «насыщения» системы СГ производится ее разгрузка от накопленного кинетического момента. Одним из наиболее распространенных, много лет применяемых способов является магнитный способ разгрузки с использованием магнитных исполнительных органов (МИО) [11]. Применяемые методы разгрузки СГ от накопленного кинетического момента с использованием управляющего магнитного момента включают в себя следующие действия [12]:

- измерение текущего значения вектора накопленного кинетического момента  $\vec{H}$  в системе СГ;
- измерение вектора индукции МПЗ  $\vec{B}$ ;
- определение единичного вектора разгрузочного момента  $\vec{m}_r = \frac{\vec{L}_r}{|\vec{L}_r|} \times \frac{\vec{B}}{|\vec{B}|}$ ;
- формирование сигнала управления токовыми контурами путем изменения величины и направления протекания тока в МИО для обеспечения условий разгрузки СГ от накопленного кинетического момента

$$\vec{m}_r \times \vec{h} < 0, \quad \vec{h} = \frac{\vec{H}}{|\vec{H}|}. \quad (1)$$

Проектирование фазированной антенной решетки с управляемым собственным магнитным моментом

При проектировании ФАР величина и направление тока в контуре питания ППМ определяются  $p$ -ми режимами работы ФАР — «приема», «передачи», «приема-передачи» радиосигналов разной мощности, где  $p = 1, 2, \dots, P$  — число режимов работы ФАР, каждый из которых обеспечивается электропитанием в  $q$ -х контурах вторичного питания ППМ, где  $q = 1, 2, \dots, Q$  — множество токовых контуров.

В результате для каждого модуля ФАР рассчитывается величина и направление векторов собственных магнитных моментов. При этом они могут иметь как положительные  $\vec{L}_{p1}^+ \dots \vec{L}_{pn}^+$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $N \subset Q$  (рис. 5), так и отрицательные  $\vec{L}_{p1}^- \dots \vec{L}_{pm}^-$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $M \subset Q$  направления (рис. 6).

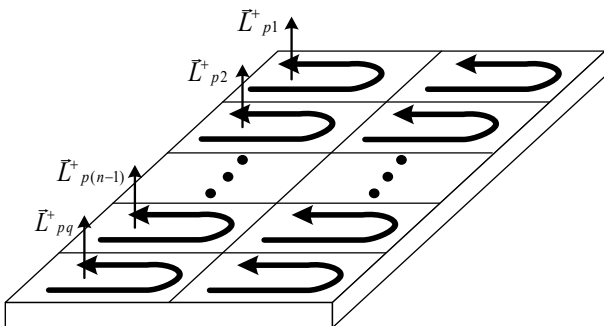


Рис. 5. Положительные направления магнитных моментов токовых контуров

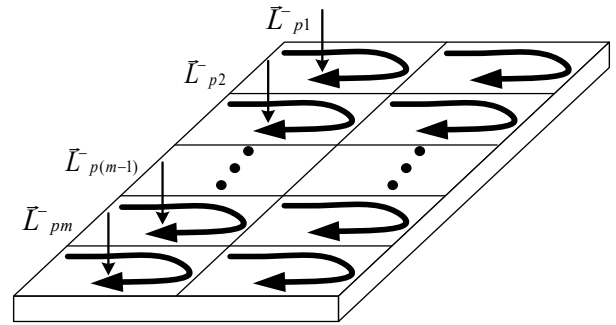


Рис. 6. Отрицательные направления магнитных моментов токовых контуров

Значения векторов магнитных моментов имеют расхождение из-за разницы в площадях и токах контуров. Поэтому при наземных испытаниях ФАР в  $q$ -х ППМ в каждом  $p$ -м режиме работы измеряют значения токов  $I_{pq}$  в контурах питания и определяют их площади  $S_{pq}$ . Для определения площадей применяют термографы (тепловизоры). Площади определяют по снимкам электрических (или тепловых) полей схем питания ППМ, полученных с термографов (тепловизоров) [5].

Направления нормалей  $\vec{n}_{pq}$  к каждому токовому контуру питания ППМ определяют исходя из логики работы переключателей антенной решетки по алгоритму коммутации схемы питания. По этим данным вычисляют магнитные моменты ППМ:  $\vec{L}_{pq} = I_{pq} \times S_{pq} \times \vec{n}_{pq}$ .

По собственным магнитным моментам каждого модуля рассчитывают магнитные моменты для панели ФАР в целом, в каждом  $p$ -м режиме ее работы  $\vec{L}_p = \sum_{q=1}^Q \vec{L}_{pq}$ , при этом значения  $q$  могут принимать как  $n$ -е, так и  $m$ -е значения (рис. 5, 6).

Следовательно, проектным расчетно-экспериментальным методом можно определить собственный магнитный момент панели ФАР в каждом  $p$ -м режиме работы. Без потери функциональности ФАР с помощью разных вариаций в коммутации питания модулей формируются магнитные моменты разного знака. За счет целенаправленного создания управляемого тракта питания отдельных модулей создаются режимы работы панелей ФАР, в которых суммируются только положительные ( $\vec{L}_p := \vec{L}_p^+$ ) или отрицательные ( $\vec{L}_p := \vec{L}_p^-$ ) собственные магнитные моменты. Существуют варианты режимов работы, при которых векторы разных знаков взаимно компенсируются, в таких случаях панель является «магнитоуравновешенной» ( $\vec{L}_p \approx 0$ ). При отключении питания всех модулей ФАР решетка также является «магнитоуравновешенной».

АЛГОРИТМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ РАЗГРУЗКИ СИСТЕМЫ СИЛОВЫХ ГИРОСКОПОВ ОТ НАКОПЛЕННОГО КИНЕТИЧЕСКОГО МОМЕНТА

Алгоритм разгрузки СГ от накопленного кинетического момента с использованием ФАР в качестве МИО включает в себя следующие шаги:

- 1) измерение значения вектора кинетического момента  $\vec{H}$ , накопленного в системе СГ;

2) выбор по выполнению условия разгрузки СГ (1) для  $\vec{m}_r = \vec{m}_p$ , где  $\vec{m}_p = \frac{\vec{L}_p \times \vec{B}}{|\vec{L}_p \times \vec{B}|}$ ,  $\vec{L}_p := \vec{L}_\Sigma^- \vee \vec{L}_p := \vec{L}_\Sigma^+$   $\hat{p}$ -х режимов работы ФАР ( $\hat{p} \in P$ ), обеспечивающих разгрузку СГ от накопленного кинетического момента;

3) определение значения проекций вектора разгрузочного момента  $\pi_{\vec{h}} \vec{M}_p$  на направление вектора  $\vec{h}$ :

$$|\pi_{\vec{h}} \vec{M}_p| = |\vec{L}_p \times \vec{B}| (\vec{h} \times \vec{m}_p),$$

где  $\vec{m}_p$ ,  $\vec{L}_p$  — значения векторов  $\vec{m}_p$ ,  $\vec{L}_p$  для  $\hat{p}$ -х режимов работы ФАР;

4) выбор  $\hat{p}'$ -го режима работы ФАР по максимальному значению  $\max |\pi_{\vec{h}} \vec{M}_p|$  для разгрузки системы СГ;

5) разгрузка СГ путем включения в работу  $\hat{p}'$ -го режима работы ФАР с контролем выполнения условия

$$\vec{m}_{p'} \times \vec{h} \geq 0, \quad (2)$$

где  $\vec{m}_{p'}$  — значение вектора  $\vec{m}_p$  для  $\hat{p}'$ -го режима;

б) повторный выбор режима работы ФАР после выполнения условия (2) путем воспроизведения шагов 1–4;

7) завершение разгрузки СГ при получении значения  $\vec{H} \approx 0$  выбором «магнитоуравновешенного» режима работы ФАР.

*Оценка эффективности управляющего момента.* Для случая однонаправленного расположения магнитных моментов токовых контуров в цепях вторичного электропитания ранее рассмотренной ФАР порядок величин суммарного значения собственного магнитного момента составляет  $L = |\vec{L}_p|_\Sigma \sim 1 \times 10^4 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ .

Проводится оценка управляющего момента для АКА, содержащего ФАР и находящегося на геостационарной орбите, где  $|\vec{B}| \sim 1 \times 10^{-7} \text{ Тл}$ . При этом рассмотрен случай штатной орбитальной ориентации АКА на ГСО, когда вектора  $\vec{L}$  и  $\vec{B}$  взаимно перпендикулярны. Тогда порядок величин управляющего момента  $M_L$  по модулю будет равен

$$M_L = |\vec{L} \times \vec{B}| \sim 1 \times 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сравнительные оценки показали, что магнитный управляющий момент имеет тот же порядок величин, что и суммарные моменты гравитационных сил и сил светового давления, действующих на АКА [13].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе когнитивно-синергетического системного подхода к управлению полетом АКА разработан новый принцип синергетически-вариабельного проектирования систем управления. Спроектированная согласно данному принципу вариабельная система управления содержит управляющую подсистему, обладающую способностью регулировать работу нескольких бортовых систем, что позволяет: уменьшить массу бортовых средств управления полетом АКА; уменьшить бортовой расход электроэнергии за счет исключения дополнительных потребителей; получить дополнительный функциональный резерв на борту АКА.

Рассмотрена синергетическая энергетическая взаимосвязь между системой управления фазированной антенной решеткой (СУ ФАР) и системой силовых гироскопов (СУ СГ). При этом в СУ ФАР объектом управления

является ФАР, а подсистемой управления — цепи первичного и вторичного электропитания приемо-передающих модулей. В СУ СГ объектом управления является СГ, а подсистемой управления кинетическим моментом — магнитный исполнительный орган системы ориентации АКА. Синергетическая энергетическая взаимосвязь между двумя системами управления в виде магнитных моментов токовых контуров в цепях электропитания ППМ, взаимодействующих с МПЗ и кинетическим моментом в системе СГ, позволила провести проектную доработку СУ ФАР для ее использования в качестве МИО. Тем самым СУ ФАР наделена свойством вариабельности, позволяющим стать системой-регулятором сразу для двух физических процессов: управления радиосигналами спутниковой связи в ФАР и управления кинетическим моментом в системе СГ. Получен дополнительный функциональный ресурс на борту АКА для разгрузки СГ от накопленного кинетического момента, который может заменить или дополнить существующий.

Применение принципа синергетически-вариабельного проектирования систем управления позволяет решать задачи по дополнительному ресурсному обеспечению АКА и повышению его живучести.

Техническое решение защищено патентом РФ [14].

#### ЛИТЕРАТУРА

- Ковтун, В. С. Когнитивная агрегативно-поточковая мета-модель процесса управления полетом автоматического космического аппарата // Вестник Самарского государственного университета. Серия «Технические науки». 2020. Т. 28, № 3 (67). С. 35–60. DOI: 10.14498/tech.2020.3.3.
- Ахметов, Р. Н. Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полетных ситуациях / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14, № 4. С. 17–37. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-17-37.
- Охтилев, М. Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. — Москва: Наука, 2006. — 409 с. — (Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения / Рос. акад. наук).
- US Patent No. 6019319, Int. Cl.<sup>7</sup> B64/G 1/28. Momentum Wheel Energy Storage System Using Magnetic Bearings: Appl. No. 08/598346: filed 08.02.1996: publ. 01.02.2000 / Falbel G. — 7 p.
- Вендик, О. Г. Антенны с электронным движением луча (Введение в теорию) / О. Г. Вендик, М. Д. Парнес; под ред. Л. Д. Бахраха. — [Санкт-Петербург], 2001. — 250 с.
- Формирование диаграммы направленности плоской активной фазированной решетки с произвольной границей раскрытия / Д. Д. Габриэлян, М. Ю. Звездина, И. Г. Цыпорина, [et al.] // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 12. С. 14.
- Воробьев, С. Н. Выбор элементной базы для систем вторичного электропитания приемо-передающих модулей АФАР // Компоненты и технологии. 2014. № 10 (159). С. 36–40.
- Раушенбах, Б. В. Управление ориентацией космических аппаратов / Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь. — Москва:

Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1974. — 600 с.

9. Патент № 2112713 Российская Федерация, МПК В64G 1/24. Способ управления космическим аппаратом с помощью реактивных исполнительных органов при поддержании заданной ориентации: № 96109536/28: заявл. 16.05.1996: опубл. 10.06.1998 / Ковтун В. С., Платонов В. Н.; заявитель Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева. — 23 с.

10. Ковтун, В. С. Методы управления геостационарным спутником с помощью маховиков и электроракетных плазменных двигателей // Космонавтика и ракетостроение. 2009. № 2 (55). С. 60–68.

11. Шереметьевский, Н. Н. Простая надежная система сброса кинетического момента для искусственных спутников Земли, ориентированных в орбитальной системе координат / Н. Н. Шереметьевский, Р. И. Бихман // Управление в пространстве: Труды VI Международного симпозиума ИФАК по автоматическому управлению в пространстве (г. Цахкадзор, СССР, 26–31 августа 1974 г.): в 2 т. / отв. ред.: Б. Н. Петров, В. Ю. Рутковский. — Москва:

Наука, 1976. — Т. 1: Совместный полет космических кораблей «Союз-Аполлон». Системы управления. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. — С. 110–118.

12. Коваленко, А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. — Москва: Машиностроение, 1975. — 248 с.

13. Патент № 2176972 Российская Федерация, МПК В64G 1/24. Способ определения магнитного момента солнечных батарей космического аппарата с системой силовых гироскопов: № 2000130187/28: заявл. 05.12.2000: опубл. 20.12.2001 / Ковтун В. С., Банит Ю. Р.; заявитель ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева». — 13 с.

14. Патент № 2604268 Российская Федерация, МПК В64G 1/36 (2006.01). Способ формирования управляющих воздействий на космический аппарат с фазированной антенной решёткой: № 2015114964/28: заявл. 21.04.2015: опубл. 10.12.2016 / Ковтун В. С., Платонов В. Н., Фролов И. В., Ермаков П. Н.; заявитель ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева». — 18 с.

# Cognitive-Synergetic Approach to the Design of Automated Spacecraft with Onboard Systems with Variability Properties

V. S. Kovtun

S. P. Korolev Rocket and Space  
Public Corporation Energia  
Korolev, Russia  
kovtun\_v11@mail.ru

A. N. Pavlov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy,  
St. Petersburg Federal Research Center  
of the Russian Academy of Sciences  
Saint Petersburg, Russia  
pavlov62@list.ru

**Abstract.** Increasing the resource support for the flight of automatic spacecraft (AS) under the existing design restrictions on the mass of onboard systems (OS) and the power of power sources is an important scientific problem. One of the ways to solve the problem is to form relationships between elements of different systems during the design and development of control systems, which allow simultaneous control of several control objects (CO) using one system, thereby providing the solution of two or more functional tasks. At the same time, the composition of on-board controls is reduced or additional functional reserves are formed while maintaining it. This provides additional resources and increases the survivability of the AS.

The article discusses a general approach to the design of OS control systems that simultaneously perform several functions in synergistic interaction. The possibility of practical implementation of the system construction based on the proposed approach is shown by the example of designing a phased antenna array of an on-board radio engineering complex.

**Keywords:** automatic spacecraft, phased array antenna, control object, synergy, variability, onboard resources, cognitive, system.

## REFERENCES

1. Kovtun V. S. Cognitive Aggregate-Flow Metamodel of the Process Automatic Spacecraftflight Control [Kognitivnaya agregativno-potokovaya metamodel' protsessa upravleniya poletom avtomaticheskogo kosmicheskogo apparata], *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series [Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskie nauki»*], 2020, Vol. 28, No. 3 (67), Pp. 35–60. DOI: 10.14498/tech.2020.3.3.
2. Akhmetov R. N., Makarov V. P., Sollogub A. V. Bypass as an Attribute of Unmanned Spacecraft Operability in Anomalous Flight Situations [Baypasnost' kak atribut zhivuchesti avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov v anomal'nykh poletnykh situatsiyakh]. *Vestnik of the Samara State Aerospace University [Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Koroleva]*, 2015, Vol. 14, No. 4, Pp. 17–37. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-17-37.

3. Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects [Intellectual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov]. Moscow, Nauka Publishers, 2006, 409 p.

4. US Patent No. 6019319, Int. Cl.<sup>7</sup> B64/G 1/28. Falbel G. Momentum Wheel Energy Storage System Using Magnetic Bearings. Appl. No. 08/598346, filed February 08, 1996, Publ. February 01, 2000, 7 p.

5. Vendik O. G., Parnes M. D. Antennas with electronic beam movement [Antenny s elektronnyim dvizheniem lucha]. St. Petersburg, 2001, 250 p.

6. Gabriel'yan D. D., Zvezdina M. Yu., Tsygorina I. G., et al. Beam Forming Method for Active Phased Antenna Array with Arbitrary Aperture Boundary [Formirovanie diagrammy napravlenosti ploskoy aktivnoy fazirovannoy reshetki s proizvol'noy granitsey raskryva], *Journal of Radio Electronics [Zhurnal radioelektroniki]*, 2012, No. 12. P. 14.

7. Vorobyov S. N. Choice of Element Base for the Secondary Power Supply Systems for AFAR Transceiver Modules [Vybor elementnoy bazy dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya pri moperedayushchikh moduley AFAR], *Components and Technologies [Komponenty i tekhnologii]*, 2014, No. 10, Pp. 36–40.

8. Raushenbakh B. V., Tokar' E. N. Control of spacecraft orientation [Upravlenie orientatsiy kosmicheskikh apparatov]. Moscow, Nauka Publishers, 1974, 600 p.

9. Kovtun V. S., Platonov V. N. A method for Controlling a Spacecraft Using Reactive Executive Bodies While Maintaining a Given Orientation [Sposob upravleniya kosmicheskim apparatom s pomoshch'yu reaktivnykh ispolnitel'nykh organov pri podderzhanii zadannoy orientatsii], patent RU No. 2112713, published at June 10, 1998, 23 p.

10. Kovtun V. S. GSO Satellite Control Techniques by Means of Reaction-Wheels and Plasma Electrojet Engines [Metody upravleniya geostatsionarnym sputnikom s pomoshch'yu makhovikov i elektroraketnykh plazmennyykh dvigateley]. *Cosmonautics and rocket science [Kosmonavtika i raketrostroenie]*, 2009. No.2 (55). Pp. 60–68.

11. Sheremetyevsky N. N., Bikhman R. I. Simple Reliable System of Kinetic Moment Reset for Artificial Earth Satellites Oriented in the Orbital Coordinate System [Prostaya nadezhnaya sistema sbrosa kineticheskogo momenta dlya iskusstvennykh sputnikov Zemli, orientirovannykh v orbital'noy sisteme koordinat]. In: *Control in space: Proceedings of the VI International IFAC Symposium on Automatic Control in Space [Upravlenie v prostranstve: Trudy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma IFAK po avtomaticheskomu upravleniyu v prostranstve] (Tsakhkadzor, USSR, August 26–31, 1974), Vol. 1.* Moscow, Nauka Publishers, 1976, Pp. 110–118.

12. Kovalenko A. P. Spacecraft magnetic control systems [Magnitnye sistemy upravleniya kosmicheskimi letatel'nymi apparatami]. Moscow, Mashinostroenie Publishers, 1975, 320 p.

13. Kovtun V. S., Banit Ju. R. Method of Determination of Magnetic Moment of Solar Batteries of Spacecraft Provided with Powered Gyroscope System [Sposob opredeleniya magnitnogo momenta solnechnykh batarey kosmicheskogo apparata s sistemoy silovykh giroskopov], patent RU No. 2176972, published at December 20, 2001, 13 p.

14. Kovtun V. S., Platonov V. N., Frolov I. V., Ermakov P. N. Method for Generating Control Actions on a Spacecraft with Phased Antenna Structure [Sposob formirovaniya upravlyayushchikh vozdeystviy na kosmicheskii apparat s fazirovannoy antennoy reshetkoy] patent RU No. 2604268, published at December 10, 2016, 18 p.

# Структурно-функциональный анализ надежности цепи поставок при наличии колебаний спроса

А. Н. Павлов

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский  
центр Российской академии наук,  
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия  
Pavlov62@list.ru

Д. А. Павлов, В. Н. Воротягин, А. Б. Умаров

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия  
Dpavlov239@mail.ru, Vorotyagin@rambler.ru,  
Antropicier737@gmail.com

**Аннотация.** Представлен подход к моделированию, оцениванию и анализу структурно-функциональной надежности и живучести цепей поставок в условиях колебания спроса. В данной статье предлагается концепция параметрического генома структуры сложных многорежимных объектов для вычисления интегральных показателей структурно-функциональной надежности цепи поставок с динамическими заказами потребителей.

**Ключевые слова:** цепи поставок, параметрический геном, структурно-функциональный анализ, надежность.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе реализации управления цепями поставок (ЦП) на практике менеджеры сталкиваются с проблемой их адаптации при внеплановых заказах и индивидуальных технологических и экономических требований клиентов. Каким образом, с помощью каких методик и технологий оценить надежность и устойчивость функционирования ЦП в случае возникновения более или менее серьезных отклонений и нарушений, колебаний спроса. Так, потери из-за недополученных заказов, штрафы и неустойки в отдельных ЦП достигают до 15% годового оборота [1]. В современном управлении цепями поставок конечный потребитель продукции стал важнейшим звеном. Поэтому одна из ключевых причин повышения надежности и живучести ЦП вызвана необходимостью удовлетворения их потребностей с учетом изменяющегося спроса. Данная проблематика находит отражение в работах [2–11].

При этом следует отметить, что современной тенденцией понимания эффективности ЦП является проектирование таких ЦП, которые бы характеризовались высоким уровнем экономической эффективности и необходимым уровнем живучести [12, 13]. Представляется, что в ближайшие годы можно будет говорить о смене парадигмы оптимизации ЦП: переходе от минимизации затрат к обеспечению баланса эффективности и живучести. В связи с этим перспективным направлением будущих исследований является разработка моделей и формул расчета структурно-функциональных показателей надежности и живучести ЦП с учетом колебаний спроса.

## КОНЦЕПЦИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНОМА СТРУКТУРЫ.

### ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЦЕПИ ПОСТАВОК

Указанные показатели должны использоваться как дополнение к показателям экономической эффективности и характеризовать целевой (функциональный) конфликт «эффективность или надежность» с объективных позиций [1]. Для анализа свойства структурно-функциональной надежности и живучести ЦП, а также для структурно-функционального синтеза системы, соответствующей заданному уровню структурной надежности и живучести, необходимо ввести количественную меру.

Как правило, структурно-функциональный анализ сложных объектов, к которым относятся ЦП, начинается с построения их схемы функциональной целостности (СФЦ) [14, 15]. СФЦ сложного объекта позволяет графически представить логические условия реализации собственных функций элементами и подсистемами, а также цели моделирования – логические условия реализации исследуемого системного свойства, например, безотказности или отказа, безопасности или возникновения аварии, реализации тех или иных режимов функционирования объекта и т. п. В состав построенной схемы входят функциональные элементы (ФЭ), представляющие собой различные технологические операции, подсистемы, блоки, узлы, связи различной физической природы. В самом общем случае функциональные вершины СФЦ отражают как работоспособность тех или иных ФЭ (для ЦП это могут быть поставщики, заводы-производители, склады, дистрибуторы, провайдеры и др.), так и потребности в реализации тех или иных функций (например, заказы клиентов).

Следует отметить, что заказы потребителей ЦП различаются с точки зрения как характера, так и интенсивности их поступления. Во-первых, те или иные заказы могут быть основными или вспомогательными. Другими словами, некоторые или все заказы могут являться несовместными, то есть выполняться поочередно, также отдельные заказы могут поступать одновременно с другими. Во-вторых, заказы

состоят в различных долях времени поступления на заданном интервале времени либо в различных значениях вероятности поступления на заданном интервале, т. е. могут носить детерминированный или случайный динамический характер. Поэтому требуется провести анализ и оценивание показателей структурно-функциональной надежности ЦП в условиях совместного и раздельного поступления динамических заказов клиентов.

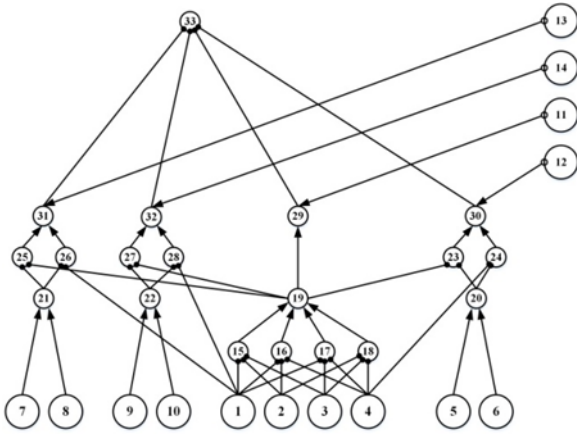


Рис. 1. Схема функциональной целостности ЦП

Используя программный комплекс логико-вероятностного моделирования «Арбитр» [14], получим для СФЦ ЦП вероятностный полином успешного ее функционирования:

$$\mathfrak{R}(P_1, P_2, \dots, P_n, P_{n+1}, \dots, P_{n+m}, Q_1, Q_2, \dots, Q_n, Q_{n+1}, \dots, Q_{n+m}), \quad (1)$$

где  $P_i(Q_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$  — вероятность безотказной работы (отказа) ФЭ ЦП, а  $P_{n+i}(Q_{n+i} = 1 - P_{n+i})$ ,  $i = 1, \dots, m$  можно интерпретировать либо как вероятность поступления (не поступления) заказа от потребителя, либо как относительный размер (интенсивность) от 0 до 1 поступления (отсутствия) заказа клиента.

Обозначим интенсивности поступления заказов клиентов ЦП через  $\alpha_i = P_{n+i}$ ,  $i = 1, \dots, m$ . Далее, исходя из предположения, что все ФЭ ЦП однородные по вероятности безотказной работы, т. е.  $P_1 = P_2 = \dots = P_n = P$ , вероятностный полином успешного функционирования ЦП (1) можно преобразовать к следующему виду:

$$\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^2 + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n \quad (2)$$

По аналогии с введенным в работе [15–18] понятием генома структуры, назовем вектор

$$\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = (\chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), \dots, \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m))^T$$

**параметрическим геномом структуры.**

Используя параметрический геном структуры ЦП, можно вычислить оценки структурно-функциональной надежности ЦП, зависящие от параметров  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  интенсивности поступления заказов клиентов.

Так, в случае вероятностного описания безотказной работы ФЭ для однородной структуры (одинаковая вероятность безотказной работы ФЭ) функция успешного функционирования ЦП, представленная полиномом

$$\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^2 + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)P^n$$

изменяет свои значения в интервале  $[0, 1]$ . Причем чем ближе график функции к прямой  $\mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 1$ , тем выше структурно-функциональная надежность ЦП. Поэтому в качестве показателя структурно-функциональной надежности в этом случае предлагается использовать

$$F_{однор}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP.$$

Тогда для вычисления показателя структурно-функциональной надежности ЦП можно использовать параметрический геном структуры по формуле

$$F_{однор}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP = \sum_{i=0}^n \chi_i(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \times \frac{1}{i+1}$$

или

$$F_{однор}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \mathfrak{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP = \vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \times (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{n+1})^T. \quad (3)$$

В случае неоднородной структуры (различная вероятность безотказной работы ФЭ) можно использовать в качестве показателя структурно-функциональной надежности ЦП

$$F_{неоднор}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \int_0^1 \dots \int_0^1 \mathfrak{R}(P_1, P_2, \dots, P_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) dP_1 dP_2 \dots dP_n$$

или с использованием параметрического генома структуры формулу

$$F_{неоднор}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \times (1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2^2}, \dots, \frac{1}{2^n})^T. \quad (4)$$

В случае, когда при выполнении функций ФЭ, входящих в структуру ЦП, не удастся выявить хорошо определенную стохастическую закономерность безотказной работы, то предлагается использовать нечетко-возможностный подход к описанию поведения ФЭ, в основе которого лежит понятие пространства с мерой возможности [15–17].

Так, в качестве показателя (5) структурно-функциональной надежности ЦП при нечетко-возможностном описании поведения его ФЭ можно использовать [15–17] нечеткий интеграл по мере возможности

$$F_{однорвозм}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = \sup_{\mu \in [0,1]} \min\{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), g(\mu)\} = \sup_{\gamma \in [0,1]} \min\{\gamma, G(\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\})\}. \quad (5)$$

Для вычисления данного показателя следует определить меру возможности  $G$  и, если возможно, ее функцию распределения  $g(\mu)$ .

Для *монотонных однородных структур* график полинома возможности безотказной работы  $R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  имеет вид, представленный на рисунке 2. Здесь полином

$$R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = \chi_0(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) + \chi_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)\mu + \chi_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)\mu^2 + \dots + \chi_n(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)\mu^n$$

получается из полинома  $\mathcal{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  заменой вероятности  $P$  безотказной работы ФЭ на возможность  $\mu$  безотказной работы ФЭ ЦП. В качестве меры возможности будем использовать

$$G(\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma) = G(H_\gamma) = \sup_{A \subseteq H_\gamma} |A| = \sup_{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma} \{1 - \mu\},$$

где  $|A|$  — мера Лебега.

Следовательно, в случае монотонных однородных структур функцией распределения меры возможности является  $g(\mu) = 1 - \mu$ .

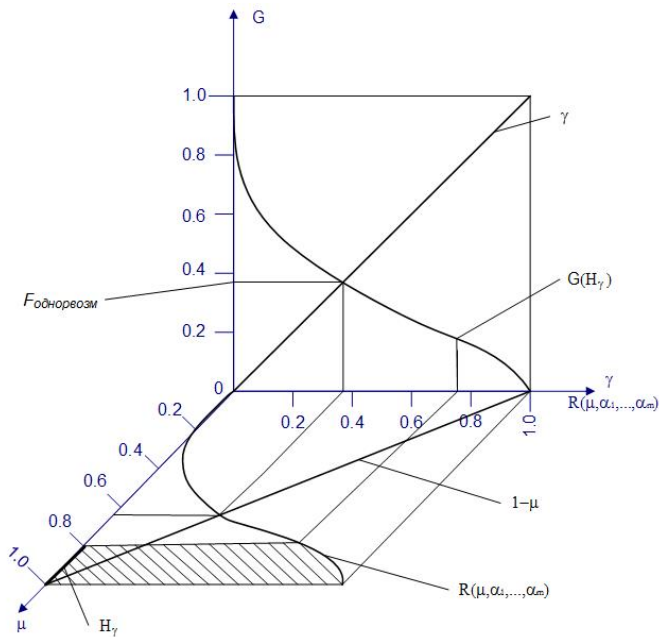


Рис. 2. Графическая интерпретация нахождения показателя возможности безотказной работы однородных структур

Тогда для рассматриваемого случая нечетко-возможностного описания безотказной работы ФЭ ЦП показатель возможности безотказной работы монотонной однородной структуры можно вычислять по формуле

$$F_{одноразим}(\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)) = 1 - \mu_*, \tag{6}$$

где  $\mu_*$  — решение уравнения

$$\vec{\chi}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \times (1, \mu_*, \mu_*^2, \dots, \mu_*^n)^T = 1 - \mu_*.$$

Для *немонотонных однородных структур* полином возможности безотказной работы  $R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$  либо не сохраняет «0» ( $R(0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 1$ ), либо не сохраняет «1» ( $R(1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 0$ ). Графики полиномов возможности безотказной работы представлены на рисунке 3.

Мера возможности, когда  $R(1, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 0$ , есть

$$G(\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma) = G(H_\gamma) = \sup_{A \subseteq H_\gamma} |A| = \sup_{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma} \{\mu^{max} - \mu^{min}\},$$

где  $\mu^{max} = \sup\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\}$

и  $\mu^{min} = \inf\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma\}$ .

Мера возможности, когда  $R(0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = 1$ , есть

$$G(\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma) = G(H_\gamma) = \sup_{A \subseteq H_\gamma} |A| = \sup_{R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \geq \gamma} \{1 - (\mu^{max} - \mu^{min})\},$$

где  $\mu^{max} = \sup\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \leq \gamma\}$

и  $\mu^{min} = \inf\{\mu | R(\mu, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \leq \gamma\}$ .

Графическая интерпретация нахождения показателя возможности безотказной работы в данном случае представлена на рисунке 3.

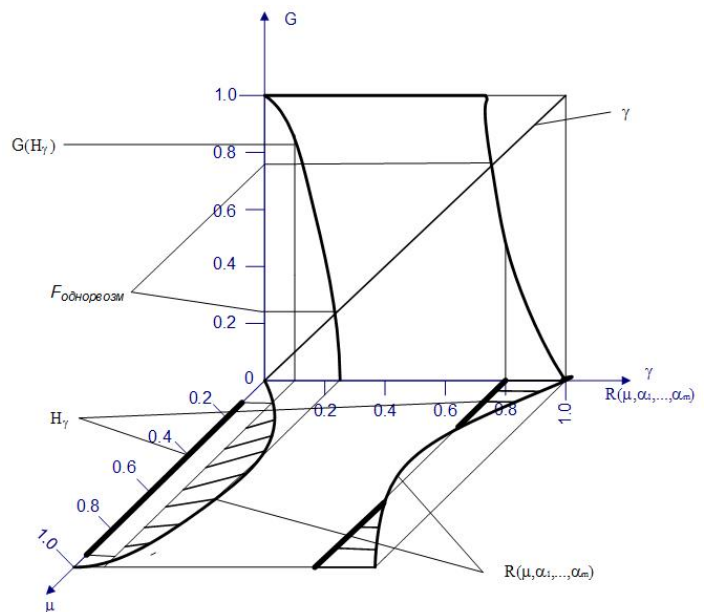


Рис. 3. Графическая интерпретация нахождения показателя возможности безотказной работы немонотонных однородных структур

Для исследования структурно-функциональной надежности ЦП целесообразно использовать возможности общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) [14] и ввести некоторые «веса» заказов, которые бы учитывали вышеуказанные различия. Весовые коэффициенты предлагается вводить следующим образом. Весовой коэффициент находится как отношение средней суммарной длительности поступления заказа в течение рассматриваемого временного интервала работы ЦП к величине этого интервала.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЦЕПИ ПОСТАВОК

Фрагмент полинома СФЦ ЦП, представленной на рисунке 1, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}(P, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) = & P^4(1 - P)^6(1 - \alpha_2)(1 - \alpha_4) + \\ & + P^2(1 - P)^3(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)\alpha_3(1 - \alpha_4) + \dots \\ & \dots - 4P^5(1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2)\alpha_3(1 - \alpha_4). \end{aligned}$$

Для проведения исследования структурно-функциональной надежности ЦП воспользуемся формулами (3)–(5). При этом будем предполагать, что все заказы могут выполняться как индивидуально, так и совместно.

Результаты вычислений для  $\alpha_i \in \{0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1\}$ ,  $i = 1, \dots, 4$  представлены на рисунке 4.

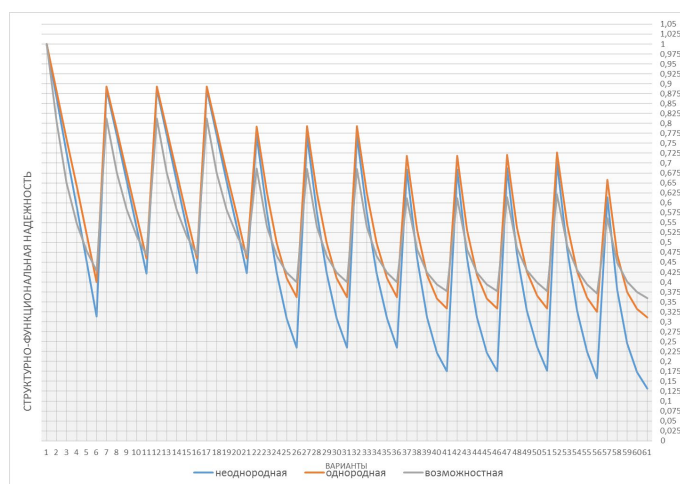


Рис. 4. Структурно-функциональная надежность ЦП

Вариант № 1 соответствует отсутствию заказов ( $\alpha_1 = 0; \alpha_2 = 0; \alpha_3 = 0; \alpha_4 = 0$ ). Варианты с № 2 по № 6 отражают постепенное повышение от 0,2 до 1,0 интенсивности поступления заказа 1 (вершина СФЦ № 11) с шагом 0,2. Варианты с № 7 по № 11, с № 12 по № 16, с № 17 по № 21 соответствуют повышению интенсивности поступления заказов 2, 3, 4 (вершины СФЦ № 12, № 13, № 14) соответственно.

Далее варианты с № 22 по № 26, с № 27 по № 31, с № 32 по № 36 отражают структурно-функциональную надежность постепенного повышения совместного поступления двух заказов 1 и 2, 1 и 3, 1 и 4 соответственно. Затем расположены варианты совместного поступления трех заказов (1, 2, 3; 1, 2, 4; 1, 3, 4; 2, 3, 4). И, наконец, варианты с № 57 по № 61 — совместное поступление четырех заказов. Следует отметить, что при индивидуальном поступлении заказов структурно-функциональная надежность ЦП является более высокой, чем при совместном поступлении этих заказов. Кроме того, из графиков видно, что структурно-функциональная надежность имеет кусочно-линейную зависимость при изменении интенсивностей поступления отдельно взятых заказов. Причем для однородной ЦП нельзя явно выделить наилучший вариант совместного поступления заказов в отличие от неоднородной системы.

На рисунке 5 представлены изменения значений показателей структурно-функциональной надежности ЦП при

переходе от совместного к раздельному поступлению заказов. Прокомментируем полученные результаты.

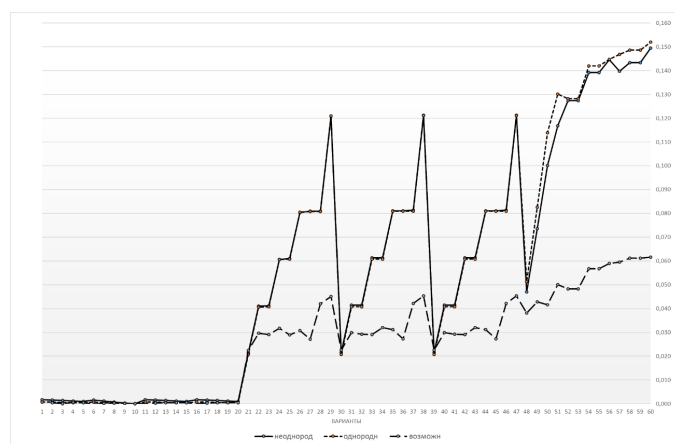


Рис. 5. Приращения значений показателей структурно-функциональной надежности ЦП при раздельном поступлении заказов

Первые 20 вариантов отражают одиночное поступление заказов с постепенным повышением интенсивности. Следует отметить, что при этом для указанных вариантов значения показателей  $F_{неоднор}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4))$ ,  $F_{однор}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4))$ ,  $F_{однорвоз}(\vec{\chi}(\alpha_1, \dots, \alpha_4))$  не меняются, т. к. происходит индивидуальное поступление заказов.

Варианты с № 21 по № 29, с № 30 по № 38, с № 39 по № 47 отражают изменения структурно-функциональной надежности ЦП при постепенном повышении интенсивности равномерного раздельного и совместного поступления двух заказов 1 и 2, 1 и 3, 1 и 4 соответственно. Варианты с № 48 по № 56 — постепенное повышение интенсивности равномерного раздельного и совместного поступления трех заказов (2, 3, 4; 1, 2, 3; 1, 2, 4; 1, 3, 4). Затем расположены варианты с № 57 по № 60 — постепенное повышение интенсивности равномерного раздельного и совместного поступления четырех заказов.

Следует отметить, что при совместном поступлении нескольких заказов (двух, трех, четырех) возможная оценка надежности однородной структуры возрастает лишь на 4–6 %. Вероятностная же оценка надежности однородной или неоднородной структуры может вырасти для двух заказов максимум на 12 %, для трех и четырех заказов — максимум на 14,5–15,2 %. Причем максимальное значение достигается при равномерном задействовании указанных заказов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи предложены методика и технология оценивания надежности и живучести функционирования ЦП в случае возникновения более или менее серьезных колебаний спроса. В основе предложенного подхода к исследованию структурно-функциональной надежности ЦП в условиях изменяющихся заказов клиентов лежит параметрический геном структуры. Анализ приведенных результатов показал, что при создании и проектировании ЦП требуется учитывать различные варианты (совместное-несовместное, равноценное-неравноценное, однородное-неоднородное)

поступление динамических заказов клиентов, которые существенным образом влияют на надежность и живучесть ЦП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, Д. А. Неопределенность и риски в цепях поставок: классификация задач и направления будущих исследований / Д. А. Иванов, М. А. Иванова // *Российский журнал менеджмента*. 2015. Т. 13, № 2. С. 99–128.
2. Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information / F. Chen, Z. Drezner, J. K. Ryan, D. Simchi-Levi // *Management Science*. 2000. Vol. 46, No. 3. Pp. 436–443. DOI:10.1287/MNSC.46.3.436.12069.
3. Dynamic Modelling and Classical Control Theory for Supply Chain Management / E. Perea Lopez, I. Grossmann, E. Ydstie, T. Tahmassebi // *Computers and Chemical Engineering*. 2000. Vol. 24, Is. 2. Pp. 1143–1149. DOI: 10.1016/S0098-1354(00)00495-6.
4. Daganzo, C. F. On the Stability of Supply Chains // *Operations Research*. 2004. Vol. 52, Is. 6. Pp. 909–921. DOI: 10.1287/opre.1040.0147.
5. Villegas, F. A. Supply Chain Dynamics: Analysis of Inventory vs. Order Oscillations Trade-Off / F. A. Villegas, N. R. Smith // *International Journal of Production Research*. 2006. Vol. 44, Is. 6. Pp. 1037–1054. DOI: 10.1080/00207540500338203.
6. Goh, M. A Stochastic Model for Risk Management in Global Chain Networks / M. Goh, J. Y. S. Lim, F. Meng. // *European Journal of Operational Research*. 2007. Vol. 182, Is. 1. Pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.08.028.
7. A Multi-Objective Stochastic Programming Approach for Supply Chain Design Considering Risk / A. Azaron, K. N. Brown, S. A. Tarim, M. Modarres // *International Journal of Production Economics*. 2008. Vol. 116, Is. 1. Pp.129–138. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.08.002.
8. Acar, Y. A Decision Support Framework for Global Supply Chain Modelling: An Assessment of the Impact of Demand, Supply and Lead-Time Uncertainties on Performance / Y. Acar, S. Kadipasaoglu, P. Schipperijn // *International Journal of Production Research*. 2010. Vol. 48, Is. 11. Pp. 3245–3268. DOI: 10.1080/00207540902791769.
9. Hsu, C.-I. Reliability Evaluation and Adjustment of Supply Chain Network Design with Demand Fluctuations / C.-I. Hsu, H.-C. Li // *International Journal of Production Economics*. 2011. Vol. 132, Is. 1. Pp. 131–145. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.03.020.
10. Lin, C.-C. Build-To-Order Supply Chain Network Design Under Supply and Demand Uncertainties / C.-C. Lin, T.-H. Wang // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2011. Vol. 45, Is. 8. Pp. 1162–1176. DOI: /10.1016/j.trb.2011.02.005.
11. Baghalian, A. Robust Supply Chain Network Design with Service Level Against Disruptions and Demand Uncertainties: A Real-Life Case // A. Baghalian, S. Rezapour, R. Z. Farahani // *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 227, Is. 1. Pp. 199–215. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.12.017.
12. Ivanov, D. A. Adaptive Supply Chain Management / D. A. Ivanov, B. V. Sokolov. — London: Springer-Verlag, 2010. — 301 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-952-7.
13. Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing / B. V. Sokolov, [et al.] (eds). — Cham: Springer Nature, 2020. — 279 p. — (International Series in Operations Research and Management Science; Vol. 289). DOI: 10.1007/978-3-030-43177-8\_1.
14. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства: Монография / В. И. Поленин, И. А. Рябинин, С. К. Свиринов, И. А. Гладкова; под ред. А. С. Можаяева. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургское региональное отделение РАЕН, 2011. — 416 с.
15. Системный анализ организационно-технических систем космического назначения: Учебник / Е. Н. Алешин, С. В. Зиновьев, Е. В. Копкин, [и др.]; под общ. ред. А. Н. Павлова. — СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. — 370 с.
16. Ivanov, D. A. Exact and Heuristic Methods for Integrated Supply Chain Design Reliability Analysis / D. A. Ivanov, B. V. Sokolov, A. N. Pavlov // *International Journal of Integrated Supply Management*. 2016. Vol. 10, No. 2. Pp. 206–224. DOI: 10.1504/IJISM.2016.077075.
17. Hybrid Fuzzy-Probabilistic Approach to Supply Chain Resilience Assessment / A. N. Pavlov, D. A. Ivanov, A. B. Dolgui, B. V. Sokolov // *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2018. Vol. 65, Is. 2. Pp. 303–315. DOI: 10.1109/TEM.2017.2773574.
18. Kopytov, E. A. New Methods of Calculating the Genome of Structure and the Failure Criticality of the Complex Objects' Elements / E. A. Kopytov, A. N. Pavlov, V. A. Zelenstov // *Transport and Telecommunication*. 2010. Vol. 11, No. 4. Pp. 4–13.

# Structural and Functional Analysis of Supply Chain Reliability in the Presence of Demand Fluctuations

A. N. Pavlov

St. Petersburg Federal Research Center  
of the Russian Academy of Sciences,  
A. F. Mozhaisky Military Space Academy  
Saint Petersburg, Russia  
Pavlov62@list.ru

D. A. Pavlov, V. N. Vorotyagin, A. B. Umarov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy  
Saint Petersburg, Russia  
Dpavlov239@mail.ru, Vorotyagin@rambler.ru,  
Antropicier737@gmail.com

**Abstract.** An approach to modeling, evaluating and analyzing the structural and functional reliability and survivability of supply chains in conditions of fluctuating demand is presented. This article proposes the concept of a parametric genome of the structure of complex multi-mode objects for calculating integral indicators of the structural and functional reliability of the supply chain with dynamic consumer orders.

**Keywords:** supply chains, parametric genome, structural and functional analysis, reliability.

## REFERENCES

1. Ivanov D. A., Ivanova M. A. Uncertainty and Risks in Supply Chains: Problem Classification and Future Research Avenues [Neopredelennost' i riski v tsepyakh postavok: klassifikatsiya zadach i napravleniya budushchikh issledovaniy], *Russian Management Journal [Rossiyskiy zhurnal menedzhmenta]*, 2015, Vol. 13, No. 2, Pp. 99–128.
2. Chen F., Drezner Z., Ryan J. K., Simchi-Levi D. Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information, *Management Science*, 2000, Vol. 46, No. 3, Pp. 436–443. DOI:10.1287/MNSC.46.3.436.12069.
3. Perea Lopez E., Grossmann I., Ydstie E., Tahmassebi T. Dynamic Modelling and Classical Control Theory for Supply Chain Management, *Computers and Chemical Engineering*, 2000, Vol. 24, Is. 2, Pp. 1143–1149. DOI: 10.1016/S0098-1354(00)00495-6.
4. Daganzo C. F. On the Stability of Supply Chains, *Operations Research*, 2004, Vol. 52, Is. 6, Pp. 909–921. DOI: 10.1287/opre.1040.0147.
5. Villegas F. A., Smith N. R. Supply Chain Dynamics: Analysis of Inventory vs. Order Oscillations Trade-Off, *International Journal of Production Research*, 2006, Vol. 44, Is. 6, Pp. 1037–1054. DOI: 10.1080/00207540500338203.
6. Goh M., Lim J. Y. S., Meng F. A Stochastic Model for Risk Management in Global Chain Networks, *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 182, Is. 1, Pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.08.028.
7. Azaron A., Brown K. N., Tarim S. A., Modarres M. A Multi-Objective Stochastic Programming Approach for Supply Chain Design Considering Risk, *International Journal of Production Economics*, 2008, Vol. 116, Is. 1, Pp.129–138. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.08.002.
8. Acar Y., Kadipasaoglu S., Schipperijn P. A Decision Support Framework for Global Supply Chain Modelling: An Assessment of the Impact of Demand, Supply and Lead-Time Uncertainties on Performance, *International Journal of Production Research*, 2010, Vol. 48, Is. 11, Pp. 3245–3268. DOI: 10.1080/00207540902791769.
9. Hsu C.-I., Li H.-C. Reliability Evaluation and Adjustment of Supply Chain Network Design with Demand Fluctuations, *International Journal of Production Economics*, 2011. Vol. 132, Is. 1. Pp. 131–145. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.03.020.
10. Lin C.-C., Wang T. H. Build-To-Order Supply Chain Network Design Under Supply and Demand Uncertainties, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, Vol. 45, Is. 8, Pp. 1162–1176. DOI: /10.1016/j.trb.2011.02.005.
11. Baghalian A., Rezapour S., Farahani R. Z. Robust Supply Chain Network Design with Service Level Against Disruptions and Demand Uncertainties: A Real-Life Case, *European Journal of Operational Research*, 2013, Vol. 227, Is. 1, Pp. 199–215. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.12.017.
12. Ivanov D. A., Sokolov B. V. Adaptive Supply Chain Management. London, Springer-Verlag, 2010, 301 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-952-7.
13. Sokolov B. V., et al. (eds) Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing. Cham, Springer Nature, 2020, 279 p. DOI: 10.1007/978-3-030-43177-8\_1.
14. Polenin V. I., Ryabinin I. A., Svirin S. K., Gladkova I. A. The use of a common logical and probabilistic method for the analysis of technical, military organizational and functional systems and armed confrontation: Monograph [Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktsional'nykh sistem i vooruzhennogo protivoborstva: Monografiya]. Saint Petersburg, Russian Academy of Natural Science, 2011, 416 p.
15. Aleshin E. N., Zinoviev S. V., Kopkin E. V., et al. System analysis of organizational and technical systems for space purposes: Textbook [Sistemnyy analiz organizatsionno-tekhnicheskikh sistem kosmicheskogo naznacheniya: Ucheb-

nik]. Saint Petersburg, A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 2018, 370 p.

16. Ivanov D. A., Sokolov B. V., Pavlov A. N. Exact and Heuristic Methods for Integrated Supply Chain Design Reliability Analysis, *International Journal of Integrated Supply Management*, 2016, Vol. 10, No. 2, Pp. 206–224.  
DOI: 10.1504/IJISM.2016.077075.

17. Pavlov A. N., Ivanov D. A., Dolgui A. B., Sokolov B. V. Hybrid Fuzzy-Probabilistic Approach to Supply Chain Resilience Assessment, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2018, Vol. 65, Is. 2, Pp. 303–315.  
DOI: 10.1109/TEM.2017.2773574.

18. Kopytov, E. A., Pavlov A. N., Zelentsov V. A. New Methods of Calculating the Genome of Structure and the Failure Criticality of the Complex Objects' Elements, *Transport and Telecommunication*, 2010, Vol. 11, No. 4, Pp. 4–13.

# Метод оценки геоэкологических технологий на основе взвешенной свертки критериев частичной эффективности в среде MATLAB

Е. В. Русанова, Е. В. Рунев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия  
rusanovaev@mail.ru, jr\_2010@mail.ru

**Аннотация.** В работе предложена модель оценки геоэкозащитных технологий, основанная на многокритериальной оптимизации и взвешенной свертке критериев, на основе которой разработана методика расчета, позволяющая определить PQ-фактор для различных объектов по выбранным технологиям с использованием средств среды MATLAB. В работе продемонстрировано применение указанной методики на примере материалов из золопенобетона, отличающихся плотностью и содержанием золы от сжигания осадка сточных вод. Определение оптимального состава золопенобетона актуально для применения в разработке конструкций шумозащитных экранов на железнодорожном транспорте. Предложенный алгоритм моделирования в среде MATLAB позволяет использовать процедуру обработки исходных данных, при этом используется несколько вариантов их ввода: в виде таблиц формата .csv или ручным вводом.

**Ключевые слова:** геоэкозащитные технологии, многокритериальная оптимизация, индекс PQ, свертка критериев, MATLAB.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире развивающихся безотходных и малоотходных технологий в промышленных отраслях и транспортных инфраструктурах на фоне кризисных явлений в экономическом развитии, особенно важным является ресурсосберегающий, экологически и экономически обоснованный подход к созданию новых технологий утилизации отходов [1, 2]. Методики оценивания таких технологий утилизации отходов также являются необходимыми [3, 4].

Существующие методы оценки геоэкозащитных технологий [5, 6] не дают полного представления о предложенных технологиях и часто затрагивают только одну группу критериев. Такой подход не дает объективной оценки по всем возможным группам критериев, которые необходимо учитывать при использовании данной технологии лицам, принимающим решение.

Поэтому, наряду с разработкой новых геоэкозащитных технологий, необходима модель комплексной оценки, основанной на полном наборе существующих критериев (экологических, технологических и других), которая давала бы представление об объективной оценке технологии.

Актуальной проблемой на сегодняшний день является создание утилизирующих технологий и материалов из продуктов переработки отходов и их дальнейшее использование в различных промышленных и транспортных отраслях. Одним из типов коммунальных отходов, технологий по утилизации которых на данный момент недостаточно, является зола от сжигания осадков сточных вод. Зола имеет повышенный естественный радиационный фон и является источником пыли на полигонах [4, 7].

Таким образом, утилизация таких зол является важной проблемой в отраслях жилищно-коммунального хозяйства и затрагивает экологическую группу критериев использования технологий [8].

При оценке создаваемой технологии по утилизации золы от сжигания осадков сточных вод учитывается процент содержания песка, замещенного золой, т.е. замена одного материала – песка, другим – золой. Новый материал получил название золопенобетон [9–12].

Этот создаваемый материал (золопенобетон) тестируется по различным технологическим критериям. [13, 14]. Дополнительно учитывается использование утилизируемого материала (золы) в следующем технологическом цикле. Это использование заключается в защите населения от шумов железнодорожной отрасли [15].

В настоящей работе предложена модель оценки геоэкозащитных технологий, основанная на многокритериальной оптимизации и взвешенной свертке критериев. На основе этой модели разработана методика расчета, позволяющая определить PQ-фактор для различных объектов по выбранным технологиям с использованием средств среды MATLAB.

В работе продемонстрировано применение указанной методики на примере материалов из золопенобетона, отличающихся плотностью и с содержанием золы от сжигания осадка сточных вод в количестве 50 % от песка. Определение оптимального состава золопенобетона актуально для применения в разработке конструкций шумозащитных экранов на железнодорожном транспорте [4].

Вся цепочка технологии предложена в виде последовательности процессов: утилизация золы, нейтрализация ее

вредных свойств, и уменьшение шума в населенных пунктах [16].

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Обозначим через  $W = \{W_s\}_{s=1}^k$  множество возможных групп критериев: здесь  $W_s = \{w_{s1}, \dots, w_{sj_s}\}$  —  $s$ -я группа критериев,  $w_{sj_s}$  —  $j_s$ -й критерий  $s$ -й группы. За  $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_m\}$  обозначим множество исследуемых объектов с помощью группы критериев  $W$ . Каждому элементу множества  $\theta$  — исследуемому объекту — сопоставим матрицу размерности  $k$  строк и  $p$  столбцов. Здесь  $p$  — наибольшее количество критериев по всем  $k$  группам ( $p = \max_{1 \leq s \leq k} s$ ).

Элементы указанной матрицы — значения характеристик объекта исследования по естественным шкалам критериев; строки матрицы — значения характеристик объекта по естественным шкалам групп критериев.

Приведем вид указанного отображения

$$d: \theta \rightarrow Mat(k, p):$$

$$d(\theta_j) = X_j = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{k1} & x_{k2} & \dots & \dots & x_{kp} \end{pmatrix} \quad (1),$$

где среди элементов  $x_{il}(\theta_j)$  встречаются и нулевые. Это означает, что характеристика данного объекта в указанной группе критериев отсутствует (такой элемент в матрице  $X_j$  заменяется нулем).

Далее, каждой матрице  $X_j$  сопоставим матрицу  $Y_j$ , элементы которой — значения характеристик объектов по единой шкале для всех критериев указанных групп.

В качестве множества, задающего единую шкалу, выбирается отрезок  $[0; 1]$ .

Указанное множество является естественным для прикладных задач многокритериальной оптимизации, так как характеристики объектов сравниваются с заданными значениями критериев, которые численно задаются точкой на  $[0; 1]$ .

**МНОЖЕСТВО ОБЪЕКТОВ МОДЕЛИ**

В качестве объектов используются зола в чистом виде и золопенобетоны разной плотности с 50 % содержанием золы от сжигания осадка сточных вод (вместо песка), из которых были сделаны шумоизолирующие экраны вдоль железных дорог для защиты населения от шума с железных дорог, а именно:

- $\theta_1$  — зола от сжигания осадка сточных вод;
- $\theta_2$  — золопенобетон плотностью 500 кг/м<sup>3</sup>;
- $\theta_3$  — золопенобетон плотностью 600 кг/м<sup>3</sup>;
- $\theta_4$  — золопенобетон плотностью 800 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, множество исследуемых объектов  $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_4\}$  состоит из четырех элементов.

**ГРУППЫ КРИТЕРИЕВ И КРИТЕРИИ МОДЕЛИ**

В модели оценки геоэкозащитных технологий производства золопенобетона выделяют следующие группы критериев:

- $W_1$  — экологическая,
- $W_2$  — технологическая,
- $W_3$  — эксплуатационная.

При этом в каждой группе выделяют несколько наиболее значимых для лиц, принимающих решение, критериев.

Для экологической группы это:

- $w_{11}$  — содержание естественных радионуклидов;
- $w_{12}$  — содержание пыли.

Для технологической группы это:

- $w_{21}$  — коэффициент теплопроводности,
- $w_{22}$  — прочность,
- $w_{23}$  — морозостойкость,
- $w_{24}$  — содержание золы материале,
- $w_{25}$  — звукоизолирующая способность.

Для эксплуатационной группы это:

- $w_{31}$  — уровень шума в населенном пункте.

**ШКАЛА КРИТЕРИЕВ**

Рассмотрим отображение  $d: \theta \rightarrow Mat(k, p)$  (1) из множества объектов в множество матриц, элементы которых задают значения характеристик объектов по шкалам критериев.

Каждый объект  $\theta_j$  характеризуется  $X_j$  с  $k$  строками и  $p$  столбцами (здесь  $k$  — количество групп критериев,  $s$  — количество критериев каждой группе,  $p = \max_{1 \leq s \leq 3} s$ ). В строках

указанной матрицы расположены значения характеристик объекта по группам критериев. В случае  $k = 3$  для указанного множества исследуемых объектов  $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_4\}$  имеем следующие группы критериев:

- 1-я группа —  $s_1 = 2$  критерия;
- 2-я группа —  $s_2 = 5$  критериев;
- 3-я группа —  $s_3 = 1$  критерий.

Здесь  $p = \max_{1 \leq s \leq 3} s_k = \max \{2, 5, 1\} = 5$ .

Для согласования размерностей будем считать, что если в какой-либо группе один или несколько критериев отсутствуют, то соответствующие матричные элементы заменяются на 0.

Общий вид такой матрицы для случая  $k = 3$ ,

- 1-я группа —  $s_1 = 2$  критерия,
  - 2-я группа —  $s_2 = 5$  критериев,
  - 3-я группа —  $s_3 = 1$  критерий,
- $p = \max_{1 \leq s \leq 3} s_k = 5$  имеет вид

$$d(\theta_j) = X_j = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & 0 & 0 & 0 \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} \\ x_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$x_{ij} \in [a_{ij(\min)}, b_{ij(\max)}].$$

Здесь  $a_{ij(\min)}$  и  $b_{ij(\max)}$  — нижняя и верхняя границы диапазона соответствующей шкалы критерия.

**ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИТЕРИЕВ**

Ниже в таблице 1 приведены числовые значения характеристик по шкалам критериев для объектов исследования — образцов из материалов №№1–4.

Таблица 1

Данные экспериментальных измерений

Объекты	$x_{11}(\theta_j)$ , Бк/кг	$x_{12}(\theta_j)$ , мг/м <sup>3</sup>	$x_{21}(\theta_j)$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{°C}}$	$x_{22}(\theta_j)$ , МПа	$x_{23}(\theta_j)$ , циклов	$x_{24}(\theta_j)$ , кг/м <sup>3</sup>	$x_{25}(\theta_j)$ , дБ	$x_{31}(\theta_j)$ , дБ
Зола	615	3,51	0	0	0	0	0	0
D500	96	0	12	16,5	15	80	38	65
D600	100	0	14	20	15	115	41	57
D800	107	0	17	25	15	205	43	50

Для качественного и количественного анализа исследуемых материалов были выбраны стандартные методики, соответствующие требованиям ГОСТ [9, 10].

Указанные в таблице 1 данные — выборочные средние значения, которые получены в результате проведения серии экспериментов над образцами. Статистическая обработка проводилась при помощи среды MATLAB.

Все исследования проводились в центре «Сократ» ПГУПС; в испытательной лаборатории «Центр испытаний и сертификации СПб»; в испытательной лаборатории радиационного контроля Испытательного центра «ПКТИ-СтройТЕСТ». Все организации имеют лицензии.

#### ЕСТЕСТВЕННЫЕ ШКАЛЫ ОБЪЕКТОВ ПО КРИТЕРИЯМ

Отправной точкой в поиске оптимального объекта, удовлетворяющего группам критериев, и принятию решения, на основании которого определяется возможность его использования в геоэкозащитных технологиях, является систематизация естественных шкал.

Под естественными шкалами следует понимать шкалы измерения характеристик, задающих физические свойства материалов, из которых изготовлены тестируемые образцы.

В таблице 2 приведены естественные шкалы с единицами измерений для переменных, описывающих критерии. В качестве единиц изменения использовались единицы международной системы СИ и единицы измерения, предусмотренные стандартами испытаний ГОСТ.

Таблица 2

Естественные шкалы переменных, описывающих критерии

$\bar{x}_1(\theta_j)$	Единицы измерения	$\bar{x}_2(\theta_j)$	Единицы измерения	$\bar{x}_3(\theta_j)$	Единицы измерения
$x_{11}(\theta_j)$	Бк/кг	$x_{21}(\theta_j)$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{°C}}$	$x_{31}(\theta_j)$	дБ
$x_{12}(\theta_j)$	мг/м <sup>3</sup>	$x_{22}(\theta_j)$	МПа		
		$x_{23}(\theta_j)$	Кол-во циклов		
		$x_{24}(\theta_j)$	кг/м <sup>3</sup>		
		$x_{25}(\theta_j)$	дБ		

#### КРАЙНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ШКАЛ ИЗМЕРЕНИЙ

Для построения универсальной шкалы с областью измерения [0; 1] была выполнена фиксация диапазонов границ измерений для каждой характеристики по всем критериям.

По всем критериям были выбраны следующие границы диапазонов:

1. Содержание естественных радионуклидов (ЕРН) было рассмотрено в интервале от 29 Бк/кг (лучшее значение интервала — фоновое, соответствующее гипсовому природному камню, как наиболее чистому) до 740 Бк/кг (худшее значение интервала; соответствует образцам, разрешенным к использованию при строительстве в населенных пунктах [9]). Лучшее по критерию содержания естественных радионуклидов (29 Бк/кг) совпадает с правой границей универсальной шкалы, т. е. с 1.

2. Содержание пыли было рассмотрено в интервале от 0 мг/м<sup>3</sup> до 0,3 мг/м<sup>3</sup> (норма ПДК). Лучшему значению (соответствует идеальному состоянию системы — полное отсутствие пыли) — 0 мг/м<sup>3</sup> присваиваем значение 1 в универсальной шкале, худшему значению (0,3 мг/м<sup>3</sup>) — значение 0 в универсальной шкале. Лучшее (0 мг/м<sup>3</sup>) совпадает с правой границей в универсальной шкале.

3. Теплопроводность образцов рассматривается в интервале от 0,07 Вт/м<sup>2</sup> × °C до 0,20 Вт/м<sup>2</sup> × °C. Лучшее значение по критерию теплопроводности (0,07 Вт/м<sup>2</sup> × °C) соответствует правой границе универсальной шкалы.

4. Прочность на сжатие образцов рассматривается в интервале от 0 до 35 МПа. Лучшее значение по критерию прочности на сжатие (35 МПа) соответствует правой границе универсальной шкалы.

5. Морозостойкость — свойство материала к устойчивости от разрушения в результате цикла замораживания-оттаивания, измеряется в количестве циклов, которое выдержит материал без разрушения. Шкала критерия в естественных единицах измерения имеет диапазон от 5 до 30 циклов. Лучшее значение по критерию морозостойкости (30 циклов) соответствует левой границе универсальной шкалы.

6. Содержание золы в 1 м<sup>3</sup> материала рассмотрено в диапазоне от 0 до 500 кг/м<sup>3</sup>. Лучшее значение по критерию содержания золы (500 кг/м<sup>3</sup>) соответствует правой границе универсальной шкалы.

7. Звукоизолирующая способность звукозащитных экранов из золопенобетона различной плотности и различной толщины определена расчетным путем. Она принимает значения в естественной шкале от 0 до 49 дБ. Лучшее значение по критерию звукоизолирующей способности образца (49 дБ) соответствует правой границе универсальной шкалы.

8. Шум в населенных пунктах измерялся до и после установки шумозащитного экрана. Этот критерий принимает значения по естественной шкале в диапазоне от 20 до 120 дБ. Лучшее значение по критерию уровня шума в населенных пунктах (20 дБ) соответствует правой границе универсальной шкалы.

В таблице 3 представлены все границы с указанными областями измерений критериев [ $x_{min}$ ,  $x_{max}$ ].

Таблица 3

Области и границы изменения переменных критериев

Критерии	Единицы измерения	$[x_{min}, x_{max}]$
$\bar{x}_1(\theta_j)$ :		
$x_{11}(\theta_j)$	Бк/кг	[29; 740]
$x_{12}(\theta_j)$	кг/м <sup>3</sup>	[0; 0,3]
$\bar{x}_2(\theta_j)$ :		
$x_{21}(\theta_j)$	Вт/м <sup>2</sup> × °С	[0,07; 0,20]
$x_{22}(\theta_j)$	МПа	[0; 35]
$x_{23}(\theta_j)$	кол-во циклов	[5; 30]
$x_{24}(\theta_j)$	кг/м <sup>3</sup>	[0; 500]
$x_{25}(\theta_j)$	дБ	[0; 49]
$\bar{x}_3(\theta_j)$ :		
$x_{31}(\theta_j)$	дБ	[20; 120]

Для каждого критерия с естественной шкалой и областью значений переменной критерия построим отображение  $F_{kl}$  (где  $k$  — количество групп критериев,  $l$  — количество критериев) данной области в универсальную для всех критериев область — отрезок  $[0; 1]$ .

Указанное отображение обладает свойством строгой монотонности и сопоставляет наименьшему (наибольшему значению) по естественной шкале наименьшее (наибольшее) по универсальной шкале:

–  $F_{kl}(x_{min}) = 0, F_{kl}(x_{max}) = 1$  — в случае строго возрастающей функции;

–  $F_{kl}(x_{max}) = 0, F_{kl}(x_{min}) = 1$  — для строго убывающей функции.

Тип монотонности определяется физическими характеристиками, лежащими в основе критериев.

#### Матрицы объектов

Каждому объекту  $\theta_j$  из множества  $\Theta$  сопоставим матрицу  $Y_j$ , элементы которой являются значениями переменных всех критериев модели по универсальной шкале из отрезка  $[0; 1]$ :

$$\theta_j \mapsto Y_j = F(X_j),$$

где  $F = (F_{kl})$  — отображение, обладающее свойством строгой монотонности.

Здесь матрица  $X_j = (x_{kl}(\theta_j))$  — матрица переменных для групп критериев  $j$ -го объекта. Другими словами,

$$y_{kl}(\theta_j) = F_{kl}(x_{kl}(\theta_j)).$$

Для материала из образцов №№ 1–4 матрицы будут выглядеть следующим образом:

$$Y_1 = \begin{pmatrix} 0,249 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,274 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$Y_2 = \begin{pmatrix} 0,964 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0,356 & 0,213 & 0,312 & 0,936 \\ 0,861 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$Y_3 = \begin{pmatrix} 0,961 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,962 & 0,520 & 0,524 & 0,437 & 0,944 \\ 0,876 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$Y_4 = \begin{pmatrix} 0,995 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,740 & 0,842 & 0,860 & 0,685 & 0,956 \\ 0,891 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Приведенные выше матрицы показывают данные экспериментальных измерений (табл. 1) для объектов исследования, переведенные в универсальную шкалу.

#### ПОСТРОЕНИЕ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ КРИТЕРИЕВ

Отображение  $F: Mat_{k,p}(\mathbf{R}_+) \rightarrow Mat_{k,p}([0; 1])$ , построенное в предыдущих пунктах, имеет векторный характер. Оно сопоставляет матрице объекта, элементы которой есть значения характеристик в естественных шкалах, матрицу объекта, элементы которой принимают значения из отрезка  $[0; 1]$  по универсальной шкале.

$F = (F_{kl})$  — это векторная целевая функция, компоненты которой являются строго монотонными скалярными функциями. Характер монотонности определяется свойством оценки исследования объекта (образца) по естественным физическим характеристикам.

В качестве скалярных целевых функций  $F_{kl}(t)$  выбраны непрерывные кусочно-линейные функции. Выбор данного класса функций мотивирован тем фактом, что исследуемые объекты классифицируются по нескольким областям применения (например, применение материалов в строительстве). Количество участков, на которых указанные функции непрерывны, вводится исходя из стандартов областей применения исследуемых объектов.

Исходя из вышеуказанных условий, которым должны удовлетворять скалярные целевые функции, возможны два типа функций.

1. Кусочно-линейные строго возрастающие функции

$$F_{kl(r)}(t) = a_{kl(r)} \times t + b_{kl(r)},$$

где  $a_{kl(r)}, b_{kl(r)}$  — положительные вещественные числа.

2. Кусочно-линейные строго убывающие функции

$$F_{kl(r)}(t) = b_{kl(r)} - a_{kl(r)} \times t,$$

где  $a_{kl(r)}, b_{kl(r)}$  — положительные вещественные числа,  $r$  — номер диапазона  $r = 1, 2, \dots, q$ .

Коэффициенты  $\{a_{kl(r)}; b_{kl(r)}\}$  определяются из системы линейных алгебраических уравнений, которая является следствием двусторонней непрерывности функций  $F_{kl(r)}(t)$  в граничных точках диапазонов разбиения шкалы. Количество уравнений в системе совпадает с  $2q$ .

#### ВЗВЕШЕННАЯ СВЕРТКА КРИТЕРИЕВ

Следующим шагом в построении целевой функции с помощью свертки критериев является определение весовых коэффициентов свертки [17–19]. В каждой группе критериев определяется вес критерия  $\alpha_{kl}$  с учетом значимости этого критерия в группе. Значимость критерия определяется методом экспертных оценок лицом, принимающим решение на основании стандартов, законодательных актов, общемировой практики и иной технической информации.

Для весовых коэффициентов выполняется естественное (аддитивное) условие нормировки: сумма всех  $\alpha_{kl}$  при фиксированном индексе должна равняться единице:

$$\sum_{l=1}^p \alpha_{kl} = 1.$$

Для рассматриваемых в работе четырех объектов, для которых применены три группы критериев, и были определены весовые коэффициенты, данные внесены в таблице 4.

Таблица 4

Весовая матрица частных критериев

Группа экологических критериев	$\alpha_1$	Группа экологических критериев	$\alpha_2$	Группа экологических критериев	$\alpha_3$
Содержание ЕРН $\alpha_{11}$	0,90	Теплопроводность $\alpha_{21}$	0,20	Шум в населенных пунктах $\alpha_{31}$	1,00
Содержание пыли $\alpha_{12}$	0,10	Прочность $\alpha_{22}$	0,13	$\alpha_{33}$	0
$\alpha_{13}$	0	Морозостойкость $\alpha_{23}$	0,15	$\alpha_{34}$	0
$\alpha_{14}$	0	Содержание золы $\alpha_{24}$	0,35	$\alpha_{35}$	0
$\alpha_{15}$	0	Звукоизоляционная способность $\alpha_{25}$	0,35	$\alpha_{36}$	0

Результатом применения взвешенной свертки критериев в каждой группе является целевая функция свертки

$$G_k(t) = \langle \alpha_k, F_k(t) \rangle = \sum_{l=1}^p \alpha_{kl} \times F_{kl}(t),$$

где  $\alpha_k = (\alpha_{k1}, \dots, \alpha_{kp})$  — весовой вектор критериев в  $k$ -ой группе,  $F_k(t) = (F_{kl}(t))$  — строки матричной функции с кусочно-линейными компонентами.

Каждая компонента задается  $q_{kl}$ -линейными функциями, заданными на отдельных диапазонах разбиения шкал соответствующих критериев.

Результат применения взвешенной свертки критериев к рассматриваемым в работе образцам приведен в таблице 5.

В таблице указаны значения функций свертки  $G_k(\bar{x}_k, \theta_j)$  для  $k$  групп критериев. Так как в работе имеются большие объемы вычислений с многомерными массивами данных ( $k$  групп,  $p$  критериев в группе,  $q_p$  линейных функций,  $2q_p$  коэффициентов линейных функций), численные значения функций свертки были получены с применением среды MATLAB.

Таблица 5

Свертка критериев по группам

Группа экологических критериев	зола	D500	D600	D800
$\bar{x}_1$	0,249	0,968	0,965	0,963
Группа технологических критериев	зола	D500	D600	D800
$\bar{x}_2$	0	0,535	0,646	0,828
Группа эксплуатационных критериев	зола	D500	D600	D800
$\bar{x}_3$	0,244	0,868	0,876	0,891

ВЗВЕШЕННАЯ СВЕРТКА ГРУПП КРИТЕРИЕВ

Рассмотрим весовой вектор групп критериев  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)$ , где веса определяются из соотношения

$$\omega_j = \frac{s_j}{\sum_{j=1}^k s_j},$$

где  $s_j$  — экспертная оценка  $j$ -ой группы критериев.

Для множества рассматриваемых в работе объектов с тремя ( $k = 3$ ) группами критериев в таблице 6 приведены значения весового вектора  $\omega$ .

Из таблицы видно, что при использовании материалов в геоэкозащитных технологиях наибольший вес имеет экологическая группа критериев. Это следует учитывать лицам, принимающим решение.

Таблица 6

Весовая групп критериев

Группа критериев	Группа экологических критериев $\omega_1$	Группа технологических критериев $\omega_2$	Группа эксплуатационных критериев $\omega_3$
$\omega_k$	0,4	0,3	0,3

Целевая функция взвешенной групповой свертки в общем случае имеет вид [20–22]:

$$G(t) = \sum_{j=1}^k \omega_j \cdot G_j(t) = \sum_{j=1}^k \omega_j \cdot \langle \alpha_j, F_j(t) \rangle = \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^p \omega_j \cdot \alpha_{jl} \cdot F_{jl}(t)$$

Целевая функция в рассматриваемом частном случае для  $k = 3$  имеет вид:

$$G(t) = \omega_1 \times \langle \alpha_1, F_1(t) \rangle + \omega_2 \times \langle \alpha_2, F_2(t) \rangle + \omega_3 \times \langle \alpha_3, F_3(t) \rangle,$$

где  $\alpha_j = (\alpha_{j1}, \dots, \alpha_{jp})$  — весовой вектор критериев в  $j$ -ой группе.

Вычисления с указанными свертками для различных объектов проведены в среде MATLAB с применением алгоритмов обработки многомерных массивов данных.

Следует отметить, что эти алгоритмы позволяют использовать данные непосредственно после проведения измерительных экспериментов и находить значения целевой

функции для любого количества экспериментальных образцов, что существенно позволяет экономить время и вычислительную сложность [23].

#### ОПТИМАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

На рисунке 1 показаны итоги взвешенной свертки групп критериев в виде столбчатой диаграммы.



Рис. 1. Взвешенные суммарные показатели по группам критериев

В соответствии с данными таблицы и рисунка можно утверждать, что наиболее эффективным по итогам взвешенной свертки групп критериев является производство золопенобетона средней плотностью 800 кг/м<sup>3</sup> (D800), так как итог наивысший — 0,901.

#### ВЫВОДЫ

Предложенная модель, основанная на взвешенных свертках критериев, позволяет составить как методику расчета целевых функций PQ-факторов по отдельным критериям оптимальности, так и методику расчета PQ-факторов группы критериев с построением оптимального решения с целью рекомендации по принятию решения в использовании материалов в создании геоэкозащитных технологий.

Конечным результатом работы является алгоритм, реализованный в среде MATLAB с обработкой многомерных массивов данных

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность своим коллегам по Петербургскому университету путей сообщения Императора Александра I за многолетнее плодотворное сотрудничество, которое привело к возникновению интересных идей в подходах решению различных прикладных задач, особенно актуальных в условиях современности, таких как моделирование надёжности и устойчивости систем обеспечения движения и интеллектуальных систем на транспорте.

Также выражаем признательность кафедрам «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика», «Инженерная химия и естествознание», «Высшая математика», «Информатика и информационная безопасность» за доброжелательную теплую атмосферу, постоянные дискуссии и творческий поиск в решении возникающих прикладных задач.

Отметим высокий вклад сотрудников кафедры «Информационные и вычислительные системы» в организацию и проведение семинара «Models and Methods for Researching Information Systems in Transport».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новые экозащитные технологии на железнодорожном транспорте: Монография / Л. Б. Сватовская [и др.]; под

ред. Л. Б. Сватовской. — Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. — 159 с.

2. Building Wastes and Cement Clinker Using in the Geocoprotective Technologies in Transport Construction / A. S. Sakharova, L. B. Svatovskaya, M. M. Baidarashvili, A. V. Petriaev // Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics. Proceedings of the 14th International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics (IACMAG 2014) (Kyoto, Japan, 22–25 September 2014) / F. Oka, [et al.] (eds). — London: CRC Press, 2015. — Pp. 619–622. DOI: 10.1201/b17435-106.

3. Sustainable Development in Transport Construction Through the Use of the Geocoprotective Technologies / A. S. Sakharova, L. B. Svatovskaya, M. M. Baidarashvili, A. V. Petriaev // Advances in Transportation Geotechnics III. Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016) (Guimaraes, Portugal, 04–07 September 2016). Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. Pp. 1401–1408. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.165.

4. Русанова, Е. В. Технологии утилизации некоторых отходов промышленности и транспорта и их комплексная оценка: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 25.00.36 / Русанова Екатерина Владимировна; Петербургский гос. ун-т путей сообщения. — Санкт-Петербург, 2005. — 218 с. — Место защиты: Российский гос. гидрометеорологический ун-т.

5. Комплексные технологии утилизации отходов железнодорожного транспорта: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / Л. Б. Сватовская [и др.]; под ред. Л. Б. Сватовской. — Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. — 190 с. — (Высшее профессиональное образование).

6. Титова, Т. С. Методика комплексной оценки экологичности и качества природозащитных технологий. Индекс IEQ // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2005. № 2 (4). С. 98–105.

7. Sakharova, A. S. Transportation Structures and Constructions with Geocoprotective Properties / A. S. Sakharova, M. M. Baidarashvili, A. V. Petriaev // Transportation Geotechnics and Geoecology: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (TGG 2017) (Saint Petersburg, Russia, 17–19 May 2017). Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. Pp. 569–575. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.090.

8. Rusanova, E. V. The Control Waste of Communal Services / E. V. Rusanova, M. S. Abu-Khasan, A. S. Sakharova // Earth Science: Proceedings of International Science and Technology Conference (Vladivostok, Russia, 04–06 March 2019). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272, Is. 2. Art. No. 022109. 6 p. Published online at 21 June 2019. DOI:10.1088/1755-1315/272/2/022109.

9. Sakharova, A. S. New Construction Solutions for Geoenvironment Protection of Transport Infrastructure / A. S. Sakharova, A. V. Petriaev, I. S. Kozlov // Earth Science: Proceedings of the International Science and Technology Conference (Vladivostok, Russia, 04–06 March 2019). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272, Is. 2. Art. No. 022220. 6 p. Published online at 21 June 2019. DOI:10.1088/1755-1315/272/2/022220.

10. New Parameter of Geoecological Protective Ability of Construction Articles / L. B. Svatovskaya, A. M. Sychova,

М. М. Sychov, V. V. Okrepilov // Proceedings of International Scientific Conference Week of Science in SPbPU — Civil Engineering (SPbWOSCE-2015) (Saint Petersburg, Russia, 03–04 September 2015) / V. Murgul (eds) // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 53. Art. No. 01024. — 4 p. Published online at 15 April 2016. DOI: 10.1051/mateconf/20165301024.

11. New Geocoprotective Properties of the Construction Materials for Underground Infrastructure Development / L. B. Svatovskaya, M. M. Sychov, A. M. Sychova, M. V. Gravit // Proceedings of the 15th International scientific conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development» (Saint Petersburg, Russia, 12–15 September 2016). Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1771–1775. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.921.

12. Золопенобетон с использованием золы осадка сточных вод / А. М. Сычева, А. В. Хитров, М. В. Шершнева, Е. В. Русанова // Цемент и его применение. 2006. № 3. С. 64.

13. Титова, Т. С. Использование в строительстве автоклавного шумозащитного пенобетона / Т. С. Титова, Е. И. Макарова, Е. П. Дудкин // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 2 (54). С. 35.

14. Обработка и утилизация осадков сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга: опыт и перспективы / О. Н. Рублевская, Б. В. Васильев, Е. М. Протасовский, С. В. Петров // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 10. С. 47–51.

15. Сватовская, Л. Б. Золопенобетон и его применение на транспорте / Л. Б. Сватовская, Т. С. Титова, Е. В. Русанова // Наука и техника транспорта. 2005. № 2. С. 36–39.

16. Rusanova, E. V. The Complex Evaluation of Geo Eco-Protective Technologies Taking into Account the Influence of Negative Temperatures / E. V. Rusanova, M. S. Abu-Khasan, V. V. Egorov // Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2019) (Vladivostok, Russia, 01–04 October 2019). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753, Is. 2. Art No. 022042. 8 p. Published online at 05 March 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022042.

17. Ногин, В. Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 73–82.

18. Сигал, А. В. Оценка вектора весовых коэффициентов / А. В. Сигал, Е. С. Ремесник // Системный анализ и информационные технологии: Труды Восьмой международной конференции (САИТ-2019) (Иркутск, Россия, 08–14 июля 2019 г.). — Москва: Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, 2019. — С. 478–486. DOI: 10.14357/SAIT2019064.

19. Козлова, Е. А. Линейные обобщенные критерии в задаче многокритериальной оптимизации / Е. А. Козлова, Л. И. Руденко // Математика, Информатика, Компьютерные науки, Моделирование, Образование = Mathematics, Informatics, Computer Science, Modeling, Education: сборник научных трудов научно-практической конференции МИКМО-2017 и Таврической научной конференции студентов и молодых специалистов по математике и информатике (Симферополь, Россия, 10–14 апреля 2017 г.) / Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Таврическая академия; [под ред. В. А. Лукьяненко]. — Симферополь: ИП Корниенко А. А., 2017. — С. 138–143.

20. Vincke, P. Multicriteria Decision-Aid. — Chichester: John Wiley & Sons, 1992. — 174 p.

21. Yu, P.-L. Multiple-Criteria Decision Making: Concepts, Techniques, and Extensions. — New York: Plenum Press, 1985. — 402 p. — (Mathematical Concepts and Methods in Science and Engineering, Vol. 30).

22. Hwang, Ch.-L. Group Decision Making Under Multiple Criteria: Methods and Applications / Ch.-L. Hwang, M.-J. Lin. — Berlin: Springer-Verlag, 1987. — 411 p. — (Lecture Notes in Economics and Mathematical System, Vol. 281).

23. Рыков, А. С. Модели и методы системного анализа: принятие решений и оптимизация: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки дипломированных специалистов «Металлургия» и «Физ. моделирование» — Москва: МИСиС: Издательский дом «Руда и металлы», 2005. — 351 с. — (Металлургия и материаловедение XXI века).

# A Method for Evaluating Geo-Environmental Technologies Based on a Weighted Convolution of Partial Performance Criteria in the MATLAB Environment

E. V. Rusanova, E. V. Runev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia  
rusanovaev@mail.ru, jr\_2010@mail.ru

**Abstract.** The paper proposes a model for evaluating geo-ecological protection technologies based on multi-criteria optimization and weighted convolution criteria, on the basis of which the method of calculation is developed, allowing to determine the PQ factor for different objects according to the selected technologies using the MATLAB environment. The work demonstrated the application of the technique in the case of materials made of ash foam concrete with densities and ash content from the incineration of sewage sludge. The determination of the optimum composition of ash foam concrete is relevant for the design of noise shields in railway transport. The proposed simulation algorithm in the MATLAB environment makes it possible to use the procedure of processing the raw data, using several options of their input: in the form of tables of the format .csv or manual input.

**Keywords:** multi-criteria optimization, collation of criteria, MATLAB, geo-ecoprotective technologies, PQ index.

## REFERENCES

1. Svatovskaya L. B., et al. New environmental protection technologies in railway transport: Monography [Novye ekozashchitnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: Monografiya]. Moscow, Training and methodological center for education in railway transport, 2007, 159 p.
2. Sakharova A. S., Svatovskaya L. B., Baidarashvily M. M., Petriaev A. V. Building Wastes and Cement Clinker Using in the Geocoprotective Technologies in Transport Construction. In: Oka F., et al. (eds) *Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics. Proceedings of the 14th International Association for Computer Methods and Regent Advances in Geomechanics (IACMAG 2014) (Kyoto, Japan, September 22–25, 2014)*. London, CRC Press, 2015, Pp. 619–622. DOI: 10.1201/b17435-106.
3. Sakharova A. S., Svatovskaya L. B., Baidarashvily M. M., Petriaev A. V. Sustainable Development in Transport Construction Through the Use of the Geocoprotective Technologies. In: *Advances in Transportation Geotechnics III. Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016) (Guimaraes, Portugal, September 04–07, 2016)*. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 143, Pp. 1401–1408. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.165.
4. Rusanova E. V. Technologies of Recycling of Some Industrial and Transport Waste and Their Integrated Assessment [Tekhnologii utilizatsii nekotorykh otkhodov promyshlennosti i transporta i ikh kompleksnaya otsenka]: diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). St. Petersburg, 2005, 218 p.
5. Svatovskaya L. B., et al. Complex technologies of waste disposal of railway transport: Study guide [Kompleksnye tekhnologii utilizatsii otkhodov zheleznodorozhnogo transporta: Uchebnoe posobie]. Moscow, Training and methodological center for education in railway transport, 2007, 190 p.
6. Titova T. S. Methodology for a Comprehensive Assessment of Environmental Friendliness and Quality of Environmental Protection Technologies. IEQ Index [Metodika kompleksnoy otsenki ekologichnosti i kachestva prirodzashchitnykh tekhnologiy. Indeks IEQ], *Proceedings of Petersburg Transport University [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya]*, 2005, No. 2 (4), Pp. 98–105.
7. Sakharova A. S., Baidarashvily M. M., Petriaev A. V. Transportation Structures and Constructions with Geocoprotective Properties. In: *Transportation Geotechnics and Geocology: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (TGG 2017) (Saint Petersburg, Russia, May 17–19, 2017)*. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 189, Pp. 569–575. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.090.
8. Rusanova E. V., Abu-Khasan M. S., Sakharova A. S. The Control Waste of Communal Services. In: *Earth Science: Proceedings of International Science and Technology Conference (Vladivostok, Russia, March 04–06, 2019)*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 272, Is. 2, Art. No. 022109, 6 p. Published online at June 21, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022109.
9. Sakharova A. S., Petriaev A. V., Kozlov I. S. New Construction Solutions for Geoenvironment Protection of Transport Infrastructure. In: *Earth Science: Proceedings of the International Science and Technology Conference (Vladivostok, Russia, March 04–06, 2019)*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 272, Is. 2, Art. No. 022220, 6 p. Published online at June 21, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022220.

10. Svatovskaya L. B., Sychova A. M., Sychov M. M., Okrepilov V. V. New Parameter of Geoecological Protective Ability of Construction Articles. In: Murgul V. (eds) *Proceedings of International Scientific Conference Week of Science in SPbPU — Civil Engineering (SPbWOSCE-2015) (Saint Petersburg, Russia, September 03–04, 2015)*. MATEC Web of Conferences, 2016, Vol. 53, Art. No. 01024, 4 p. Published online at April 15, 2016. DOI: 10.1051/mateconf/20165301024.
11. Svatovskaya L. B., Sychov M. M., Sychova A. M., Gravit M. V. New Geocoprotective Properties of the Construction Materials for Underground Infrastructure Development. In: *Proceedings of the 15th International scientific conference «Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development» (Saint Petersburg, Russia, September 12–15, 2016)*. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 165, Pp. 1771–1775. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.921.
12. Sycheva A. M., Khitrov A. V., Shershneva M. V., Rusanova E. V. Production of Ash-Foam Concrete Using the Sewage Sludge Ash [Zolopenobeton s ispol'zovaniem zoly osadka stochnykh vod], *Cement and its Applications [Tsement i ego primenenie]*, 2006, No. 3, P. 64.
13. Titova T. S., Makarova E. I., Dudkin E. P. Use in the Construction of Noise Protection Autoclaved Foam Concrete [Ispol'zovanie v stroitel'stve avtoklavnogo shumozashchitnogo penobetona], *Technology of Technosphere Safety [Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti]*, 2014, No. 2 (54), P. 35.
14. Rublevskaia O. N., Vasil'ev B. V., Protasovskii E. M., Petrov S. V. Wastewater Sludge Processing and Utilization at the Wastewater Treatment Facilities of Saint-Petersburg: Best Practices and Prospects [Obrabotka i utilizatsiya osadkov stochnykh vod na ochistnykh sooruzheniyakh Sankt-Peterburga: opyt i perspektivy], *Water Supply and Sanitary Technique [Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika]*, 2018, No. 10, Pp. 47–51.
15. Svatovskaya L. B., Titova T. S., Rusanova E. V. Ash Foam Concrete and Its Application on Transport [Zolopenobeton i ego primenenie na transporte], *Science and Technology in Transport [Nauka i tekhnika transporta]*, 2005, No. 2. Pp. 36–39.
16. Rusanova E. V., Abu-Khasan M. S., Egorov V. V. The Complex Evaluation of Geo Eco-Protective Technologies Taking into Account the Influence of Negative Temperatures, *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2019) (Vladivostok, Russia, October 01–04, 2019)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, Vol. 753, Is. 2, Art No. 022042, 8 p. Published online at March 05, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022042.
17. Noghin V. D. Weighted Sum Scalarization in Multicriteria Optimization [Lineynaya svertka kriteriev v mnogokriterial'noy optimizatsii], *Artificial Intelligence and Decision Making [Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy]*, 2014, No. 4, Pp. 73–82.
18. Sigal A. V., Remesnik E. S. Evaluating a Vector of Weighting Coefficients [Otsenka vektora vesovykh koeffitsientov], *Proceedings of the 8th International Conference on Systems Analysis and Information Technologies (SAIT-2019) [Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii: Trudy Vos'moy mezhdunarodnoy konferentsii (SAIT-2019)]*, (Irkutsk, Russia, July 08–14, 2019). Moscow, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, 2019, Pp. 478–486. DOI: 10.14357/SAIT2019064.
19. Kozlova E. A., Rudenko L. I. Linear Generalized Criteria in the Problem of Multicriteria Optimization [Lineynye obobshchennye kriterii v zadache mnogokriterial'noy optimizatsii]. In: *Mathematics, Computer Science, Modeling, Education: Collection of scientific works of the Scientific-Practical Conference MIKME-2017 and the Tauri Scientific Conference of Students and Young Specialists in Mathematics and Informatics [Matematika, Informatika, Komp'yuternye nauki, Modelirovanie, Obrazovanie: sbornik nauchnykh trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii MIKMO-2017 i Tavricheskoy nauchnoy konferentsii studentov i molodykh spetsialistov po matematike i informatike]*, (Simferopol, Russia, April 10–14, 2017), Simferopol, Kornienko A. A. Publishing House, 2017, Pp. 138–143.
20. Vincke P. *Multicriteria Decision-Aid*. Chichester, John Wiley & Sons, 1992, 174 p.
21. Yu P.-L. *Multiple-Criteria Decision Making: Concepts, Techniques, and Extensions*. New York, Plenum Press, 1985, 402 p.
22. Hwang Ch.-L., Lin M.-J. *Group Decision Making Under Multiple Criteria: Methods and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, 1987, 411 p.
23. Rykov A. C. *Models and methods of systems analysis: decision-making and optimization: Study Guide [Modeli i metody sistemnogo analiza: prinyatie resheniy i optimizatsiya: Uchebnoe posobie]*. Moscow, National University of Science and Technology «MISiS», Ore and Metals Publishing House, 2005, 351 p.