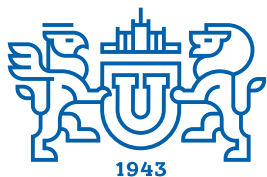


# ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

2020  
Т. 20, № 1

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

## «КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

### Редакционная коллегия:

**Шестаков А.Л.**, д.т.н., проф. (*гл. редактор*) (г. Челябинск);  
**Бурков В.Н.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*зам. гл. редактора*) (г. Москва);  
**Логиновский О.В.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*зам. гл. редактора*) (г. Челябинск);  
**Плотникова Н.В.**, к.т.н., доц. (*отв. секретарь*) (г. Челябинск);  
**Баркалов С.А.**, д.т.н., проф. (г. Воронеж);  
**Березанский Л.**, PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);  
**Джапаров Б.А.**, д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);  
**Затонский А.В.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Куликов Г.Г.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (г. Уфа);  
**Мазуров В.Д.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Екатеринбург);  
**Максимов А.А.**, д.т.н. (г. Новокузнецк);  
**Мельников А.В.**, д.т.н., проф. (г. Ханты-Мансийск);  
**Прангишвили А.И.**, д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);  
**Щепкин А.В.**, д.т.н., проф. (г. Москва);  
**Ячиков И.М.**, д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

### Редакционный совет:

**Авербах И.**, PhD, проф. (г. Торонто, Канада);  
**Браверман Е.**, PhD, проф. (г. Калгари, Канада);  
**Дегтярь В.Г.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);  
**Казаринов Л.С.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Кибалов Е.Б.**, д.э.н., проф. (г. Новосибирск);  
**Новиков Д.А.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Москва);  
**Панферов В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Слинько А.**, PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);  
**Столбов В.Ю.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Танана В.П.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);  
**Ухоботов В.И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);  
**Ушаков В.Н.**, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);  
**Шестаков И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);  
**Ширяев В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Шнайдер Д.А.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Штессель Ю.**, PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



# BULLETIN

OF THE SOUTH URAL  
STATE UNIVERSITY

2020

Vol. 20, no. 1

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,  
AUTOMATIC CONTROL,  
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

---

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.  
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

---

## South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

### Editorial Board:

**Shestakov A.L.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Burkov V.N.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;  
**Loginoskiy O.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Plotnikova N.V.**, Cand. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*executive secretary*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Barkalov S.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;  
**Berezansky L.**, PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;  
**Dzhaparov B.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan.  
**Zatonskiy A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;  
**Kulikov G.G.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;  
**Mazurov V.D.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;  
**Maksimov A.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;  
**Melnikov A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;  
**Prangishvili A.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;  
**Shchepkin A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;  
**Yachikov I.M.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

### Editorial Council:

**Averbakh I.**, PhD, Prof., University of Toronto, Canada;  
**Braverman E.**, PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;  
**Degtyar' V.G.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;  
**Kazarinov L.S.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Kibalov E.B.**, Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;  
**Novikov D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;  
**Panferov V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Slinko A.**, PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;  
**Stolbov V.Yu.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;  
**Tanana V.P.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Ukhotov V.I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Ushakov V.N.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;  
**Shestakov I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;  
**Shiryayev V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Schneider D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Shtessel Yu.**, PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Информатика и вычислительная техника

- АНТОНОВ В.В., КУЛИКОВ Г.Г., ХАРИСОВА З.И., РОДИОНОВА Л.Е. Теоретико-множественный подход к построению дуальной системной модели ПАК для исследуемой области деятельности со смешанными реальными и виртуальными объектами ..... 5
- LOGINOVSKIY O.V., RIZVANOV K.A., KULIKOV G.G. Application of BI-Principles in the Gate Project Management System to Create a Digital Twin of the GTE ..... 16

## Управление в технических системах

- БИЛЬФЕЛЬД Н.В., ВОЛОДИНА Ю.И. Моделирование электрических систем и систем управления в современных пакетах MATLAB ..... 27
- КОЛКК А.А., КОЛКК В.А., ШИРЯЕВ В.И. Совершенствование алгоритмов распознавания типов объектов в системах управления с применением нечеткой логики в условиях неопределенности ..... 39
- ЖИГАЛОВ И.Е., МОНОГАРОВ О.И. Экспертная система диагностики причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции ..... 51
- ПАНФЕРОВ В.И., ТРЕНИН Н.А., ПАНФЕРОВ С.В., ХАЮТИН А.М., ПАУКОВ Д.В., ХАЛДИН К.С. К настройке алгоритма вычисления барометрической высоты летательного аппарата системой воздушных сигналов ..... 60

## Инфокоммуникационные технологии и системы

- SAIDOV B.B., TAMBOVTSEV V.I., PROKOPOV I.I. Spectrum Transformation of an Amplitude-Modulated Signal on an Ohmic Nonlinear Element ..... 71
- ЧУХЛОМИН И.Е., ФАЙЗУЛИН Н.А., ПАВЛИК В.В. Анализ межпериодной обработки при нестационарном воздействии пассивной гауссовой помехи ..... 79

## Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

- SINITSIN V.V., SHESTAKOV A.L. An Approach to Fault Diagnosis of Gearbox Based on an Instantaneous Angular Acceleration. Experimental Study ..... 89

## Управление в социально-экономических системах

- БОНДАРЕНКО Ю.В., ГОРОШКО И.В., ВАСИЛЬЧИКОВА Е.В. Экспертно-тестовый механизм комплексной оценки кандидатов при подборе персонала ..... 100
- БАРКАЛОВ С.А., ГЛУШКОВ А.Ю., МОЙСЕЕВ С.И. Математические методы многокритериального оценивания привлекательности проектов ..... 111

## Автоматизированные системы управления технологическими процессами

- ТУГАШОВА Л.Г., ЗАТОНСКИЙ А.В. Снижение энергетических затрат при управлении установкой ректификации нефти ..... 120
- ИСТОМИН Д.А., СТОЛБОВ В.Ю., ПЛАТОН Д.Н. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики ..... 133

## Краткие сообщения

- МЕХТИЕВ А.Д., ЮРЧЕНКО А.В., НЕШИНА Е.Г., АЛЬКИНА А.Д. Использование оптического волокна G-652 для контроля горного массива угольных шахт ..... 144
- PISKORSKII D.S., ABDULLIN F.K., NIKOLAEVA A.R. Optimization of A-Star Search Algorithm ..... 154
- RAGOZIN A.N., TELEZHNIKIN V.F., USYNIN A.M., DOTSOEV L.Ya., PLETENKOVA A.D., SAIDOV B.B. Digital Spectral Analysis on the Plane of Complex Frequencies of Transients of the Heart Rhythm at Schoolchildren at Performing a Proof Test ..... 161
- ДРАНКО О.И. О понятии «выручка окупаемости» для проектно-ориентированных организаций ..... 171

# CONTENTS

## Informatics and Computer Engineering

- ANTONOV V.V., KULIKOV G.G., HARISOVA Z.I., RODIONOVA L.E. Theoretical and Multiple Approach to Building a Dual SAC System Model for the Research Area with Mixed Real and Virtual Objects ..... 5
- LOGINOVSKIY O.V., RIZVANOV K.A., KULIKOV G.G. Application of BI-Principles in the Gate Project Management System to Create a Digital Twin of the GTE ..... 16

## Control in Technical Systems

- BILFELD N.V., VOLODINA Yu.I. Modeling of Electrical Systems and Control Systems by Modern MATLAB Packages ..... 27
- KOLKK A.A., KOLKK V.A., SHIRYAEV V.I. Development of Algorithms of Automatic Recognition of Objects in Control Systems Using Fuzzy Logic in Terms of Uncertainties ..... 39
- ZHIGALOV I.E., MONOGAROV O.I. The Expert Diagnostic System of the Reasons for Dangerous Microdefects in Cable Insulation ..... 51
- PANFEROV V.I., TRENIN N.A., PANFEROV S.V., HAYUTIN A.M., PAUKOV D.V., HALDIN K.S. To the Solution of the Problem on the Determination of Barometric Height of the Aircraft System of Air Signals ..... 60

## Infocommunication Technologies and Systems

- SAIDOV B.B., TAMBOVTSEV V.I., PROKOPOV I.I. Spectrum Transformation of an Amplitude-Modulated Signal on an Ohmic Nonlinear Element ..... 71
- CHUKHLOMIN I.E., FAIZULIN N.A., PAVLIK V.V. Analysis of Interperiod Processing upon Non-Stationary Influence of Passive Gaussian Clutter ..... 79

## Instrument Engineering, Metrology and Information and Measuring Devices and Systems

- SINITSIN V.V., SHESTAKOV A.L. An Approach to Fault Diagnosis of Gearbox Based on an Instantaneous Angular Acceleration. Experimental Study ..... 89

## Control in Social and Economic Systems

- BONDARENKO Yu.V., GOROSHKO I.V., VASILCHIKOVA E.V. Expert-Test Mechanism for Integrated Assessment of Candidates in Recruitment of Personnel ..... 100
- BARKALOV S.A., GLUSHKOV A.Yu., MOISEEV S.I. Mathematical Methods of Multicriteria Evaluation of Attractiveness of Projects ..... 111

## Automated Process Control Systems

- TUGASHOVA L.G., ZATONSKIY A.V. Reduction of Energy Costs by Oil Rectification Plant Control ..... 120
- ISTOMIN D.A., STOLBOV V.Yu., PLATON D.N. Expert System for Assessment of Technical Condition of Electric Centrifugal Pump Assemblies Based on Productive Presentation of Knowledge and Fuzzy Logic ..... 133

## Brief Reports

- MEKHTIYEV A.D., YURCHENKO A.V., NESHINA E.G., ALKINA A.D. Using G-652 Optical Fiber to Control Mountain Massifes of Coal Mines ..... 144
- PISKORSKII D.S., ABDULIN F.K., NIKOLAEVA A.R. Optimization of A-Star Search Algorithm ..... 154
- RAGOZIN A.N., TELEZHKIN V.F., USYNIN A.M., DOTSOEV L.Ya., PLETENKOVA A.D., SAIDOV B.B. Digital Spectral Analysis on the Plane of Complex Frequencies of Transients of the Heart Rhythm at Schoolchildren at Performing a Proof Test ..... 161
- DRANKO O.I. About the Concept "Payback Revenue" for Project-Oriented Organizations ..... 171

## ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ДУАЛЬНОЙ СИСТЕМНОЙ МОДЕЛИ ПАК ДЛЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ОБЛАСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СО СМЕШАННЫМИ РЕАЛЬНЫМИ И ВИРТУАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

**В.В. Антонов<sup>1, 2</sup>, Г.Г. Куликов<sup>1</sup>, З.И. Харисова<sup>2</sup>, Л.Е. Родионова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

<sup>2</sup> Уфимский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Уфа, Россия

**Введение.** В настоящее время актуальной теоретической и практической проблемой является разработка методов формализации логических отношений между реальными и виртуальными объектами и их теретико-множественным замыканием. Так, например, классами эквивалентности на финансовых рынках многих стран являются реальные объекты – валюта и соответствующие им виртуальные информационные объекты – криптовалюта, учет потоков которых ведется в многопользовательской системе отношений блокчейн. В основе информационной технологии проведения транзакций криптовалюты лежат элементы теории криптографии. Увеличение или уменьшение мощности множества объектов учёта, как правило, реализуется путем майнинга, форжинга и инвестирования в новую цифровую валюту. На сегодняшний день использование криптовалюты весьма привлекательно для ряда пользователей благодаря своей относительной независимости (сложности) от внешних и внутренних факторов (в виде влияния на транзакции государственных органов, банковских структур, участников самой платежной системы), необратимостью проведенных операций на финансовом рынке и относительно полной в пределе анонимностью. Перечисленные обстоятельства являются привлекательным полем для применения различных дополнительных (из замкнутого множества операций в Internet) операций. **Цель исследования.** Построение дуальной системной модели программного аналитического комплекса для исследуемой области деятельности со смешанными реальными и виртуальными объектами на основе теоретико-множественного подхода. **Материалы и методы.** Применение правила международного стандарта системной инженерии ISO/IEC/IEEE 15288, а также метода семантических дифференциалов Ч. Осгуда для обработки и представления информации. **Результаты.** Появляется возможность применения технологии, построенной на децентрализации, – использование блокчейна (создание полностью децентрализованной платформы, на которой выполняются бизнес-процессы), позволяющая улучшить рабочие процессы, а также создать единый язык коммуникации. **Заключение.** В связи с этим возникает интерес к использованию аналитики больших данных, категории информационных объектов – программных модулей, обеспечивающих реализацию соединения реальных и виртуальных объектов с информационными процессами с учетом их взаимных отношений в программном аналитическом комплексе.

*Ключевые слова:* программно-аналитический комплекс (ПАК), криптовалюта, блокчейн, системная модель, ISO 15288, предметная область, иерархия Хомского.

### Введение

Свойства двойственности (противоположности, противоречивости) отношений – транзакций между виртуальными объектами в информационной среде – определяются как спецификой объектов, так и свойствами самой среды. Так, например, согласно статистическим данным за 2018 год, правоохранительными органами Российской Федерации было зарегистрировано более 100 тыс. преступлений, совершенных с использованием информационно-телекоммуникационных технологий.

По сравнению с 2017 годом количество такого рода преступлений возросло более чем на 33 %. За последние 6 лет киберпреступность, согласно статистике, демонстрирует десятикратный

рост. Так, в 2013 году подобных преступлений было порядка 11 тыс., в 2014 г. – 44 тыс., в 2016 г. – более 66 тыс.

Актуальность данной темы также обусловлена множеством выявленных фактов нарушения целостности и конфиденциальности данных, в том числе утечкой информации в сеть Internet. Так, в апреле 2019 года согласно сведениям информационного портала «ItSec – Информационная безопасность» неправомерно был обнародован реестр лиц, сформированный банковскими структурами в соответствии с требованиями Федерального закона от 7 августа 2001 г. № 115-ФЗ «О противодействии легализации (отмыванию) доходов, полученных преступным путем, и финансированию терроризма». Сложившаяся ситуация негативно может сказаться на статусе лиц, входящих в обнародованный список, а также подорвать экономическую ситуацию страны в целом.

### Построение формальной теоретико-множественной модели предметно-ориентированной деятельности с виртуальными объектами на примере криптовалюты

Построение формальной теоретико-множественной модели предметно-ориентированной деятельности с криптовалютой в различных аспектах обусловлена также стремительно возросшим в последнее время уровнем преступности экономической направленности с использованием криптовалюты [10], например на множестве процессов

$$Pv = \{pv_1, pv_2, \dots, pv_n\},$$

где  $pv_1$  – обмен товаров запрещенного распространения – наркотических и психотропных веществ, оружия, боеприпасов и иных предметов [2];

$pv_2$  – легализация доходов, получаемых преступным путем;

$pv_3$  – распространение вредоносных компьютерных программ для использования ресурсов пользователей сети в фоновом режиме (криптоджекинг);

$pv_4$  – распространение запрещенных услуг и контента;

$pv_5$  – финансирование терроризма и экстремизма.

Состояние объекта в целом в исследуемой категории можем определить в понятиях его «смешанного» реального и виртуального состояний (рис. 1) [9].

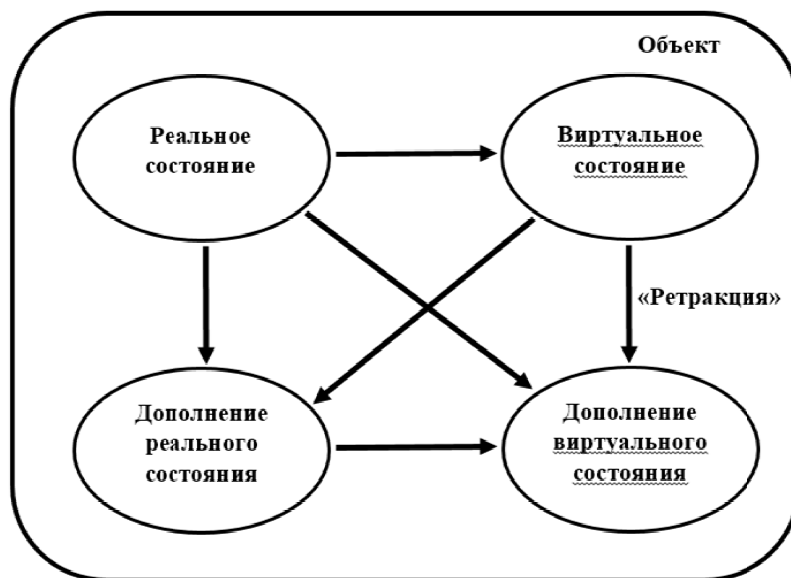


Рис. 1. «Смешанное» состояние объекта (аналог кубита)  
Fig. 1. "Mixed" state of object (similar to cubit)

Стремительному распространению по всему миру технологии виртуальных денег способствовали универсальность применения, открытость расчетных операций и предельная анонимность. Главной из особенностей использования криптовалют является их децентрализация и непривязанность к конкретной географической точке, политическому строю и экономической сис-

теме какой-либо из стран, несмотря на вполне реальную привязку к курсу наиболее востребованных валют во всем мире [13, 14]. В связи с этим образовалось мировое криптовалютное финансовое сообщество, что наложило ряд неразрешимых проблем при выявлении преступных деяний с использованием цифровой валюты на международном уровне.

Применяя правила международного стандарта системной инженерии ISO/IEC/IEEE 15288, можем формализовать основные составляющие по девяти группам (рис. 2), представленные формулой  $IT = \{it_1, it_2, \dots, it_n\}$ . Это открывает возможность в соответствии с приведенным стандартом обеспечить соответствие информационных объектов реальным объектам с учетом прослеживаемости.

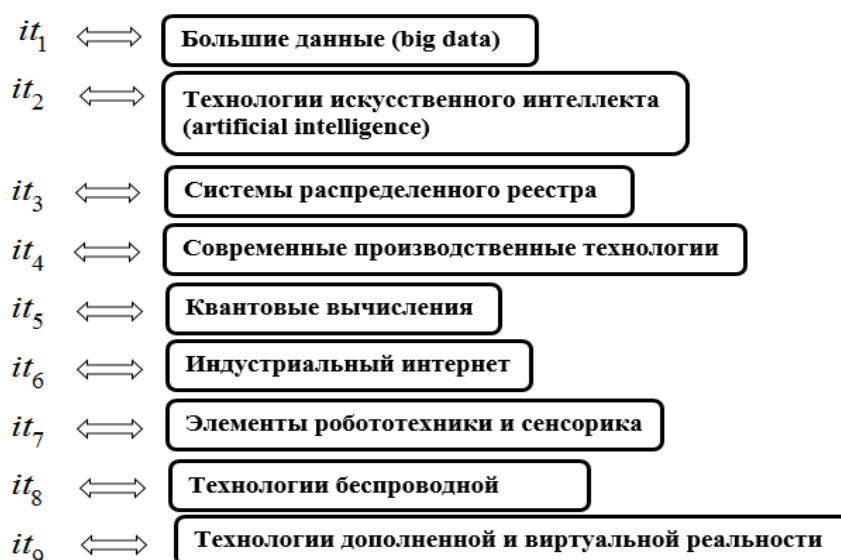


Рис. 2. Основные группы технологий виртуальных денег  
Fig. 2. Core Virtual Money Technology Groups

Таким образом, объекты учета данного бизнес-процесса могут быть представлены различными категориями информационных объектов, связанных между собой отношениями, а выделяя виртуальные и реальные объекты, приходим к тому, что отношения между виртуальными объектами и реальными объектами выражаются символической моделью хранилища данных и определяют структуру. Причем эти отношения могут быть представлены в терминах теории категорий.

Все это дает возможность применения современных стандартизованных методов моделирования описываемого бизнес-процесса, учитывающих формализованные формальные логические свойства, метаязыки и правила для последующей разработки программного обеспечения.

Учитывая, что довольно важным аспектом является установление международного сотрудничества в области противодействия киберпреступлениям с соблюдением национальных и региональных правил обращения с криптовалютой, необходимо учитывать в модели так называемые транзакции киберденег. На сегодняшний день лишь ряд стран (например, Китай, Южная Корея) запретили анонимность проведения транзакций киберденег и бесконтрольное распространение новых токенов валюты в стране. Отчасти регламентировали функционирование кибербирж такие страны, как Таиланд, Сингапур, Япония, Пуэрто-Рико Мальта, Швейцария и Бермудские острова. В противовес имеются страны «офшорной юрисдикции» (например, Белиз, Сейшелы, Доминикана), не учитывающие рекомендации межправительственной организации Financial Action Task Force on Money Laundering [15] (FATF) – разработчиков финансовых мер борьбы с отмыванием денег.

Режимы сотрудничества стран все чаще становятся предметом дискуссий международных коллегий и саммитов. Так, заместитель генерального прокурора Соединенных Штатов Америки (США) Род Розенштейн на 87-й Генеральной Ассамблее Интерпола призвал страны к выстраиванию международных связей в области расследования преступлений с использованием криптовалют [16], беспрепятственного использования международных информационных ресурсов и баз данных, закрепленных в единой политике регулирования цифровой валюты, в частности, призы-

вая полагаться на положительный опыт США в области регулирования процессов «киберотмывания» денег. Успешными на сегодняшний день проектами сотрудничества правительств различных стран можно считать, например, Silk Road 2.0, который являлся крупным интернет-магазином в анонимной сети Tor по продаже наркотических средств со средним ежемесячным оборотом 8 млн долларов, Hydra, Cloud9 и др.

В настоящее время международное сотрудничество, как правило, заключается на уровне пограничных служб и Интерпола. С 2018 года в целях формирования трансграничного сотрудничества в области противодействия преступлениям с использованием криптовалют заключено партнерство, именуемое J5 [17], между Австралией (Комиссия по уголовным расследованиям ASIC и Налоговая служба ATO), Канадой (Налоговое агентство CRA), Нидерландами (Fiscale Inlichtingen-Opsporingsdienst FIOD), Великобританией (Королевская налоговая и таможенная служба HMRC) и США (Налоговая служба IRS) – Joint Chiefs of Global Tax Enforcement.

Регулирование криптоотрасли не было оставлено без внимания на встрече министров финансов и глав банков на саммите Большой двадцатки G20 в 2018 году [18], итогом которого стало заключение о нецелесообразности полного запрета рынка криптовалют, необходимости регулятора в правоохранительной и налоговой областях и цифровой идентификации. Отдельного внимания заслуживает Комиссия США по ценным бумагам и биржам (SEC), расследования которой в основном связаны с поиском свидетелей и доказательств на трансграничном уровне с учетом политических, экономических систем и законодательства в сфере эксплуатации токенов (акций различных проектов).

Отчасти благодаря опыту зарубежных стран в сентябре 2019 года Ассоциацией банков России была подготовлена концепция по противодействию оборота децентрализованных криптовалют, которая предусматривает лишение анонимности владельцев виртуальных цифровых активов [19, 20]. Кроме того, проект предусматривает создание собственного международного блокчейна на территории Российской Федерации и национальных токенов в том числе, а также предусматривает возможность определения принадлежности цифровой валюты (определение владельца, логинов и паролей криптовалютных кошельков), получения информации в рамках процедур налогообложения (декларирование доходов и расходов) и банкротства, а также исполнительных производств [21]. Однако на сегодняшний день проект Федерального закона «О цифровых финансовых активах» не принят, рассмотрение его было отложено на неопределенный срок.

Как известно, имеется ряд общих черт в совершаемых преступлениях с использованием криптовалют. С учетом их своевременного распознавания можно выдвинуть методику по их расследованию, состоящую из последовательных этапов  $A = \{A_1, \dots, A_4\}$ :

- определение криптовалютного кошелька по транзакциям (программный, аппаратный или бумажный кошелек, онлайн-кошелек, мобильное приложение)  $A_1$ ;
- определение биржи криптовалюты, криптовалютных обменников, торговых площадок, карт  $A_2$ ;
- определение связей – поиск посредников-участников операций  $A_3$ ;
- построение нейросетевых связей – определение валюты, фиатных выведенных денег  $A_4$ .

Использование требований системной инженерии в рамках приведенного выше стандарта, построение модели с использованием Иерархий Хомского и предлагаемого категорийного подхода [2–4] позволяют уже на уровне модели сформировать границы между семантическими и синтаксическими описаниями автоматизируемых бизнес-процессов и программными модулями разрабатываемых комплексов.

При этом формализация логических отношений позволяет сформировать семантическую модель, формальную вышестоящей грамматики. На основании приведенного (определение границ в совокупности с семантической моделью) можем определить семантическую меру, которая будет выступать в роли цели, далее точку зрения [8].

Далее:

1) можем определить функциональное содержание исследуемой предметной области в виде контекстной диаграммы, определив в качестве каналов взаимодействия с внешней средой вход и выход (рис. 3), ограничения – управление, ресурсы – механизм (см. рис. 3);



2) отношения между информационными объектами определим как математическую категориальную структуру. Эта структура на формальном уровне описывает свойства информационных объектов и их отношения (т. е. как подмножество декартова произведения);

3) уходим от проблемы семантического анализа за счет выполнения двухшаговой процедуры, а именно: распознавания структуры и построения операций на ее основе, т. е. используя метод, предложенный Н. Хомским, – «синтаксически ориентированной трансляции», переходим к синтаксическому анализу [4, 5];

4) приходим к анализу и рассмотрению конечного перечня цепочек, что может быть классифицировано как математический метод анализа предметной области. В частности, для рассматриваемого примера криптовалюты – это определения дополнительных состояний, часть из которых является ненаблюдаемым в прямой модели, что может приводить к применению противоположных «скрытых» действий;

5) применение такого метода открывает возможность рассмотрения отношений как функций независимо от соответствующих информационных объектов и в конечном счете описания информационной системы как конечного множества функций и отношений между ними, включая скрытые части отношений между объектами.

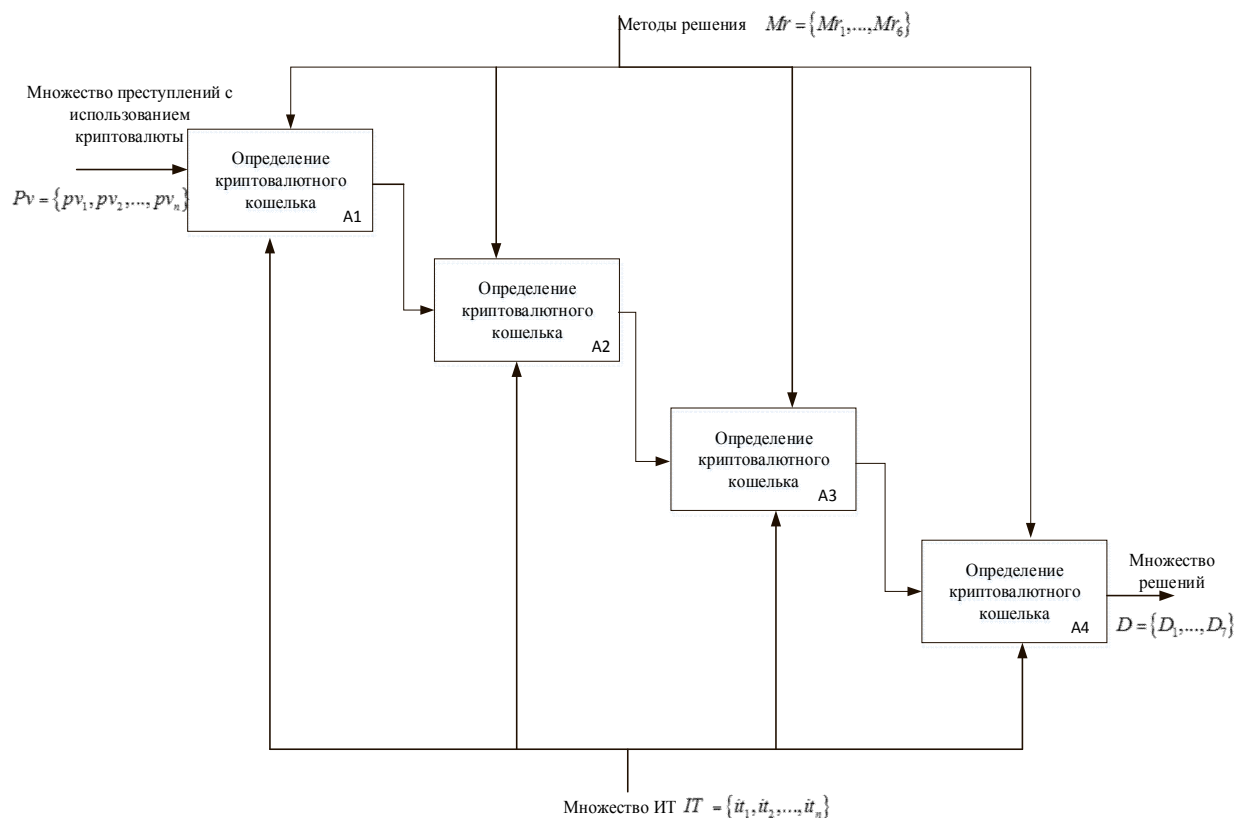
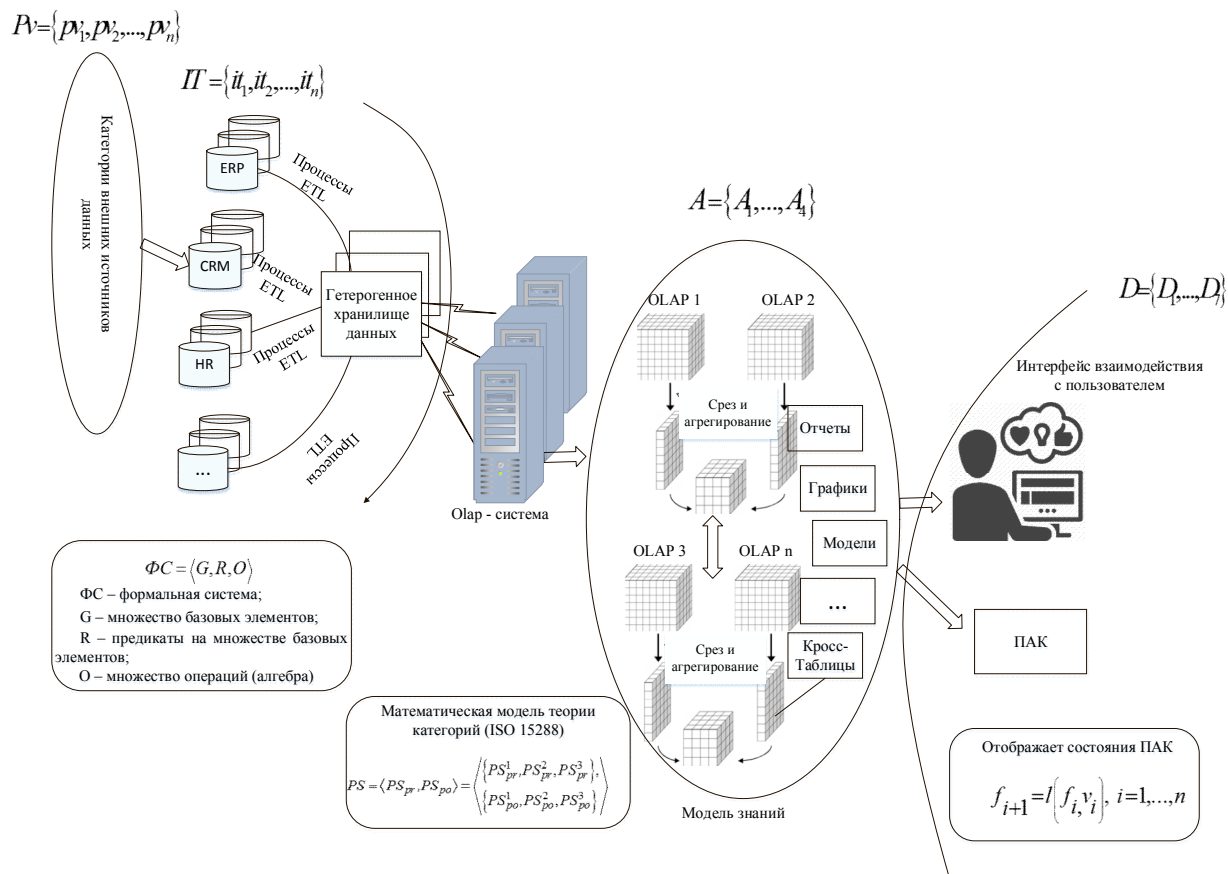


Рис. 3. Системная модель комплексного решения раскрытия преступлений  
Fig. 3. System model of complex crime resolution

Учитывая изложенное, появляется возможность сведения процесса к формальному алгоритму (рис. 4) и в результате приходим к атрибутивно транслируемой грамматике [4, 5, 8].

Очевидно, что в качестве символического базиса может быть использовано декартово произведение, которое в данном случае будет равнозначно OLAP-кубу [1–4]. Применение метода семантических дифференциалов Ч. Осгуда позволяет декларировать отношения между реальными объектами как отношение отрицания (противоположность по Декарту). При этом виртуальные объекты становятся, в терминологии Декарта, частными определениями [5]. Приходим к возможности определения качественной составляющей на основании присутствия ряда количественных параметров.



**Рис. 4. Формальные аспекты представления преобразования информации**  
**Fig. 4. Formal aspects of information transformation presentation**

Это позволяет:

- 1) принимать управленческие решения, т. е. перейти от формальной к семантической модели [6, 7];
- 2) открывает возможность проектирования структуры программных комплексов в виде множества объектов – категорий и отношений между ними (имеющих свойства функторов). Это позволяет описывать в виде категорных отношений и взаимодействие функциональных программ, и правила интеграции информационных объектов предметной области, и учет изменений самой предметной области [6];
- 3) для системного моделирования исследуемой предметной области использовать формализованные правила, представленные в виде категорных отношений. Могут быть использованы любые объектные (графоаналитические) языки.

Можем определить виртуальный объект как информационный объект, который является результатом отношений информационных объектов и достроен до декартово замкнутой категории. В частности, это не противоречит кибернетическому закону, который был сформулирован Уильямом Россом Эшби [8].

Таким образом, результат отношения двух взаимодействующих информационных объектов в ряде случаев может быть интерпретирован как новый информационный объект (реальный или виртуальный).

Рассматривая полученные таким образом отношения между новыми информационными объектами, извлекая новые данные, систематизируя их, приходим к возможности выстраивания новых отношений даже между виртуальными объектами и получения иерархической структуры этих отношений, что открывает возможность построения стратегических планов развития и оперативного принятия опережающих управленческих решений. Представление отношений в виде информационных объектов позволяет рассматривать их в качестве «цифрового двойника», что расширяет «электронную» прозрачность во многих аспектах, в том числе управленческих и технологических.

Таким образом, структура программного комплекса, построенная по вышеприведенному методу, будет содержать информацию для реинжиниринга комплекса без изменения реально действующей структуры, например заменой виртуальных объектов реальными.

Применение современных технических решений, включая элементы искусственного интеллекта, были также предложены на совместном семинаре Нового банка развития (НБР), Евразийской группы по противодействию легализации преступных доходов и финансированию терроризма (ЕАГ) и Международного учебно-методического центра финансового мониторинга (МУМЦФМ) «Совершенствование финансового мониторинга с использованием новых технологий» [22, 23].

В соответствии с декларацией по итогам проведенного семинара, принятой в 2019 году, направленной в первую очередь на противодействие отмыванию денег и финансированию терроризма, в связи с необходимостью повышения эффективности «антиотмывочных» систем государств и для развития международного сотрудничества и взаимодействия международных организаций был предложен ряд мер, которые в целом коррелируют по применимости с рекомендациями по установлению сотрудничества в области расследования преступлений с использованием криптовалют, а именно [11, 12]:

– объединение усилий по выработке единого подхода к пониманию рисков, связанных с использованием новых технологий на финансовых рынках, и выработке мер по их минимизации (множество методов решения проблем  $Mr = \{Mr_1, \dots, Mr_6\}$ );

– деанонимизация пользователей глобальной сети ( $Mr_1$ );

– выработка действенных мер по обороту виртуальных активов для управления и минимизации рисков отмывания денег и финансирования терроризма ( $Mr_2$ );

– организация своевременного и непрерывного межгосударственного обмена опытом и информацией в рамках расследования преступлений ( $Mr_3$ );

– развитие инновационных технологий контроля рисков в рамках противостояния преступлениям с использованием криптовалют ( $Mr_4$ );

– разработка обучающих информационных ресурсов в целях повышения грамотности населения по обращению с криптовалютой, повышение квалификации и переподготовка кадров, занимающихся расследованием киберпреступлений ( $Mr_5$ );

– проведение исследований в области новейших информационных технологий и разработка программного обеспечения и аппаратных систем с использованием нейросетевых технологий в целях обеспечения современными средствами оперативного расследования преступлений с использованием криптовалют ( $Mr_6$ ). С целью увеличения эффективности мер, направленных на противодействие криминальному обороту криптовалюты, необходима стратегия, реализуемая на международном уровне, по основным проблемным направлениям, а именно (множество решений  $D = \{D_1, \dots, D_7\}$ ):

– единое определение статуса и юридической природы криптовалюты на международной арене, поскольку на сегодняшний день толкование цифровых денег идет в соответствии с определениями товара, валюты, средства накопления, формы платежной услуги и платежного инструмента ( $D_1$ );

– установление единого судопроизводства в отношении преступников, использующих криптовалюту ( $D_2$ );

– формирование безопасного реестра финансовых потоков криптовалют из числа стран с эффективными методиками противодействия отмыванию денег и финансирования терроризма ( $D_3$ );

– налаживание межведомственного взаимодействия (регулирующих и надзорных органов управления, финансовых организаций, правоохранительных органов, спецслужб и пр.) ( $D_4$ );

– организация доступа в упрощенном виде к информации о совершаемых преступных деяниях с использованием криптовалют ( $D_5$ );

– формирование мер, направленных на идентификацию владельцев криптокошельков ( $D_6$ );

– создание дополнительных систем проверки и отслеживания платежей для мониторинга финансирования и укрепление межгосударственных связей терроризма ( $D_7$ );

– для идентификации владельцев кошельков, анализа данных и реализации обмена в режиме реального времени требуется организация межгосударственного центра с прямым доступом к криминологическим инструментам и криптовалютным базам ( $D_8$ ).

В результате получаем комплексную системную модель:

$$SM = \{Pv, IT, Mr, D\}.$$

Полученную комплексную системную модель можно представить, как поверхность в пространстве достаточно большой размерности (размерность определяется, так как есть декартово произведение).

### Выводы

В результате в каждой точке на поверхности возникает семантика самой информации, которая может определяться как неопределенность знаний либо отношений. Не учтенные в модели предметной области (ПО) свойства представляются в виде отдельной ПО и характеризуются неучтенными свойствами, позволяющими рассматривать ее как окружающую среду. В итоге каждая ПО интегрирует с окружающей средой и имеет возможность считаться распределенной. Приходим к возможности применения технологии, построенной на децентрализации, – использование блокчейна (создание полностью децентрализованной платформы, на которой выполняются бизнес-процессы), что может помочь улучшить рабочие процессы, а также создать единый язык коммуникации. Одной из причин такой популярности является строгая математическая база, фундаментальной частью является криптографический алгоритм ECDSA – Elliptic Curve Digital Signature Algorithm. Все это представимо в виде системы уравнений, полученной на основе формальной модели программного обеспечения. Так как предполагается распределенность объектов, будет иметь место пересечение множеств, описывающих их семантические свойства. В результате отношения объектов (БП) предполагается оценивать путем введения количественной и качественной оценок.

Использование метода семантических дифференциалов Ч. Осгуда для обработки и представления информации применительно к этапам рассматриваемого процесса обеспечивает возможность построения требуемых функций принадлежности.

### Литература

1. Антонов, В.В. Метод проектирования адаптивного программного комплекса на основе методологии категорийной формальной модели открытой предметной области / В.В. Антонов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 1. – С. 258–263.
2. Антонов, В.В. Формальная модель предметной области на основе нечетких отношений / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов // Программные продукты и системы: междунар. журн. – Тверь, 2011. – № 2 (94). – С. 48–51.
3. Куликов, Г.Г. Подход к формированию структуры самоорганизующейся интеллектуальной системы в форме декартово замкнутой категории (на примере проектирования информационной аналитической программной системы) / Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, А.Р. Фахруллина, Л.Е. Родионова // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 27. – С. 48–69.
4. Хомский, Н. Язык и проблема знания / Н. Хомский // Вестник МГУ: сб. науч. тр. – М., 1996. – Вып. 6. – С. 157–185.
5. Куликов, Г.Г. Теоретические и прикладные аспекты построения моделей информационных систем / Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, Д.В. Антонов. – LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, 2011. – 134 с.
6. Analytical software for operating with a set of real and virtual objects using the rules of cartesian closed category / G.G. Kulikov, V.V. Antonov, M.A. Shilina et al. // Advances in Intelligent Systems Research: Proceedings of the VIth International Workshop 'Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security' (IWCI 2019). – China: Atlantis Press, 2019. – P. 173–178. DOI: 10.2991/iwci-19.2019.30
7. Черняховская, Л.Р. Интеллектуальная поддержка принятия решений в организационном управлении разработкой программных проектов / Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 5 (58). – С. 195–199.

8. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику / У.Р. Эшби. – М.: Иностранная литература, 1959.
9. Бауместер, Д. Физика квантовой информации / Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер. – М.: Постмаркет, 2002. – 376 с.
10. Ежемесячный сборник о состоянии преступности в России 2009–2019 гг. – <http://www.crimestat.ru/analytics>.
11. Доклад Секретариата Конференции участников Конвенции ООН против транснациональной организованной преступности. – [https://www.unodc.org/documents/treaties/untoc/cop/session\\_9/ctoc\\_cop\\_2018\\_1.6/v1806885\\_r.pdf](https://www.unodc.org/documents/treaties/untoc/cop/session_9/ctoc_cop_2018_1.6/v1806885_r.pdf).
12. Bitcoin Security – Ресурс о криптовалютах, блокчейне и децентрализованных технологиях. – <https://bits.media/pozitsiya-stran-mira-po-regulirovaniyu-kriptovalyut-na-fevral-2018-goda>.
13. Coin Dance – Bitcoin Community Resources. – <https://coin.dance/poli/legality>.
14. Financial Action Task Force on Money Laundering (FATF-GAFI). – <https://www.fatf-gafi.org/faq/moneylaundering/>.
15. Международная организация уголовной полиции Interpol. – <https://www.interpol.int/News-and-Events/Events/2018/87th-Interpol-General-Assembly>.
16. Международный альянс по борьбе с отмыванием денег и уклонением от налогов Joint Chiefs of Global Tax Enforcement (J5). – <https://www.irs.gov/compliance/joint-chiefs-of-global-tax-enforcement>.
17. Лидеры стран «Большой двадцатки», 13-й саммит. The 2018 G20 Buenos Aires summit was the thirteenth meeting of Group of Twenty. – <https://g20.argentina.gob.ar/en> (дата обращения: 24.09.2019).
18. Федеральное государственное унитарное предприятие «Информационное телеграфное агентство России (ИТАР-ТАСС)». – <https://tass.ru/ekonomika/6902921>.
19. Проект Федерального закона «О цифровых финансовых активах». – [https://www.minfin.ru/ru/document/%3Fid\\_4%3D121810](https://www.minfin.ru/ru/document/%3Fid_4%3D121810).
20. Криптовалюта.Tech . – <https://cryptocurrency.tech/v-assotsiatsiya-bankov-rossii-vystupili-zabyazatelnyu-identifikatsiyu-derzhatelej-kriptovalyut/>.
21. Федеральная служба по финансовому мониторингу. – <http://www.fedsfm.ru/releases/3940>.
22. Харисова, З.И. О некоторых проблемах обеспечения информационной безопасности государства и общества от современных киберугроз / З.И. Харисова // Актуальные проблемы права и государства в XXI веке. – 2019. – № 1. – С. 387–391.
23. Харисова, З.И. Международно-правовые основы информационной безопасности в целях устойчивого развития / З.И. Харисова // Правовое обеспечение развития социального государства в свете целей устойчивого развития: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х ч. / отв. ред. Р.В. Нигматуллин. – 2018. – С. 103–106.

**Антонов Вячеслав Викторович**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет; профессор кафедры управления в органах внутренних дел, Уфимский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Уфа; [Antonov.V@bashkortostan.ru](mailto:Antonov.V@bashkortostan.ru).

**Куликов Геннадий Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; [gennadyg\\_98@yahoo.com](mailto:gennadyg_98@yahoo.com).

**Харисова Зарина Ирековна**, канд. техн. наук, доцент кафедры управления в органах внутренних дел, Уфимский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, г. Уфа; [zarinaid@mail.ru](mailto:zarinaid@mail.ru).

**Родионова Людмила Евгеньевна**, старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; [lurik@mail.ru](mailto:lurik@mail.ru).

Поступила в редакцию 20 ноября 2019 г.

## THEORETICAL AND MULTIPLE APPROACH TO BUILDING A DUAL SAC SYSTEM MODEL FOR THE RESEARCH AREA WITH MIXED REAL AND VIRTUAL OBJECTS

V.V. Antonov<sup>1, 2</sup>, Antonov.V@bashkortostan.ru,

G.G. Kulikov<sup>1</sup>, gennadyg\_98@yahoo.com,

Z.I. Harisova<sup>2</sup>, zarinaid@mail.ru,

L.E. Rodionova<sup>1</sup>, lurik@mail.ru

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

<sup>2</sup> Ufa Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Ufa, Russian Federation

**Introduction.** At present, the class of equivalence in the financial markets of many countries is a virtual information object – crypto, the accounting of flows of which is maintained in a multi-user system of relations blockchain. The information technology of crypto transactions is based on elements of cryptography theory. Increasing or decreasing the capacity of accounting objects is usually realized by mining, forking and investing in a new digital currency. Today, the use of crypto is very attractive to a number of users due to its relative independence (complexity) from external and internal factors (in the form of influence on transactions of state bodies, banking structures, participants of the payment system itself), irreversibility of transactions in the financial market and relatively complete anonymity. These circumstances are an attractive field for applying various additional (from a closed set of operations on the Internet) operations. **Aim.** The construction of a dual system model of a software analytical complex for the studied field of activity with mixed real and virtual objects based on a set-theoretic approach. **Materials and methods.** Application of the rules of the international system engineering standard ISO / IEC / IEEE 15288, as well as the method of semantic differentials by C. Osgood for the processing and presentation of information. **Results.** There is an opportunity to apply a technology based on decentralization – the use of blockchain (creating a fully decentralized platform on which business processes are performed), which allows to improve work processes, as well as create a unified communication language. **Conclusion.** In this regard, interest arises in the use of big data analytics, categories of information objects – software modules, which ensure the implementation of connection of real and virtual objects with information processes taking into account their mutual relations in the software analytical complex.

*Keywords:* cryptocurrency, blockchain, system model, ISO 15288, subject area, Chomsky hierarchy.

### References

1. Antonov V.V. [Method of Design of Adaptive Software Complex on the Basis of Methodology of Categorical Formal Model of Open Subject Area]. *Bulletin of USATU*, 2015, vol. 19, no. 1, pp. 258–263. (in Russ.)
2. Antonov V.V., Kulikov G.G. [Formal Model of the Subject Area on the Basis of Fuzzy Relations]. *Software Products and Systems: International Journal*, 2011, no. 2 (94), pp. 48–51. (in Russ.)
3. Kulikov G.G., Antonov V.V., Fakhrullina A.R., Rodionova L.E. [Approach to Formation of Structure of a Self-Organizing Intellectual System in Shape Cartesian the Closed Category (on the Example of Design of the Information Analytical Program System)]. *Bulletin of PNRPU "Electrical Equipment, Information Technologies, Control Systems"*, 2018, no. 27, pp. 48–69. (in Russ.)
4. Khomsky N. [Language and Knowledge Problem]. *Bulletin of Moscow State University: Coll. of Sc. Works*, 1996, iss. 6, pp. 157–185. (in Russ.)
5. Kulikov G.G., Antonov V.V., Antonov D.V. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty postroyeniya modeley informatsionnykh sistem* [Theoretical and Applied Aspects of Building Models of Information Systems]. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, Germany, 2011, 134 p.
6. Kulikov G.G., Antonov V.V., Shilina M.A., Fakhrullina A.R., Rodionova L.E. Analytical Software for Operating with a Set of Real and Virtual Objects Using the Rules of Cartesian Closed Category. *Advances in Intelligent Systems Research: Proc. of the VIth International Workshop 'Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security' (IWCI 2019)*. China, Atlantis Press, 2019, pp. 173–178. DOI: 10.2991/iwci-19.2019.30

7. Chernyakhovskaya L.R., Malakhova A.I. [Intelligent Decision Support for Organizational Management of Software Project Development]. *Bulletin of USATU*, 2013, vol. 17, no. 5 (58), pp. 195–199. (in Russ.)
8. Ashby W.R. *Introduction to Cybernetics*, London, Chapman & Hall Ltd, 1957, 156 p.
9. Baumester D., Ekert A., Tsailinger A. *Fizika kvantovoj informatsii* [Physics of Quantum Information]. Moscow, Postmarket Publ., 2002, 376 p.
10. *Ezhemesyachnyy sbornik o sostoyanii prestupnosti v Rossii 2009–2019 gg.* [Monthly Collection on the State of Crime in Russia 2009–2019]. Available at: <http://www.crimestat.ru/analytics>.
11. *Doklad Sekretariata Konferencii uchastnikov Konvencii OON protiv transnacional'noj organizovannoy prestupnosti* [Report of the Secretariat of the Conference of the Parties to the United Nations Convention against Transnational Organized Crime]. Available at: [https://www.unodc.org/documents/treaties/untoc/cop/session\\_9/ctoc\\_cop\\_2018\\_1.6/v1806885\\_r.pdf](https://www.unodc.org/documents/treaties/untoc/cop/session_9/ctoc_cop_2018_1.6/v1806885_r.pdf).
12. *Bitcoin Security Resurs o kriptovalyutakh, blokcheyne i detsentralizovannykh tekhnologiyakh* [Bitcoin Security Resource about Cryptocurrencies, a Blockchain and the Decentralized Technologies]. Available at: <https://bits.media/pozitsiya-stran-mira-po-regulirovaniyu-kriptovalyut-na-fevral-2018-goda>.
13. Coin Dance – Bitcoin Community Resources. Available at: <https://coin.dance/poli/legality>.
14. Financial Action Task Force on Money Laundering (FATF-GAFI). Available at: <https://www.fatf-gafi.org/faq/moneylaundering/>.
15. *Mezhdunarodnaya organizacija ugolovnoj policii Interpol* [Interpol International Criminal Police Organization]. Available at: <https://www.interpol.int/News-and-Events/Events/2018/87th-Interpol-General-Assembly>
16. *Mezhdunarodnyj al'jans po bor'be s otmyvaniem deneg i ukloeniem ot nalogov* [Joint Chiefs of Global Tax Enforcement International Alliance Against Money Laundering and Tax Evasion (J5)]. Available at: <https://www.irs.gov/compliance/joint-chiefs-of-global-tax-enforcement>.
17. *Lidery stran "Bol'shoj dvadcatki", 13-j sammit* [G20 Leaders 13th Summit]. Available at: <https://g20.argentina.gob.ar/en> (accessed 24.09.2019).
18. *Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie "Informacionnoe telegrafnoe agentstvo Rossii (ITAR-TASS)"* [Federal State Unitary Enterprise "Information Telegraph Agency of Russia (ITAR-TASS)"]. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/6902921>.
19. *Proekt Federal'nogo zakona "O cifrovyyh finansovyh aktivah"* [Draft Federal Law "On Digital Financial Assets"]. Available at: [https://www.minfin.ru/ru/document/%3Fid\\_4%3D121810](https://www.minfin.ru/ru/document/%3Fid_4%3D121810).
20. *Kryptovalyuta.Tech* [Cryptocurrency.Tech]. Available at: <https://cryptocurrency.tech/v-assotsiatsiya-bankov-rossii-vystupili-za-obyazatelnyu-identifikatsiyu-derzhatelej-kriptovalyut/>.
21. *Federal'naja sluzhba po finansovomu monitoringu* [Federal Financial Monitoring Service]. Available at: <http://www.fedsfm.ru/releases/3940>.
22. Kharisova Z.I. [About Some Problems of Ensuring Information Security of the State and Society from Modern Cyber Threats]. *Topical Problems of Law and State in the XXI Century*, 2019, no. 1, pp. 387–391. (in Russ.)
23. Kharisova Z.I. [International Legal Basis of Information Security for Sustainable Development *Pravovoe obespechenie razvitiya sotsial'nogo gosudarstva v svete tseley ustoychivogo razvitiya. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Legal Support for the Development of a Social State in the Light of Sustainable Development Goals. The Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Ufa, 2018, pp. 103–106. (in Russ.)

Received 20 November 2019

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Теоретико-множественный подход к построению дуальной системной модели ПАК для исследуемой области деятельности со смешанными реальными и виртуальными объектами / В.В. Антонов, Г.Г. Куликов, З.И. Харисова, Л.Е. Родионова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr200101

#### FOR CITATION

Antonov V.V., Kulikov G.G., Harisova Z.I., Rodionova L.E. Theoretical and Multiple Approach to Building a Dual SAC System Model for the Research Area with Mixed Real and Virtual Objects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 5–15. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200101

## APPLICATION OF BI-PRINCIPLES IN THE GATE PROJECT MANAGEMENT SYSTEM TO CREATE A DIGITAL TWIN OF THE GTE

**O.V. Loginovskiy**<sup>1</sup>, *loginovskiiov@susu.ru*,  
**K.A. Rizvanov**<sup>2</sup>, *rizvanovk@bk.ru*,  
**G.G. Kulikov**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

<sup>3</sup> JSC "Ufa Scientific and Production Enterprise "Lightning", Ufa, Russian Federation

**Introduction.** Currently, the Industry 4.0 concept integrates modern methodologies and practices for strategic and operational management of industrial enterprises and economies into the digital economy. It involves a wide and deep digitalization of physical and virtual objects, their connections, processes with the further possibility of their analytical analysis.

**Goal of the study.** Analysis of the requirements for the degree of formalization of the description of the digital twin of the production system using graphoanalytic metalanguages classified according to the Chomsky hierarchy. Materials and methods. It is proposed to use a set-theoretic and categorical approach to the classification, identification, traceability and structuring of objects of production systems and their business processes in accordance with the requirements of quality standards.

**Results.** The article substantiates the relevance of using intelligent business intelligence (BI) systems in the heterogeneous information space of a production system for analytical processing of semantic (content), logical and quantitative information.

**Conclusion.** Modern organizations are complex systems, information management of which is provided by a wide range of software, a large number of data sources makes it difficult to consolidate data and receive aggregated reports. The use of intelligent business intelligence systems will allow targeted data extraction and analytical analysis. Models of business processes are isomorphically displayed in aggregate data accumulated in information systems. That is, these models are used to structure aggregate data in the required context.

*Keywords:* system model, production content, formal metalanguages, subject area, analytical data processing, information retrieval system, multidimensional data classifier, business process model.

### Introduction

Currently, the concept "Industry 4.0" integrates modern methodologies and practices of strategic and operational management of industrial enterprises and economies into the Digital Economy [1–4]. It assumes complete digitalization of all physical and virtual objects, their connections, processes with the further possibility of analytical analysis.

It should be noted that during their evolutionary development, information systems have accumulated and continue to accumulate significant amounts of information that can be used for planning, forecasting and decision making in various IPOs, including production systems. Further, based on the available information, a corporate knowledge base or decision support system can be built.

On the other hand, today Automated information systems of organizations use a lot of loosely coupled software packages. For example, the modern motor-building production association (UMPO) operates more than 100 different software and hardware applications supporting the corresponding activities (IPO). Most of these systems offer the possibility of local search and analysis in domain-specific languages, however, for decision-making, as a rule, simultaneous use of data from several systems is necessary, which is a difficult task, for example, because of incompatibility of systems or the use of different dictionaries data [5–8].

Fig. 1 shows the gate system of the GTE digital double, based on the CALS methodology.



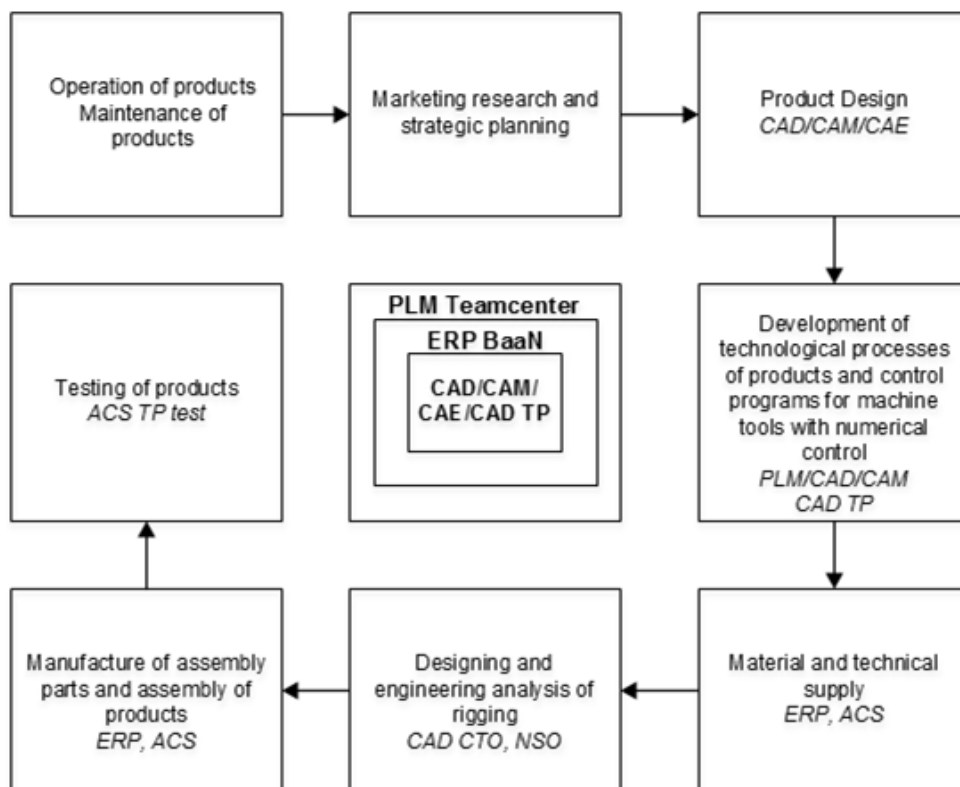


Fig. 1. Scheme of gate system of the GTE digital double

Support for the life cycle of the production of products in the machine-building enterprise is now supported by CAE-systems; CAD-systems for automation of designing and manufacturing of working design documentation; CAM-systems for automation of technological preparation of production; PDM-systems, ERP-systems for managing product data and its configurations; for the automation of production planning and management of the processes of manufacturing products, stocks, production resources, transport, etc. [5].

### 1. Overview of Information Systems

To identify and describe the goals and objectives of analytical data from multiple systems, you can use domain-specific natural language with a certain degree of formalization of syntax, for example up to a dictionary and natural rules for constructing sentences (media appropriate syllogisms) and semantics, as detailed and formalized further description of the business processes in the graph-analytical metalanguage (at a high-level programming language [5, 9, 10]). This system should be external to the object-oriented systems and subsystems consist of search and business intelligence subsystem. Today, the market presents the analytical search engines such as Google Search Appliance, Yandex.Server, IBM Content Analyst and Enterprise Search, Mondrian and others. These systems have come a long way of development from simple information retrieval systems to Business Intelligence systems with built-in mechanisms of adaptation under the IPO.

Fig. 2 shows the mimic of the system life cycle using Business Intelligence.

Consider classification, identification, traceability, structuring and analytical processing of large volumes of unstructured, structured and semi-structured distributed using the Business Intelligence methodology as an example.

Tasks solved by Business Intelligence in the enterprise [5].

- Measurement – BI creates and maintains a hierarchy of performance indicators (KPI), compares with the target value, informs stakeholders about progress in achieving business goals.

- Analytics – quantify the effectiveness of business process execution to improve efficiency and detect implicit knowledge. Often includes: data analysis, process development, statistical analysis, predictive modeling, business process modeling and other tools.

## Информатика и вычислительная техника

- Formation of corporate reporting – creates an infrastructure for the formation of reporting used in strategic management. Includes OLAP analysis, data visualization, decision support systems.
- Creation of a collaboration platform – creates a platform for collaboration both inside and outside the organization, provides storage and access to data.
- Knowledge management – the formation of a decision support system based on existing experience, support for management decisions.

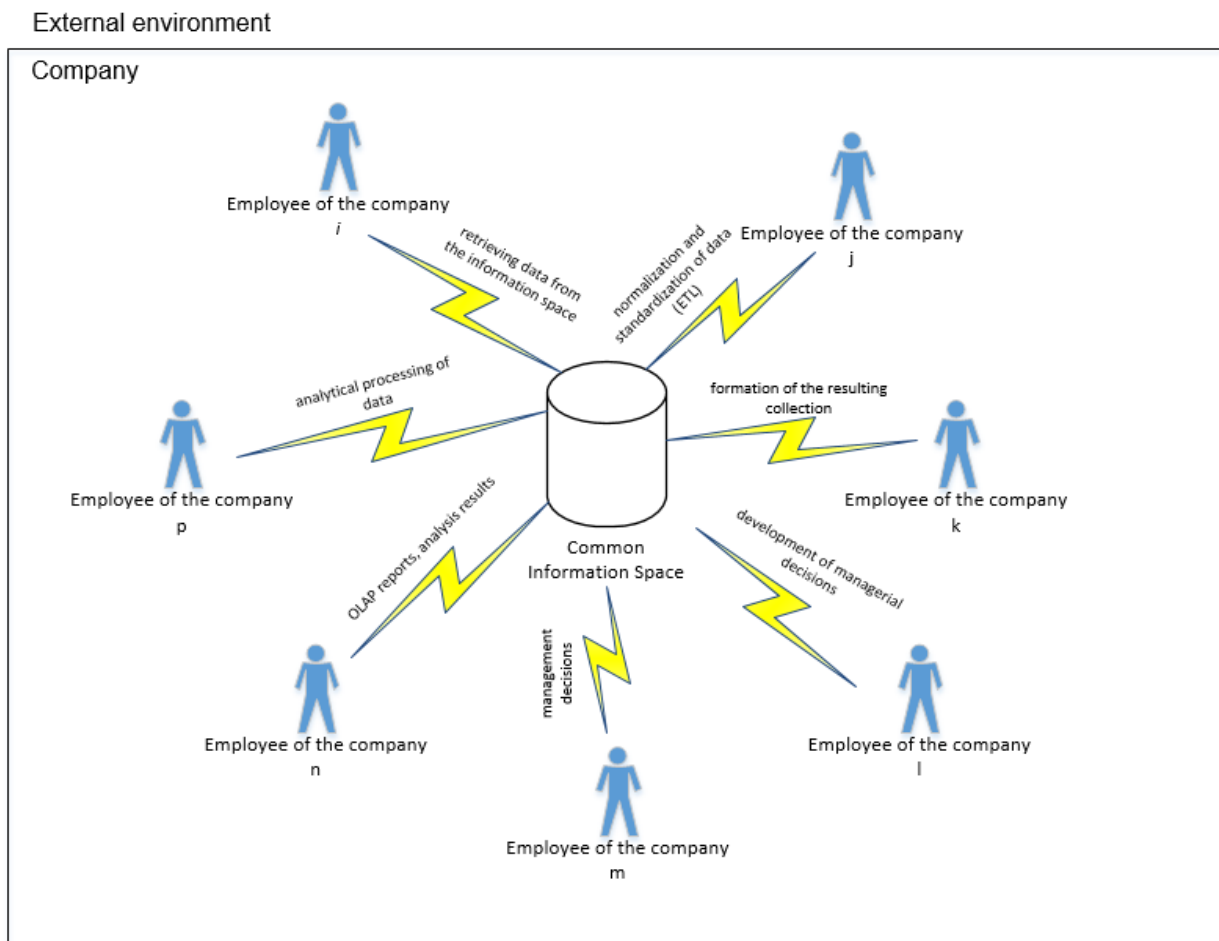


Fig. 2. Mimic of the life cycle of a system using Business Intelligence

It can be noted that the business analyst community has not yet reached a consensus on the definition of Business Intelligence. Some analysts compare it with business analysis, others with competitive intelligence systems. However, certain steps have already been taken towards standardization. So Thomas Davenport in his work “Analytics at Work” [11], defined the main stages of data preparation for analysis when using Business Intelligence systems: Data extraction; Forming reports and analytical processing in real time (OLAP); Use of tools for notification of deviations from expected values of indicators; Development of management decisions based on business analysis.

A distinctive feature of Business Intelligence systems is the ability to work with different data sources at the same time at the same time. In this regard, it is important to structure the content of sources with the potential for further processing.

The data structure of a specific information system corresponds to the model of the business process being performed. In this regard, we will use business process models to formulate criteria for structuring content and retrieving data [9, 12].

In order to formulate rules for structuring content, it is necessary to single out business rules from business process models, describe them in attributive form, and present them in terms of conditions. Then, based on the rules of interaction with data warehouses, you can perform data selection.

A representation in the form of an attributive process model is necessary to enable automated processing of data based on the business process being carried out with the goal of making the model available to other systems. After the formation of the attributive model of the process, on its basis it is possible to fulfill requests to the information space in the same language in which the model is formed. If the model is built in Russian, then the requests are formed in a language similar to Russian. For example, the task is to select documents for the period from January 1 to February 10. Naturally, such a query in the DBMS can not be sent directly. Therefore, it is necessary to convert this request based on the rules of interaction with the DBMS or any data warehouses. And, in fact, after that data can already be obtained and analyzed.

In view of the distribution and heterogeneity of the organization's information space for operational access to data, it is necessary to form the classifier of information resources, believing that the task of classifying, identifying and tracing the corresponding primary resources was solved earlier. The classifier is formed on the basis of the linguistic analysis of the glossary of the system model of the business process, for example, on the formal graphical analytical metalography IDEF – using the apparatus of linguistic processing from the glossary, the terms are chosen to classify the content of a limited area of the information space.

Fig. 3 shows the scheme of the algorithm for extracting data from the information space for intellectual analysis.

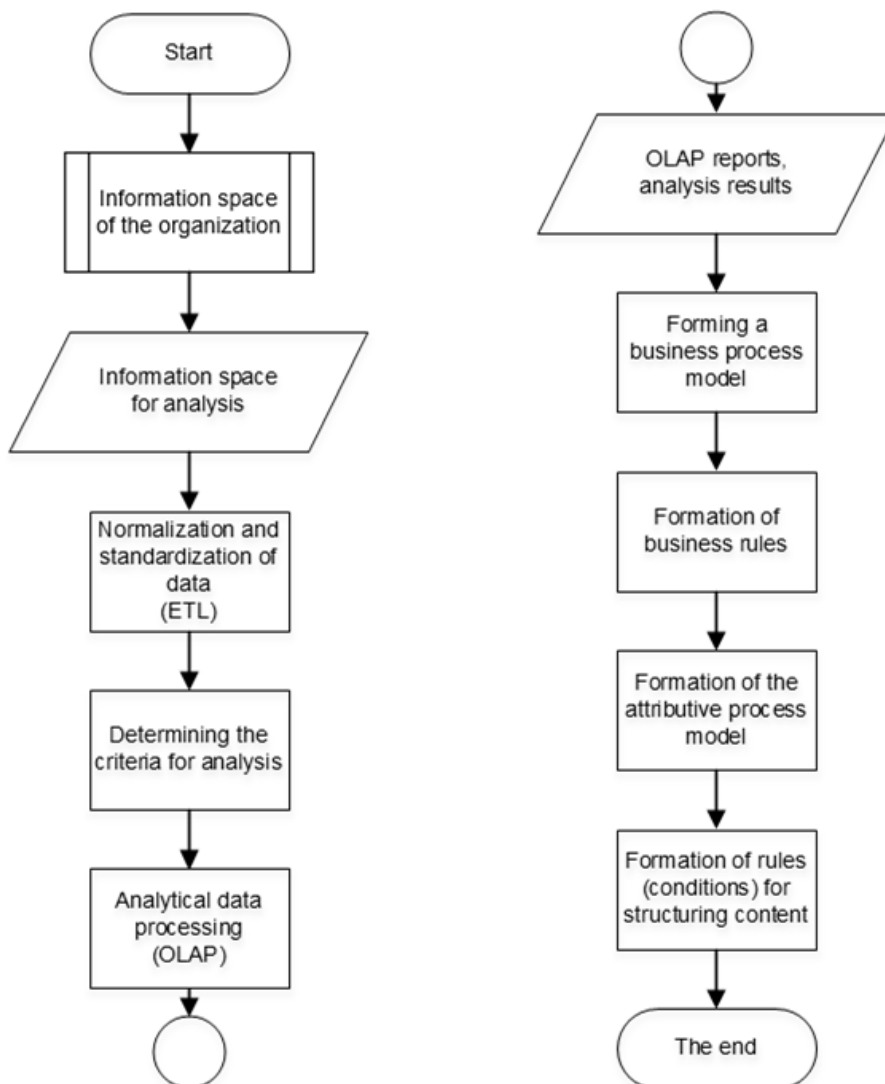


Fig. 3. Scheme of the algorithm for extracting data from the information space for intellectual analysis

Classification can be performed using information retrieval systems. In this case, the search index will play the role of the classifier.

When referring to the query to the classifier, it is possible to extract pointers to information resources from different systems uniformly. Representation of IPO processes and data in the language of mathematical category theory [13–16].

Fig. 4 shows the relationship between the organization's business processes and the content of the information space.

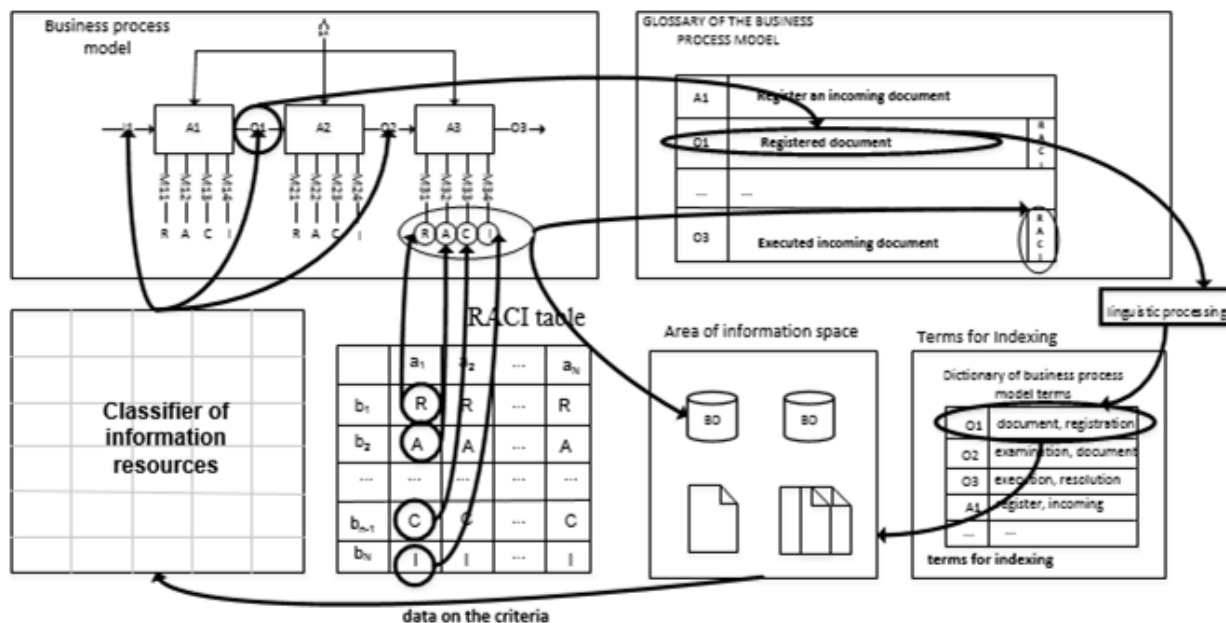


Fig. 4. The relationship between the organization's business processes and the content of the information space

Let's describe the relationship between the business process model and the content of the information space using the apparatus of the mathematical theory of categories.

The category is: a class of  $Obj_C$  objects, for each pair of objects  $A, B$  there is a set of morphisms  $Hom_C(A, B)$ , and to each morphism there correspond unique  $A$  and  $B$ , for each pair of morphisms  $f \in Hom_C(A, B)$  and  $g \in Hom_C(B, C)$  the composition  $f \circ g \in Hom_C(A, C)$  is defined, for each object  $A$  the identity morphism  $id_A \in Hom_C(A, A)$  is given, and two axioms are fulfilled: the composition operation is associative:  $f \circ (g \circ h) = (f \circ g) \circ h$ , the identity morphism acts trivially:  $f \circ id_A = id_B \circ f = f$  for  $f \in Hom_C(A, B)$ .

Establishment of relations between data is possible due to the fact that the system model satisfies the requirements of the mathematical theory of categories, i.e. there is a class of objects, a class of morphisms, the composition operation is associative, the identity morphism acts trivially. We illustrated this in system models [17, 18].

Let's illustrate the above provisions on the example of processing incoming and outgoing documents. We see that the categories of processing of incoming and outgoing documents can be combined into a category of a higher level – processing of correspondence.

Fig. 5 shows the processes and data in the form of a category, where on the functional model:

- class of objects –  $Obj_C$  – inputs / outputs of the business process ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ );
- class of morphisms –  $Hom_C(A_i, A_j)$  – functions of the business process;
- the composition operation is associative due to decomposition.

On the information model:

- class of objects –  $Obj_C$  – the essence of the information model;
- class of morphisms –  $Hom_C(A_i, A_j)$  – relations between entities;
- the composition operation is associative due to categorization.

On a dynamic model:

- class of objects –  $ObjC$  – tasks of the dynamic model;
- class of morphisms –  $Hom_C(A_i, A_j)$  – transitions between tasks;
- the composition operation is associative due to partitioning into subsystems.

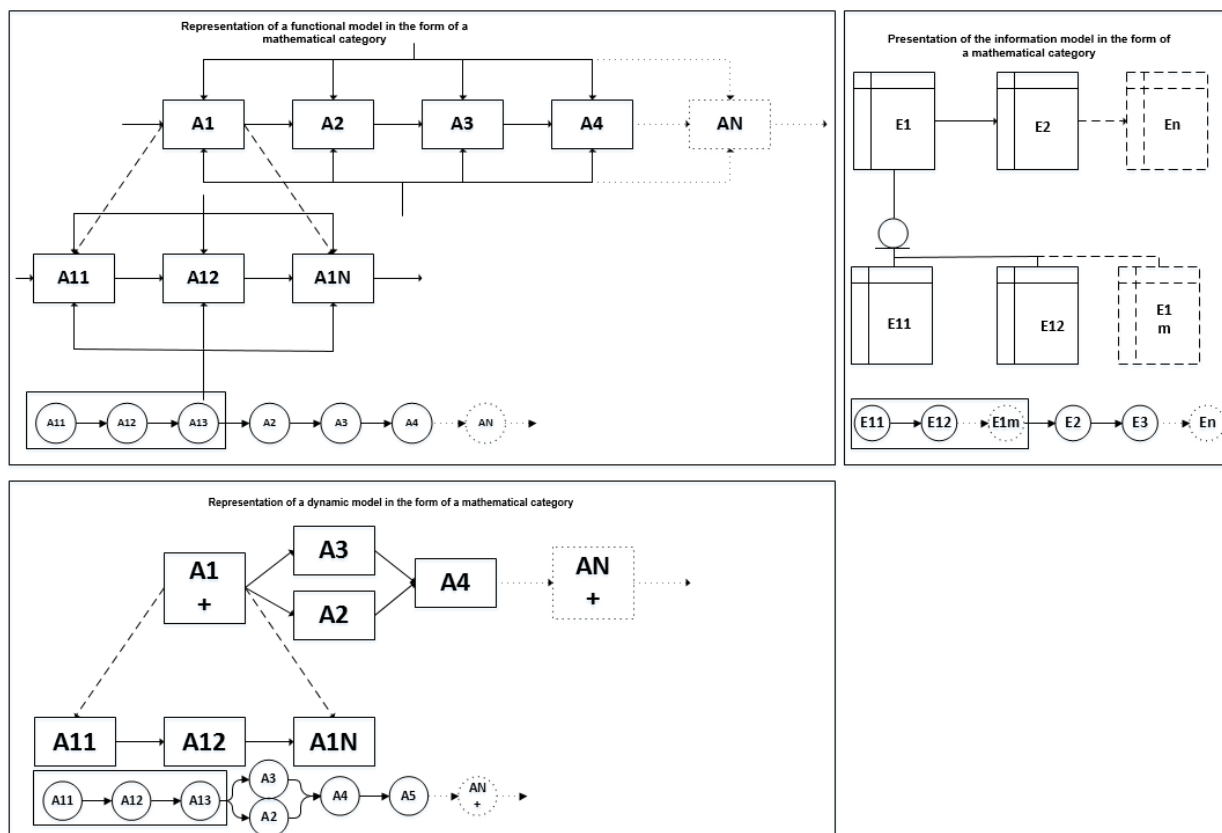


Fig. 5. Representing processes and data in the form of categories

We also illustrate the natural transformation when processing documents in the organization and transferring them to operational and archival storage.

## 2. BI-system architecture

Structuring the content of the information space and selecting the necessary data are one of the main stages of the work of the Business Intelligence system. Let's consider in addition, from what components the typical systems consist.

At the highest level is the layer of interaction with the user, i.e. it interacts with some BI application, for example, a web portal. This portal can provide the user with such opportunities as: performing business analysis, performing budgeting operations, compiling reports. This portal can receive data based on OLAP queries, corporate reporting, and any other data sources. Data can be stored in relational databases, on servers that contain integrated data for OLAP reports, in archives. Well, at the heart of this architecture is a layer that deals with administration, management, security.

Consider an example based on the IBM Cognos BI system. IBM Cognos Business Intelligence is a comprehensive solution for building an organization-wide information and analysis system.

One of the main purposes of IBM Cognos BI is data integration. The product provides the ability to continuously create reports, analyze, scoring, create dashboards and manage events, simplifying the configuration of IT and providing access to information for each employee. The result is a higher adaptation of users, better solutions and a higher dynamics of enterprise management.

IBM Cognos solutions are based on the concept of business performance management (BPM), covering the main processes of the company's management: forecasting, planning, budgeting, data consolidation, control, business analysis, financial, management and other reporting [[http://www.tadviser.ru/index.php/Product: IBM\\_Cognos](http://www.tadviser.ru/index.php/Product: IBM_Cognos)].

The architecture of the IBM Cognos BI system is relatively simple (as for an enterprise-class system). A key element of the system is the IBM Cognos BI server, which works with data sources using a user-defined description (called metadata). Further, through Web access, the IBM Cognos BI server provides access to all the main functions of the system.

### 3. Conclusions and recommendations

Modern organizations are complex systems, information management of which is provided by a wide range of software.

A large number of data sources make it difficult to consolidate data and obtain aggregated reports.

The use of Business Intelligence systems will allow centralizing access to analytical data.

Business process models are isomorphically mapped into the data accumulated during the operation of the information system, therefore, models can also be used to structure the data in the required context.

### References

1. *Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 28.07.2017 N 1632-r "Ob utverzhdenii programmy "Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii"* [The Order of the Government of the Russian Federation of 28.07.2017 N 1632-r "About the Approval of the "Digital Economy of the Russian Federation" Program].
2. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Korennaya K.A., Gel'rud Ya.D., Shestakov A.L. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy. Monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems: Monograph]. Moscow, Infra-M Publ., 2018, 410 p.
3. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravlenie promyshlennymi predpriyatiyami v usloviyakh global'noy nestabil'nosti: monografiya* [Management of Industrial Enterprises in Conditions of Global Instability. Monograph]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013, 403 p.
4. Loginovskiy O.V., Lyubitsyn V.N., Nesterov M.I. *Upravlenie sovremennym vuzom na baze razvitoi informatsionnoy sistemy: monografiya* [Management of Modern Higher Education Institutions on the Basis of a Developed Information System. Monograph]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013, 539 p.
5. Kulikov G.G., Barmin A.A. [Business Intelligence – Methodological and Information and Technological aspect]. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy – 2016: trudy Pyatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Bannoye, Rossiya, 24–28 fevralya 2016 g.* [Information Technologies and Systems – 2016. Works of the Fifth International Scientific Conference, Bannoe, 2016]. Chelyabinsk, Chelyabinsk St. Univ. Publ., 2016, pp. 243–248. (in Russ.)
6. Rechkalov A.V., Kulikov G.G., Antonov V.V., Artyukhov A.V. [Development of a Formal Model of the Production Process Using a Corporate Information System]. *Scientific Review*, 2015, no. 12, pp. 187–196. (in Russ.)
7. Rechkalov A.V., Artyukhov A.V., Rizvanov K.A. [Concept of Structural and Information Organization of Situation Center for Operational Management of Machine-building Division with Territorial Production]. *Bulletin of UMO. Economics, Statistics and Computer Science*, 2014, no. 3, pp. 192–195. (in Russ.)
8. *Rekomendatsii R 50-601-36-93. Sistema kachestva. Identifikatsiya i proslezhivayemost' produktsii na predpriyatii (ISO serii 9000)* [Recommendations P 50-601-36-93. Quality System. Identification and Traceability of Products in the Enterprise (ISO 9000 Series)]. Moscow, All-Russian Certification Research Institute (VNIIS) of Gosstandart of Russia, 1995.
9. Subaev M.I., Kulikov G.G., Rizvanov K.A. [Peculiarities of Development of System Model of Business Processes for Implementation in CRM System in Internet Environment]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2018, no. 4, pp. 29–33. (in Russ.)
10. Kulikov G.G., Shilina M.A., Shamidanov D.G. [Formalization of Causal Relations in the System Model of Knowledge on the Example of Hierarchies Chomsky]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy*

*nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta: "Upravleniye ekonomikoy: metody, modeli, tekhnologii"* [Works of XVII International Scientific Conference Dedicated to the 85th Anniversary of the Ufa State Aviation Technical University "Economic Management: Methods, Models, Technologies"]. Ufa, 2017, pp. 292–294. (in Russ.)

11. Tom Davenport. Analytics at Work: Q&A with Tom Davenport. Available at: <http://www.informationweek.com/software/information-management/analytics-at-work-qanda-with-tom-davenport/d/d-id/1085869>.

12. Kulikov G.G., Shilina M.A., Startsev G.V., Barmin A.A. [Structuring the Content of the Information Space of the Technical University Using the Process Approach and Semantic Identification]. *Bulletin of USATU*, 2014, no. 4 (65), pp. 115–124. (in Russ.)

13. Kulikov G.G., Zlobina T.P., Babak S.F., Shamidanov D.G. [System Approach to Design of Complex Intellectual Systems on the Basis of Categories of Dialectics and Formal Mathematical Set-theoretic Methods]. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy – 2017: trudy Shestoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Bannoye, Rossiya, 1–5 marta 2017 g.* [Information Technologies and Systems – 2017. Works of the Sixth International Scientific Conference, Bannoe, 2017]. Chelyabinsk, Chelyabinsk St. Univ. Publ., 2017, pp. 149–154. (in Russ.)

14. Rizvanov D.A., Yusupova N.I., Kuramshin D.V., Rizvanov K.A. [Algorithm and Software for Intelligent Decision Support for Resource Management of Complex Systems]. *Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016). Proceedings of the 4th International Conference*. Ufa, 2016, pp. 94–99. (in Russ.)

15. Kulikov G.G., Rizvanov K.A. [Organization of the Planning System of the Machine-Building Corporation Based on the System Model of Virtual Production]. *Scientific Horizons – 2015. Materials of the XI International Scientific and Practical Conference*, 2015, pp. 69–74. (in Russ.)

16. Kulikov G.G., Petrov Yu.E., Rizvanov K.A. [System Model of Formation of Special Competences in a Single Information Space of Higher Educational Institution]. *Sbornik statey XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike"* [Proc. of the XVII International Scientific and Technical Conference "Problems of Informatics in Education, Management, Economy and Technology"]. Penza, 2017, pp. 228–233. (in Russ.)

17. Guzairov M.B., Kulikov G.G., Rizvanov K.A. The Structural Model Information System for the Production Planning. *CSIT'2014*, vol. 1. Sheffield, England, 2014, pp. 10–16.

18. Kulikov G.G., Petrov Yu.E., Ageev G.K., Rizvanov K.A. [Approach to Formation of Integrated Model of Special Competences (Technical Knowledge, Abilities, Skills) in Uniform Real Information Space in Real Time]. *Sbornik materialov I Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy polucheniya, obrabotki i peredachi izmeritel'noy informatsii"* [Collection of Materials of the I International Scientific and Technical Conference "Problems of Receiving, Processing and Transfer of Measuring Information"]. Ufa, 2017, pp. 165–167. (in Russ.)

*Received 12 November 2019*

**ПРИМЕНЕНИЕ VI-ПРИНЦИПОВ В ГЕЙТОВОЙ СИСТЕМЕ  
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ СОЗДАНИЯ  
ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ГТД****О.В. Логиновский<sup>1</sup>, К.А. Ризванов<sup>2</sup>, Г.Г. Куликов<sup>3</sup>**<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,<sup>2</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,<sup>3</sup> АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Россия

**Введение.** В настоящее время концепция «Индустрия 4.0» интегрирует современные методологии и практики стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями и экономиками в цифровую экономику. Она предполагает широкую и глубокую цифровизацию физических и виртуальных объектов, их связей, процессов с дальнейшей возможностью их аналитического анализа.

**Цель исследования.** Анализ требований к степени формализации описания цифрового двойника производственной системы при использовании графоаналитических метаязыков, классифицированных по иерархии Хомского.

**Материалы и методы.** Предлагается использовать теоретико-множественный и категориальный подход к классификации, идентификации, прослеживаемости и структурированию объектов производственных систем и их бизнес-процессов в соответствии с требованиями стандартов качества.

**Результаты.** В статье обоснована актуальность использования интеллектуальных систем бизнес-аналитики (BI) в неоднородном информационном пространстве производственной системы для аналитической обработки семантической (контента), логической и количественной информации.

**Заключение.** Современные организации представляют собой сложные системы, информационное управление которыми обеспечивается широким спектром программного обеспечения, большое число источников данных затрудняет консолидацию данных и получение агрегированных отчетов. Использование интеллектуальных систем бизнес-аналитики позволит целенаправленно извлекать данные и проводить их аналитический анализ. Модели бизнес-процессов изоморфно отображаются в агрегатные данные, накапливаемые в информационные системы. То есть эти модели используются для структурирования агрегатных данных в требуемом контексте.

*Ключевые слова:* системная модель, цифровой двойник, производственный контент, формальные метаязыки, предметная область, интеллектуальная аналитическая обработка данных, информационно-поисковая система, многомерный классификатор данных, модель бизнес-процессов.

**Литература**

1. Распоряжение Правительства РФ от 28.07.2017 N 1632-р «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

2. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. заслуж. деятеля науки РФ О.В. Логиновского, д-ра техн. наук А.А. Максимова. – М.: Инфра-М, 2018. – 410 с.

3. Коренная, К.А. Управление промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности: моногр. / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Л. Шестакова – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – 403 с.

4. Логиновский, О.В. Управление современным вузом на базе развитой информационной системы: моногр. / О.В. Логиновский, В.Н. Любицын, М.И. Нестеров; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Л. Шестакова – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – 539 с.

5. Куликов, Г.Г. Business intelligence – методологический и информационно-технологический аспект / Г.Г. Куликов, А.А. Бармин // Информационные технологии и системы – 2016: тр. Пятой



Международ. науч. конф., Банное, Россия, 24–28 февраля 2016 г. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. – С. 243–248.

6. Разработка формальной модели производственного процесса с применением корпоративной информационной системы. / А.В. Речкалов, Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, А.В. Артюхов // Научное обозрение. – 2015. – № 12. – С. 187–196.

7. Речкалов, А.В. Концепция структурно-информационной организации ситуационного центра для оперативного управления машиностроительным дивизионом с территориально-распределенным производством / А.В. Речкалов, А.В. Артюхов, К.А. Ризванов // Вестник УМО. Экономика, статистика и информатика. – 2014. – № 3. – С. 192–195.

8. Рекомендации Р 50-601-36-93. Система качества. Идентификация и прослеживаемость продукции на предприятии (ИСО серии 9000). – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации (ВНИИС) Госстандарта России, 1995.

9. Субаев, М.И. Особенности разработки системной модели бизнес-процессов для реализации в CRM системе в Internet среде / М.И. Субаев, Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 4. – С. 29–33.

10. Куликов, Г.Г. Формализация причинно-следственных связей в системной модели знаний на примере иерархий Хомского / Г.Г. Куликов, М.А. Шилина, Д.Г. Шамиданов // Сборник материалов XVII Международной научной конференции, посвященной 85-летию Уфимского государственного авиационного технического университета «Управление экономикой: методы, модели, технологии». – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2017. – С. 292–294.

11. Tom Davenport. Analytics at Work: Q&A with Tom Davenport. – режим доступа: <http://www.informationweek.com/software/information-management/analytics-at-work-qanda-with-tom-davenport/d/d-id/1085869>.

12. Структурирование контента информационного пространства технического университета с использованием процессного подхода и семантической идентификации / Г.Г. Куликов, М.А. Шилина, Г.В. Старцев, А.А. Бармин // Вестник УГАТУ. – 2014. – № 4 (65). – С. 115–124.

13. Системный подход к проектированию сложных интеллектуальных систем на основе категорий диалектики и формальных математических теоретико-множественных методов / Г.Г. Куликов, Т.П. Злобина, С.Ф. Бабак, Д.Г. Шамиданов // Информационные технологии и системы – 2017: тр. Шестой Междунар. науч. конф., Банное, Россия, 1–5 марта 2017 г. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2017. – С. 149–154.

14. Алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении ресурсами сложных систем / Д.А. Ризванов, Н.И. Юсупова, Д.В. Курамшин, К.А. Ризванов // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016). Proceedings of the 4th International Conference. – 2016. – С. 94–99.

15. Куликов, Г.Г. Организация системы планирования машиностроительной корпорации на основе системной модели виртуального производства / Г.Г. Куликов, К.А. Ризванов // Scientific horizons – 2015. Materials of the XI International scientific and practical conference. – 2015. – С. 69–74.

16. Куликов, Г.Г. Системная модель формирования специальных компетенций в едином информационном пространстве высшего учебного заведения / Г.Г. Куликов, Ю.Е. Петров, К.А. Ризванов // Сборник статей XVII Международной научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике»; под ред. В.И. Горбаченко, В.В. Дрожжина. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2017. – С. 228–233.

17. Guzairov, M.B., Kulikov G.G., Rizvanov K.A. The structural model information system for the production planning // CSIT 2014. – Sheffield, England, 2014. – Vol. 1. – P. 10–16.

18. Подход к формированию интегральной модели специальных компетенций (технических знаний, умений, навыков) в едином реально-информационном пространстве в реальном времени / Г.Г. Куликов, Ю.Е. Петров, Г.К. Агеев, К.А. Ризванов // Сборник материалов I Международной научно-технической конференции «Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации». – Уфа: РИК УГАТУ, 2017. – С. 165–167.

## Информатика и вычислительная техника

---

**Логиновский Олег Витальевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; loginovskiyo@mail.ru.

**Ризванов Константин Анварович**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; rizvanovk@bk.ru.

**Куликов Григорий Геннадьевич**, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа.

*Поступила в редакцию 12 ноября 2019 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Loginovskiy, O.V. Application of BI-Principles in the Gate Project Management System to Create a Digital Twin of the GTE / O.V. Loginovskiy, K.A. Rizvanov, G.G. Kulikov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102

### FOR CITATION

Loginovskiy O.V., Rizvanov K.A., Kulikov G.G. Application of BI-Principles in the Gate Project Management System to Create a Digital Twin of the GTE. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102

---

# Управление в технических системах

УДК 621.31 + 004.02

DOI: 10.14529/ctcr200103

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПАКЕТАХ MATLAB

*Н.В. Бильфельд, Ю.И. Володина*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Березниковский филиал, г. Березники, Россия*

**Введение.** Пакеты *Simulink* и *SimPowerSystem* большинством исследователей используются отдельно из-за проблем с взаимной передачей данных между функциональными блоками. В частности, вопросы, касающиеся имитационного моделирования и построения динамических моделей различных систем, решаются с помощью пакета *Simulink*, а моделирование электроэнергетических, электросиловых систем и систем электропривода – с помощью *SimPowerSystem*. **Цель работы:** разработать способы их совместного применения как в учебном процессе, так и на производстве для проектирования узлов и исследования поведения отдельных участков электрических цепей с целью их дальнейшего усовершенствования, выявления причин наиболее часто встречающихся неисправностей, определения возможности замены одних узлов на другие и т. д. **Материалы и методы.** На практике исследования электрических и электронных схем проводятся аналитическими расчетами, на которые затрачивается значительно больше времени, чем на имитационное моделирование. Показана невозможность непосредственной коммутации сигналов пакетов *Simulink* и *SimPowerSystem* в среде MATLAB. На конкретных примерах показано, как можно совместно использовать данные пакеты, выходные сигналы, полученные в одном пакете, использовать в качестве входных сигналов в другом пакете и наоборот. Процесс объединения двух схем, смоделированных в различных пакетах, поэтапно описан на следующих примерах: передача значений из *Simulink*-модели в MATLAB, передача значений из MATLAB в *Simulink*-модель, передача значений из *Simulink* в *SimPowerSystem*. **Результаты.** Примеры даны в доступной, понятной форме, с соответствующими схемами, графиками, алгоритмом действий, кодом, ожидаемыми результатами, чтобы читатель мог понять их принцип и при необходимости повторить. Описаны возможные проблемы при выполнении примеров и их возможные решения. **Заключение.** Совместное использование блоков *Simulink* и *SimPowerSystem* позволяет моделировать и очень сложные динамические системы, повышая при этом их функциональность и наглядность, особенно при моделировании электротехнических систем.

*Ключевые слова:* моделирование, MATLAB, Simulink, SimPowerSystem, система управления, электрическая схема.

### Введение

Пакет *Simulink* – это графическая среда имитационного моделирования, встроенная в MATLAB. Данная среда позволяет строить динамические модели различных систем. Наиболее часто *Simulink* используется для моделирования систем управления [1].

Пакет *SimPowerSystem* – это инструмент, специально разработанный для моделирования электроэнергетических, электросиловых систем и систем электропривода.

Сегодня указанные пакеты используются все чаще не только в учебном процессе, но и на производстве как для проектирования дополнительных узлов, так и для исследования поведения отдельных участков электрических цепей, с целью их дальнейшего усовершенствования, выявления причин наиболее часто встречающихся неисправностей, определения возможности замены одних узлов на другие и т. д. [2]. Моделирование в данных пакетах также дает ответы на вопросы, связанные с устойчивостью и запасом устойчивости исследуемых систем, а также их надежности.

Для электрических и электронных схем исследования, как правило, связаны с получением значений текущих токов в тех или иных участках цепи при коммутации или замене вышедших из строя деталей на существующие аналоги, выяснением вопросов о причинах самовозбуждения и многих других [3].

Два альтернативных варианта получения ответов на перечисленные вопросы – это аналитические расчеты и моделирование на реальных элементах [4].

В первом случае на порядки увеличивается время расчетов по сравнению с имитационным моделированием. Для второго случая нужна еще и материальная база, а экспериментировать на работающем оборудовании недопустимо, так как это может привести к аварийным ситуациям и травмам.

В литературе, как правило, пакеты *Simulink* и *SimPowerSystem* рассматриваются отдельно. В частности, в [5, 6] рассматриваются вопросы, связанные с работой непосредственно в MATLAB, в [7] и [8] подробно рассматривается моделирование в *Simulink*, в области радиотехники и автоматизации. В [9] подробно описаны вопросы моделирования в *SimPowerSystem*.

Цель данной статьи – показать на простейших примерах, как можно совместно использовать пакеты *Simulink*, *SimPowerSystem* и MATLAB. Под совместным использованием в первую очередь имеется в виду, как выходные сигналы, полученные в одном пакете, использовать в качестве входных сигналов в другом пакете, и наоборот.

Допустим, нам необходимо на выходе регулятора в одноконтурной схеме управления использовать корректирующую RLC-цепь, как показано на рис. 1. Но соединить непосредственно элементы модели не представляется возможным (места схемы, обведенные кружками). Среда MATLAB не допускает непосредственную коммутацию сигналов пакетов *Simulink* и *SimPowerSystem*.

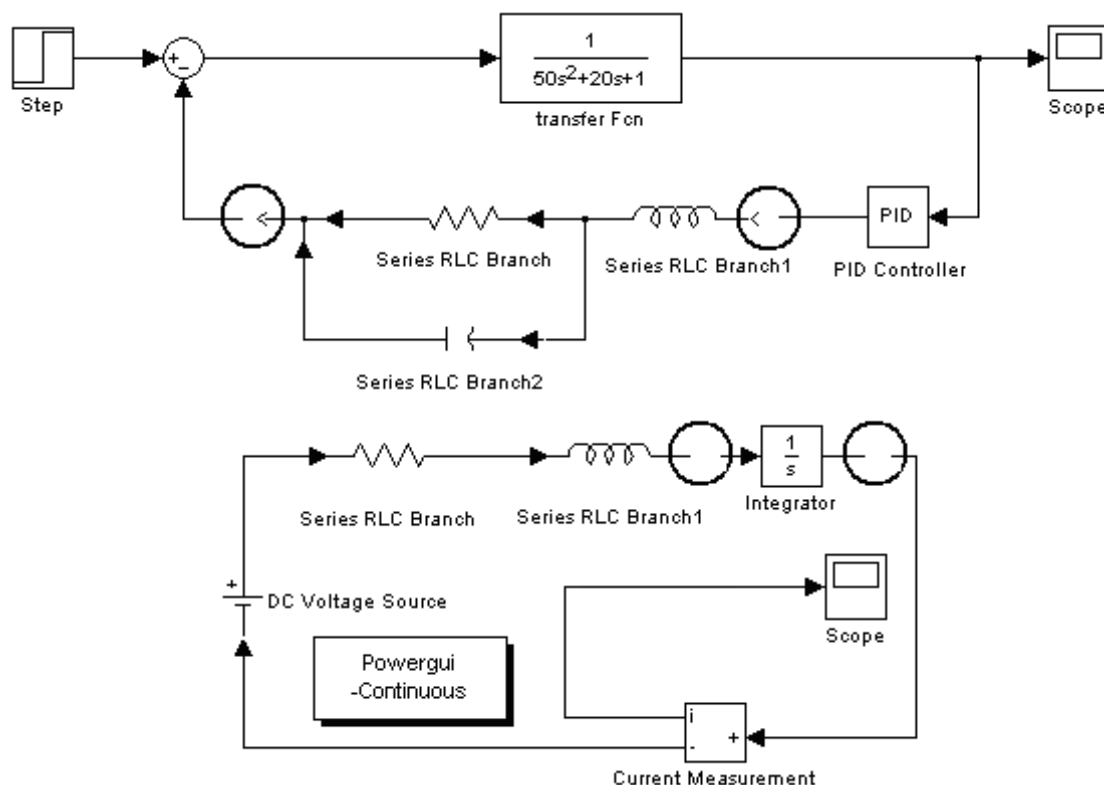


Рис. 1. Использование RLC-цепи на выходе регулятора и интегратора в модели электрической схемы

Fig. 1. Use of RLC circuit at regulator and integrator output in electrical circuit model

Аналогично не удастся использовать непосредственно в электрической схеме блок интегратора пакета *Simulink*, как показано на рис. 1.

Допустим, мы исследуем работу релейной схемы сигнализации при нарушении нескольких технологических параметров [10]. Так как обмотки реле обладают индуктивностью, то, если не-

сколько параметров одновременно придет в «норму», в цепи могут возникнуть большие коммутационные токи, которые приводят к сгоранию используемых в схеме светодиодов.

В этой же схеме необходимо предусмотреть, что в момент срабатывания светодиода должны гореть мигающим светом, для чего используется специальный генератор прямоугольных или треугольных импульсов.

Необходимо предусмотреть такую синхронизацию работы генератора, чтобы в моменты нарастания тока он бы отключал светодиод, т. е. автоматически сдвигал скважность генерируемых импульсов.

Смоделировать релейную схему в *SimPowerSystem* очень легко и быстро. Смоделировать сложный генератор пилообразного напряжения, включающий элементы логики и сравнения, намного проще на элементах Simulink. Весь вопрос в том, как объединить эти две схемы.

### 1. Передача значений из *Simulink*-модели в MATLAB

Итак, начнем с самого простого: как значения из пакета *Simulink* передать в среду MATLAB. Рассмотрим простейшую систему регулирования, приведенную на рис. 2.

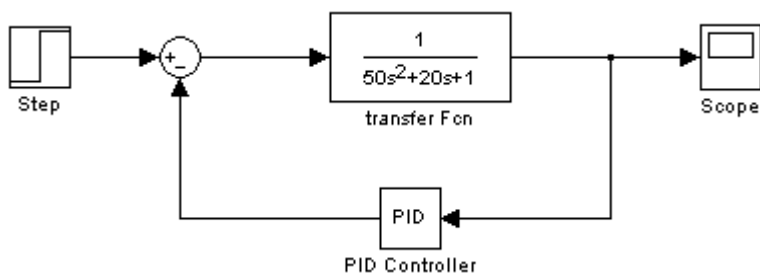


Рис. 2. Модель одноконтурной системы регулирования (model 1.mdl)  
Fig. 2. Single loop control system model (model 1.mdl)

Названия блоков в данной модели не изменены, чтобы читателю было проще ее воспроизвести. Если кликнуть по блоку *Scope*, то мы увидим график переходного процесса, приведенный на рис. 3.

Нам необходимо рассчитать показатели качества данного переходного процесса, такие как динамическая ошибка, степень затухания и другие [11].

Тогда встает вопрос, как передать массив точек данного графика в среду MATLAB. Если у нас будет такой массив, построить график с помощью команд MATLAB и рассчитать показатели качества переходного процесса не составит труда [12, 13].

Для передачи массивов в среду MATLAB можно воспользоваться блоком *Scope*. Для этого кликнем по блоку и активизируем пиктограмму *Parameters* (п. 1 на рис. 3).

В открывшемся окне выберем вкладку *Data History*. Настроим поля вкладки, как показано на рис. 4.

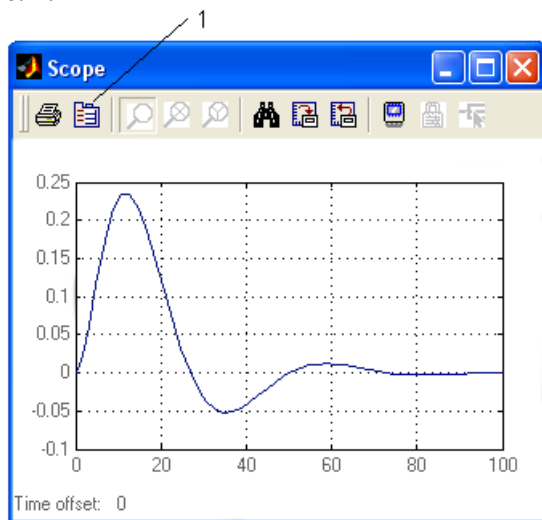


Рис. 3. График переходного процесса  
Fig. 3. Schedule of transition process

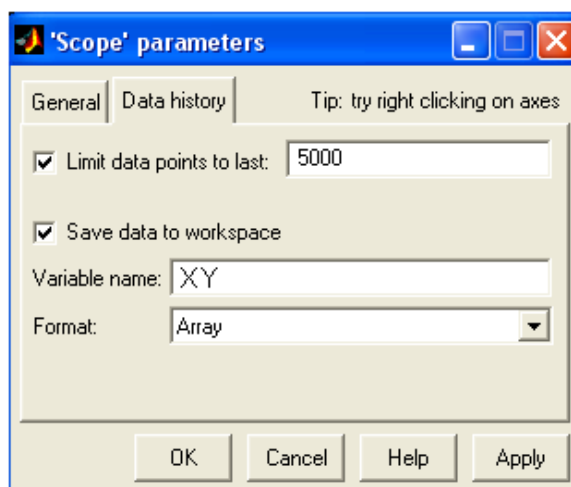


Рис. 4. Вкладка Data History  
Fig. 4. Menu tab Data History

В результате по окончании работы модели в среде MATLAB появится матрица  $XY$ . Первый столбец матрицы содержит текущее время, а второй является массивом значений переходного процесса.

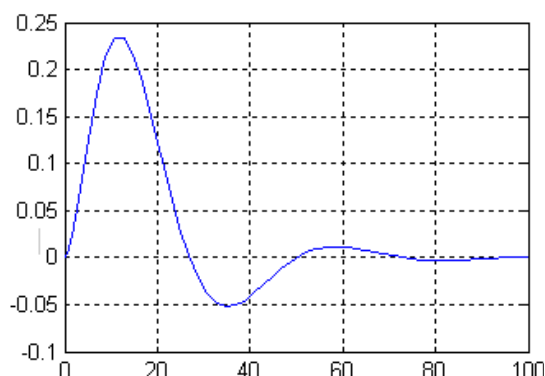


Рис. 5. График переходного процесса, построенный средствами MATLAB  
Fig. 5. MATLAB Transient Schedule

Теперь, чтобы построить график и получить значение динамической ошибки и соответствующий ей момент времени, необходимо выполнить ряд команд в командном окне MATLAB.

Фрагмент *mf01.m*:

```
clc;
L=length(XY); T=XY(1:L,1:1);
Y=XY(1:L,2:2); plot(T,Y),grid;
[D,TD]=max(Y)
```

В результате получим график, приведенный на рис. 5. Расчетное значение динамической ошибки составляет 0,2340, при времени 14 с. Полученные значения соответствуют приведенному графику.

Итак, как получать значения из моделей *Simulink* в среду MATLAB, мы разобрались. Необходимо отметить, что для этих целей в *Simulink* имеется специальный блок *To Workspace*, который настраивается аналогичным образом, но данный блок не позволяет отображать графики непосредственно в модели.

### 2. Передача значений из MATLAB в *Simulink*-модель

Получать значения из среды MATLAB в модели *Simulink* можно несколькими способами. Если это константы, то их необходимо просто инициализировать в среде MATLAB, а затем использовать в блоках *Simulink*.

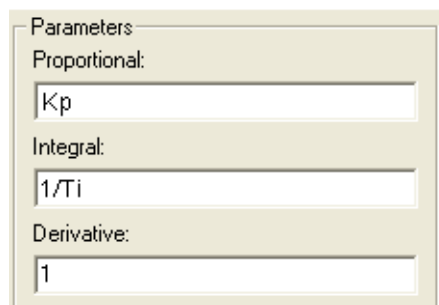


Рис. 6. Использование переменных в настройках регулятора  
Fig. 6. Using Variables in Regulator Settings

Допустим, что настройки нашего регулятора имеют значения  $Kp = 8,3$  и  $Ti = 0,9$ .

Тогда введем эти значения в командном окне MATLAB, а в настройках регулятора укажем их, как показано на рис. 6.

Сложнее обстоит дело, когда сигнал в модели необходимо изменять в соответствии со специальной функцией, разработанной пользователем. Для этого существуют блоки *S-function* и MATLAB *Fcn*. Формат функции, используемой в блоке *S-function*, достаточно сложный и здесь не рассматривается. Дело в том, что в данном блоке можно использовать не только функции на языке MATLAB, но и на других языках, в частности на *C++*, *Fortran* и *Ada*. Этот

блок считается универсальным и используется в том случае, когда функции планируется компилировать в соответствующие динамические библиотеки.

Функции для блока MATLAB *Fcn* – это обычные функции, представляющие М-файлы и написанные на языке MATLAB.

Напишем простейшую функцию:

```
%mfun2
function y=mfun2(k);
y=cos(k);
```

Сохраним функцию в файле *mfun2.m*. Обратимся к ней, как показано на рис. 7.

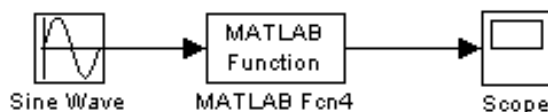


Рис. 7. Модель с использованием блока MATLAB *Fcn* (model2.mdl)  
Fig. 7. Model with MATLAB *Fcn* unit (model2.mdl)

Настройка блока приведена на рис. 8.

В результате работы модели получим графики, приведенные на рис. 9.

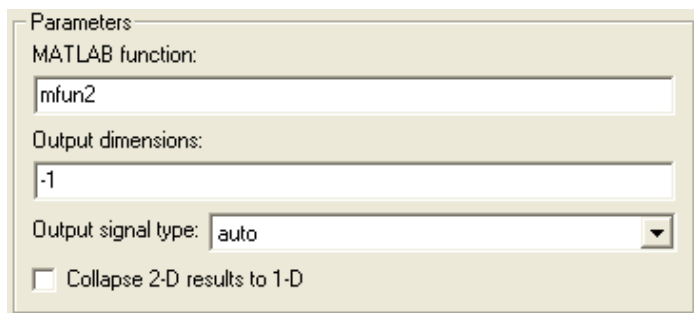


Рис. 8. Настройка блока MATLAB Fcn  
Fig. 8. MATLAB Fcn unit configuration

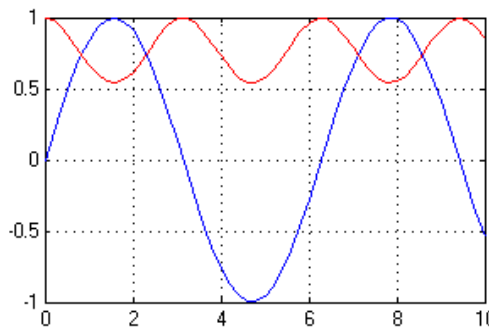


Рис. 9. Результат работы модели  
Fig. 9. Result of work of model

### 3. Передача значений из SimPowerSystem в Simulink

Рассмотрим простейшую модель в SimPowerSystem, приведенную на рис. 10 [14].

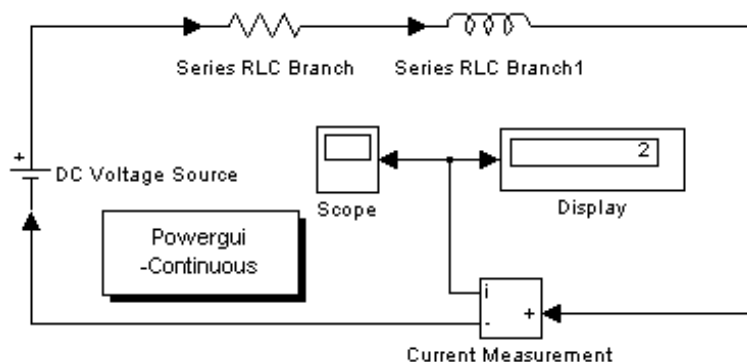


Рис. 10. Модель RL-цепи (model3.mdl)  
Fig. 10. Model of a RL chain (model3.mdl)

Названия элементов в данной модели оставлены по умолчанию, как их присвоила среда моделирования. Настройка элемента *DC Voltage Source* (источник постоянного напряжения) приведена на рис. 11.

Настройка элемента *Series RLC Branch* (последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости) приведена на рис. 12. В результате такой настройки мы получим только активное сопротивление. Аналогичным образом настроим блок *Series RLC Branch1*, только укажем значение сопротивления равным нулю, а значение индуктивности – равным 20 Гн.

Как видно из рис. 10, на дисплее мы видим установленное значение тока в цепи (блок *Current Measurement* является амперметром).

Если кликнуть по блоку *Scope*, то мы увидим прямую линию на уровне 2 А. Если нам нужно увидеть график изменения тока в цепи, то необходимо установить нулевые начальные условия. Для этого кликнем по блоку *PowerGui*. В открывшемся окне нажмем кнопку *Initial States Setting* и в поле *Set Selected* вместо текущего значения, равного 2, установим значение, равное 0.

В результате, кликнув по блоку *Scope*, увидим график изменения тока в цепи. Мы уже знаем, как передавать значения из блока *Scope* в среду MATLAB, поэтому построим график приведенным выше способом (рис. 13).

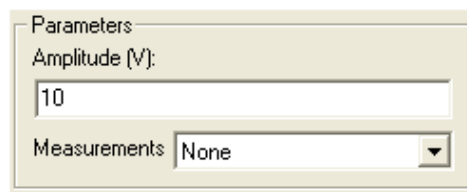


Рис. 11. Настройка элемента DC Voltage Source  
Fig. 11. Configuring of element DC Voltage Source

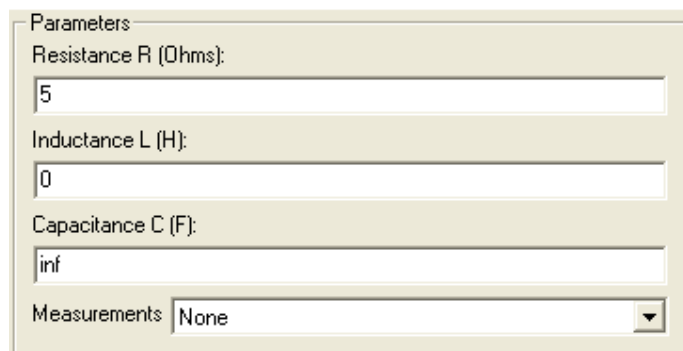


Рис. 12. Настройка элемента Series RLC Branch  
Fig. 12. Configuring of element Series RLC Branch Element

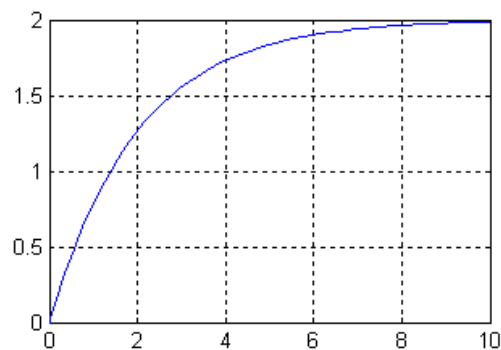


Рис. 13. График изменения тока в цепи  
Fig. 13. Circuit Current Change Graph

А теперь допустим, что нам нужно проинтегрировать полученный сигнал. Это удобно сделать с помощью *Simulink*-блока *Integrator*. Как было сказано ранее, непосредственно использовать блок *Integrator* в схеме нельзя. Но, как видно из рис. 10, для передачи в *Simulink*-блоки значений токов используется блок *Current Measurement* (амперметр). Аналогично для передачи напряжений используется блок *Voltage Measurement* (вольтметр).

Тогда модель для интегрирования значения тока будет иметь вид, приведенный на рис. 14.

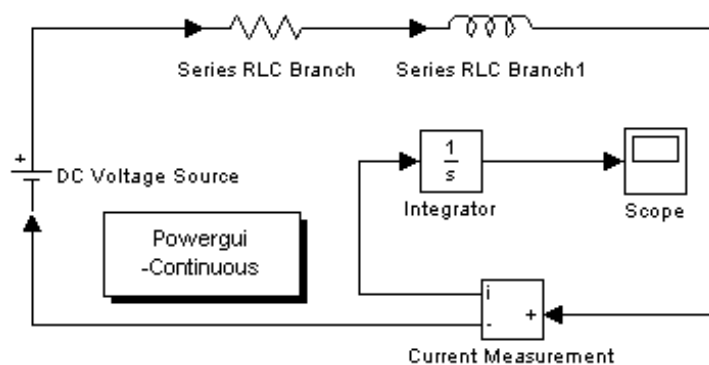


Рис. 14. Передача сигналов из элементов SimPowerSystem в блоки Simulink (model4.mdl)  
Fig. 14. Sending signals from SimPowerSystem elements to Simulink units (model4.mdl)

В библиотеке *Simulink* имеется большой набор математических блоков, позволяющих осуществлять обработку сигналов и преобразование сигналов. Обработанные сигналы можно снова использовать в электрических схемах как источники напряжений или токов, создавая, таким образом, достаточно сложные динамические модели.

Итак, для передачи сигналов из *Simulink*-моделей в модели *SimPowerSystem* используются блоки *Current Measurement* и *Voltage Measurement*.

#### 4. Передача значений из *Simulink* в *SimPowerSystem*

Остается разобраться, как передавать сигналы из *Simulink*-блоков в элементы *SimPowerSystem*. Если для передачи сигналов из *SimPowerSystem* в *Simulink* используются измерительные приборы, то для обратной передачи используются специальные источники.

Для этого в *SimPowerSystem* имеется два блока: *Controlled Voltage Source*, который является регулируемым источником напряжения и *Controlled Current Source*, который является регулируемым источником тока. На входы этих блоков можно подавать сигналы из *Simulink*-моделей.

Поставим обратную задачу: для пинания электрической схемы необходим источник пилообразного напряжения. Сформировать такое напряжение на базе блоков *SimPowerSystem* нельзя. Но в библиотеке *Simulink* имеется блок *Repeating Sequence*, выходом которого является сигнал пилообразной формы. Схема такой модели приведена на рис. 15.



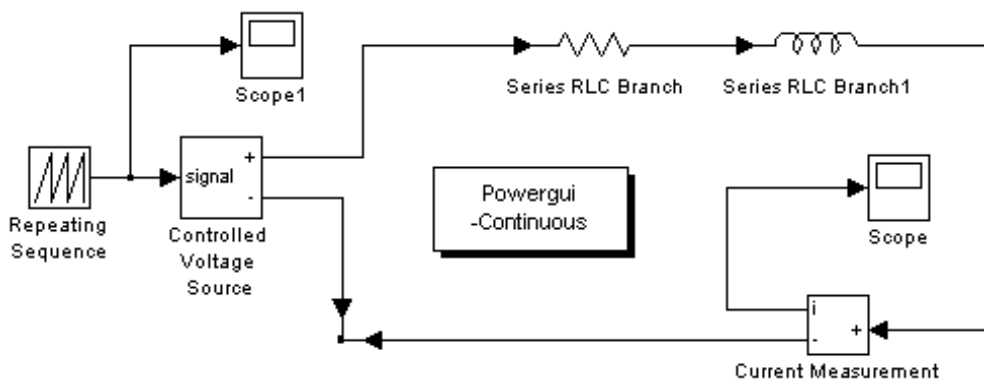


Рис. 15. Передача сигналов из блоков Simulink в элементы SimPowerSystem (model5.mdl)  
 Fig. 15. Transmission of signals from Simulink units to SimPowerSystem elements (model5.mdl)

В настройках блока *Controlled Voltage Source* можно указать начальные условия, от которых начнет меняться напряжение. В нашем случае они нулевые.

График изменения тока в этом случае приведен на рис. 16.

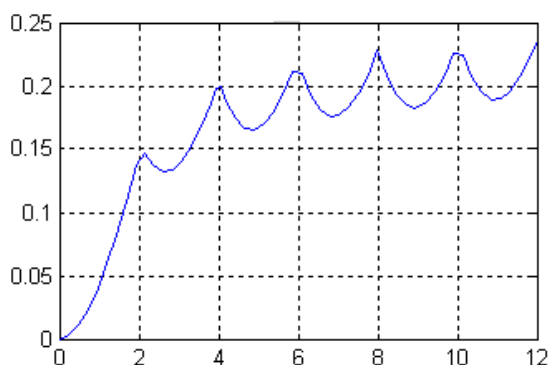


Рис. 16. График изменения тока при напряжении пилообразной формы на входе схемы  
 Fig. 16. Diagram of current change at sawtooth voltage at circuit input

### 5. Нюансы совместного моделирования

При моделировании переходных процессов электрических схем на вход схемы необходимо подать единичный скачок изменения напряжения, что можно реализовать с помощью *Simulink*-блока *Step*.

Пример такой модели по исследованию *RC*-цепи приведен на рис. 17.

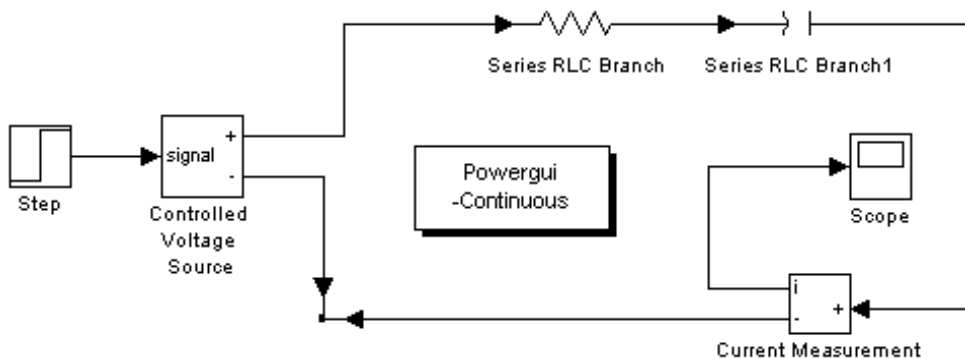


Рис. 17. Модель для исследования RC-цепи (model6.mdl)  
 Fig. 17. Model for RC ceria study (model6.mdl)

На выходе такой *RC*-цепи сформируется импульс, приведенный на рис. 18.

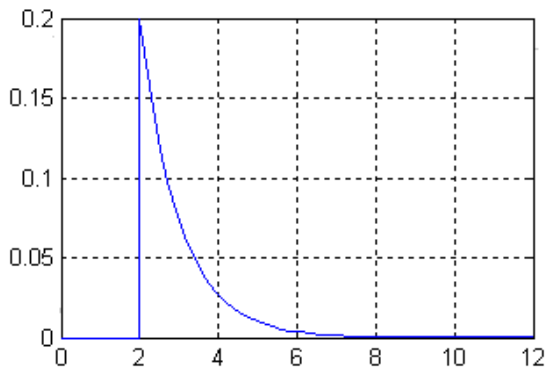


Рис. 18. Импульс на выходе RC-цепи  
Fig. 18. RC circuit output pulse

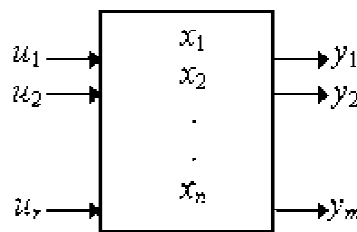


Рис. 19. Векторное представление динамической системы  
Fig. 19. Vector representation of a dynamic system

Часто используется исследование динамики системы в пространстве состояний [15]. Структура такой системы приведена на рис. 19.

Уравнения состояния и выхода такой системы записываются как:

$$\dot{x} = Ax + Bu;$$

$$y = Cx + Du.$$

Строчные буквы обозначают векторы, а заглавные – матрицы.

- Матрица  $A$  – матрица состояния системы, размером  $n \times n$ ;
- Матрица  $B$  – матрица управления (входа),  $n \times r$ ;
- Матрица  $C$  – матрица выхода по состоянию,  $m \times n$ ;
- Матрица  $D$  – матрица выхода по управлению,  $m \times r$ .

Имея такие матрицы, можно исследовать систему на устойчивость, полноту наблюдаемости и управляемости и другие факторы.

Рассмотрим пример. Необходимо получить описание схемы, представленной на рис. 20, в пространстве состояний, в частности получить матрицы  $A$  и  $B$ .

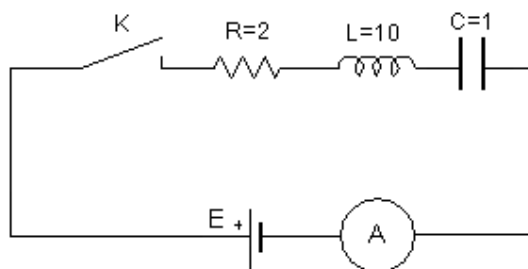


Рис. 20. Принципиальная схема RLC-цепи  
Fig. 20. Circuit RLC schematic diagram

Аналитически описать эту цепь в виде передаточной функции можно следующим образом:

$$Z(s) = R + Ls + 1/Cs = (2s + 10s^2 + 1)/s;$$

$$I(s) = U/Z(s) = 10s/(10s^2 + 2s + 1),$$

где  $s$  – оператор Лапласа;  $Z(s)$  – полное сопротивление цепи в операторной форме;  $I(s)$  – ток в цепи в операторной форме.

Создадим модель, приведенную на рис. 21, и сохраним ее в файл *model7.mdl*.

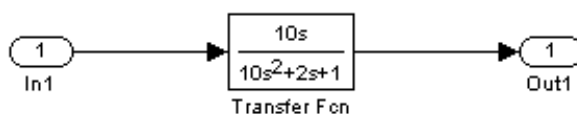


Рис. 21. Модель, имитирующая изменение тока в RLC-цепи (model7.mdl)  
Fig. 21. Model simulating current change in RLC circuit (model7.mdl)

Для получения матриц пространства состояний из модели используется команда:

```
[A B C D]=linmod('имя модели');
Напишем M-файл (mf2.m)
% получаем матрицы из модели Simulink
[A B C D]=linmod('model7');
% формируем описание модели в пространстве
стояний (формат ss)
W=ss(A,B,C,D);
% строим график изменения тока
step(W),grid
В результате получим матрицы:
```

$$A = \begin{bmatrix} -0,2 & -0,1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

и переходный процесс, представленный на рис. 22.

А теперь попробуем получить те же матрицы из SimPowerSystem. Для этого соберем модель схемы, приведенной на рис. 20. Модель должна выглядеть, как показано на рис. 23.

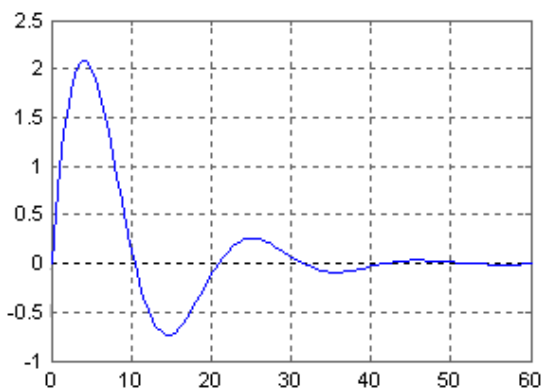


Рис. 22. График изменения тока в цепи  
Fig. 22. Circuit Current Change Graph

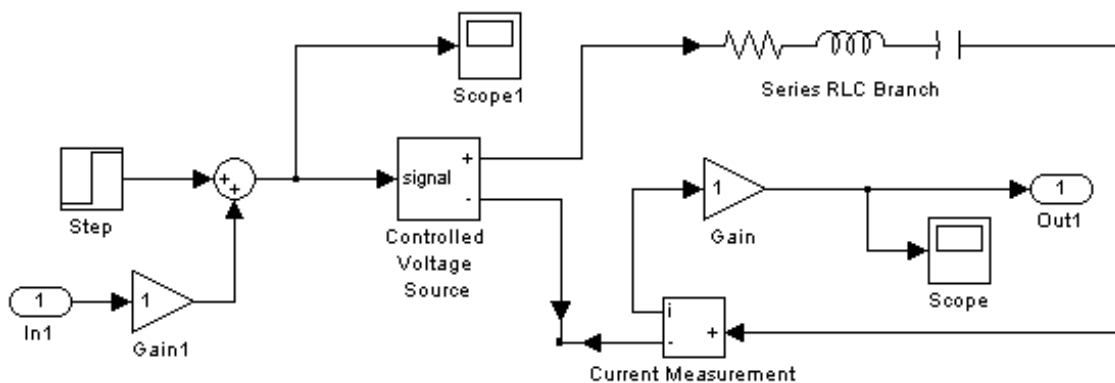


Рис. 23. Модель RLC-цепи (model8.mdl) в SimPowerSystem  
Fig. 23. RLC circuit model (model8.mdl) in SimPowerSystem

В качестве скачка подадим на вход 10 условных единиц, что соответствует 10 вольтам. Запустим модель и кликнем по блоку Scope. В результате получим аналогичный график, как и на рис. 22.

Но если выполнить M-файл (mf2.m), изменив в нем имя модели на model8.mdl, то получим матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -0,2 & -0,1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} -0,1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

и график изменения тока, приведенный на рис. 21.

Как видно из графика, максимальное значение тока стало в 10 раз меньше действительного значения, полученного в модели, приведенной на рис. 24. Так же изменилась матрица управления B. Система не понимает, что на вход модели поступает скачок в 10 вольт, а воспринимает это как единичный скачок. Это один из нюансов совместного использования пакетов, который в отдельных случаях необходимо учитывать.

Чтобы устранить данную проблему, необходимо на входе или выходе модели в одном из блоков Gain установить коэффициент, равный 10, и мы получим достоверные значения.

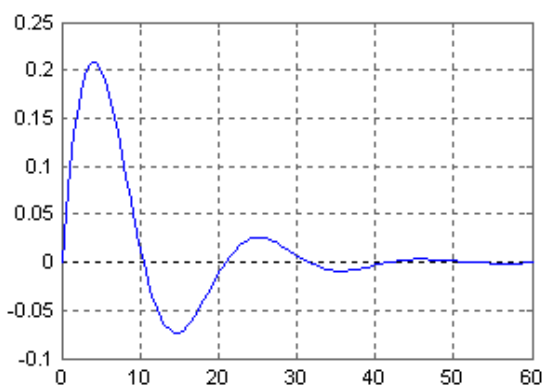


Рис. 24. График изменения тока в цепи при моделировании в SimPowerSystem  
Fig. 24. Diagram of current change in the circuit, during simulation in SimPowerSystem

В данной статье приведены максимально простые модели, чтобы читатель мог понять их принцип работы и при желании повторить.

Совместное использование блоков *Simulink* и *SimPowerSystem* позволяет моделировать и очень сложные динамические системы, повышая при этом их функциональность и наглядность, особенно при моделировании электротехнических систем. В частности в модели на рис. 23 присутствует явная электрическая схема, по сравнению с моделью на рис. 21, где используется только передаточная функция этой схемы, которую к тому же необходимо сначала получить аналитически.

### Литература

1. Бильфельд, Н.В. Управление *Simulink*-моделями из программ верхнего уровня / Н.В. Бильфельд // *Новый университет. Серия: Технические науки.* – 2013. – № 3. – С. 3–7.
2. Затонский, А.В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования / А.В. Затонский. – М.: ИЦ РИОР, 2013. – 136 с.
3. Бычков, Ю.А. Основы теории электрических цепей / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев. – СПб.: Лань, 2002. – 464 с.
4. Фриск, В.В. Основы теории цепей / В.В. Фриск. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 160 с.
5. Затонский, А.В. Моделирование объектов управления в *MatLab* / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова. – СПб.: Лань, 2019. – 144 с.
6. Ануфриев, И.Е. Самоучитель *MATLAB 5.3/6.x* / И.Е. Ануфриев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 710 с.
7. Затонский, А.В. Моделирование статического режима процесса ректификации с идентификацией состава и свойств нефти / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* – 2015. – № 6. – С. 109–116. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-6-109-116
8. Бильфельд, Н.В. Многокритериальное исследование систем управления / Н.В. Бильфельд. – Пермь: ПНИПУ, 2015. – 436 с.
9. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB SimPowerSystems* и *Simulink* / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
10. Кирин, Ю.П. Построение моделей динамики сложных технологических объектов в позиционных системах управления / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* – 2009. – № 3 (27). – С. 25–28.
11. Бильфельд, Н.В. Переходные процессы в цепях постоянного тока / Н.В. Бильфельд. – Пермь: ПНИПУ, 2010. – 53 с.
12. Качественный анализ динамики позиционного регулирования температуры процесса восстановления титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, Н.В. Бильфельд // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* – 2008. – № 10. – С. 54–56.
13. Бильфельд, Н.В. Особенности получения массивов частотных характеристик в *MATLAB* / Н.В. Бильфельд // *Новый университет. Серия: Технические науки.* – 2014. – № 3–4 (25–26). – С. 17–22. DOI: 10.15350/2221-9552.2014.3-4.00023
14. Бильфельд, Н.В. Моделирование цепей постоянного и переменного тока в *SimPowerSystems* и *Simulink* / Н.В. Бильфельд. – Пермь: ПНИПУ, 2010. – 50 с.
15. Бильфельд, Н.В. Программа исследования динамики систем управления / Н.В. Бильфельд // *Программные продукты и системы.* – 2010. – № 3 (91). – С. 118–120.

**Бильфельд Николай Валентинович**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; bilfeld@mail.ru.

**Володина Юлия Игоревна**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; julia\_volodina@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 ноября 2019 г.

## MODELING OF ELECTRICAL SYSTEMS AND CONTROL SYSTEMS BY MODERN MATLAB PACKAGES

N.V. Bilfeld, bilfeld@mail.ru,

Yu.I. Volodina, julia\_volodina@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation

**Introduction.** Packages Simulink and SimPowerSystem are used by most researchers separately due to problems with the mutual transfer of data between functional blocks. In particular, issues of simulation and construction of dynamic models of various systems are solved using the Simulink package, modeling of electrical, electrical systems and electric drive systems are solved using SimPowerSystem. **Aim:** to develop methods of their mutual application both in the educational process and in production for the design of nodes and research etc. **Materials and methods.** In practice, research in the field of electronic and electronic circuits is carried out by analytical calculations. The impossibility of direct routing of signals from Simulink and SimPowerSystem packages in MATLAB is shown. In some cases, only data packets, output signals and vice versa are used. The process of combining two circuits modeled in different packages is described in stages using the following examples: transferring values from Simulink models to MATLAB, transferring values from MATLAB to a Simulink model, transferring values from Simulink to SimPowerSystem. **Results.** All examples are given in an accessible, understandable form, with diagrams, graphs, algorithm of actions, code, expected results, so that the reader can understand their principle. Possible problems when executing the examples and their possible solutions are discussed. **Conclusion.** The joint use of the Simulink and SimPowerSystem blocks allows you to simulate very complex dynamic systems, while increasing their functionality and visibility, especially when modeling electrical systems.

*Keywords: modeling, MATLAB, Simulink, SimPowerSystem, control system, electrical scheme.*

### References

1. Bil'fel'd N.V. [Control of Simulink Models from Top-Level Software]. *New University. Series: Technical Sciences*, 2013, no. 3, pp. 3–7. (in Russ.)
2. Zatonskiy A.V. *Programmnye sredstva global'noy optimizatsii sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Software Tools for Global Optimization of Automatic Control Systems]. Moscow, IC RIOR Publ., 2013, 136 p.
3. Bychkov Ju.A., Zolotnitskiy V.M., Chernyshev E.P. *Osnovy teorii elektricheskikh tsepey* [Fundamentals of the Theory of Electrical Circuits]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2002, 464 p.
4. Frisk V.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of Circuit Theory]. Moscow, Solon-Press Publ., 2004, 160 p.
5. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. *Modelirovanie ob'ektov upravleniya v MatLab* [Control Objects Modeling by MatLab]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019, 144 p.
6. Anufriev I.E. *Samouchitel' MATLAB 5.3/6.h* [Matlab Self-Learning]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2002, 710 p.
7. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. [Modeling of Static Mode of Rectification Process with Identification of Oil Composition and Properties]. *News of Higher Educational Institutions. Oil and Gas*, 2015, no. 6, pp. 109–116. (in Russ.) DOI: 10.31660/0445-0108-2015-6-109-116
8. Bil'fel'd N.V. *Mnogokriterial'noe issledovanie sistem upravleniya* [Multicriteria Study of Control Systems]. Perm, PNRPU, 2015, 436 p.
9. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of Electrical Devices in MATLAB SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008, 288 p.
10. Kirin Yu.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F. [Design of Dynamic Models of Complex Technological Objects with Positional Control Systems]. *Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*, 2009, no. 3 (27), pp. 25–28. (in Russ.)

11. Bil'fel'd N.V. *Perekhodnye protsessy v tsepyakh postoyannogo toka* [Transients in DC Circuits]. Perm, PNRPU, 2010, 53 p.

12. Kirin Ju.P., Zatonskiy A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. [Qualitative Analysis of the Dynamics of Positional Regulation of the Temperature of the Titanium Reduction Process]. *Instruments and Systems. Management, Control, Diagnostics*, 2008, no. 10, pp. 54–56. (in Russ.)

13. Bil'fel'd N.V. [Features of Obtaining Arrays of Frequency Characteristics in MATLAB]. *New University. Series: Technical Sciences*, 2014, no. 3–4 (25–26), pp. 17–22. (in Russ.) DOI: 10.15350/2221-9552.2014.3-4.00023

14. Bil'fel'd N.V. *Modelirovanie tsepej postoyannogo i peremennogo toka v SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of DC and AC Circuits by SimPowerSystems and Simulink]. Perm, PNRPU Publ., 2010, 50 p.

15. Bil'fel'd N.V. [Software for Control Systems Dynamics Research]. *Software Products and Systems*, 2010, no. 3 (91), pp. 118–120. (in Russ.)

*Received 21 November 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бильфельд, Н.В. Моделирование электрических систем и систем управления в современных пакетах MATLAB / Н.В. Бильфельд, Ю.И. Володина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 27–38. DOI: 10.14529/ctcr200103

### FOR CITATION

Bilfeld N.V., Volodina Yu.I. Modeling of Electrical Systems and Control Systems by Modern MATLAB Packages. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 27–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200103

---

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ТИПОВ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

А.А. Колкк<sup>1</sup>, В.А. Колкк<sup>1</sup>, В.И. Ширяев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

**Введение.** В основу современных информационных технологий для сложных систем автоматизации в условиях неопределенности положен принцип ситуационного управления. К таким технологиям относятся следующие: экспертные системы, нейросетевые структуры, нечеткая логика и ассоциативная память. Развитие интеллектуальных технологий связано с объединением различных методов обработки знаний. Данное направление обеспечивает повышение быстродействия, сокращение объема знаний. Предполагается возможным объединение нечеткой логики и экспертных систем. **Цель исследования.** Рассмотреть задачу совершенствования алгоритмов распознавания в системах управления путем объединения методов оптимальной фильтрации и нечеткой логики на этапе вторичной обработки информации о параметрах объектов. **Материалы и методы.** Для предварительной обработки будем рассматривать фильтры Калмана (ФК), для реализации которых в реальном времени требуется меньше вычислительных ресурсов по сравнению с алгоритмами гарантированного оценивания. В предлагаемом методе применим банк (ФК). Математическое моделирование проводим в программной среде Mathcad 14. В программной среде FuzzyTECH разрабатывается нечеткий проект «Распознавание типа объекта». Разработка нечеткой модели проходит в несколько этапов. Во-первых, представление входных переменных в терминах лингвистических переменных. Во-вторых, опираясь на знания экспертов, определяем термы для лингвистических переменных. В-третьих, создание блока правил. В-четвертых, исследование созданного нечеткого проекта. **Результаты.** Проведенное математическое моделирование ФК в устройствах слежения за параметрами объектов в процессе распознавания в программной среде Mathcad 14 показало возможность применения банка фильтров в рассмотренных устройствах. Созданы и исследованы алгоритмы распознавания типов объектов с использованием нечеткой логики. **Заключение.** Созданные алгоритмы системы управления, объединяющие в себе фильтрацию Калмана и нечеткую логику, повышают эффективность системы распознавания.

*Ключевые слова:* информационные технологии, распознавание типов объектов, фильтрация Калмана, нечеткая логика.

## Введение

В основу современных информационных технологий для сложных систем автоматизации в условиях неопределенности [1] положен принцип ситуационного управления [2]. К таким технологиям относятся следующие: экспертные системы, нейросетевые структуры, нечеткая логика и ассоциативная память [3]. В этой связи интерес к интеллектуальным системам управления будет только возрастать [3–5]. В настоящее время существует фундаментальная теоретическая база интеллектуальных систем управления – это работы Д. Поспелова [6, 7], Л. Заде [8, 9], Т. Тэрано [10], А. Леоненкова [11] и др. Концепция построения интеллектуальных систем управления основана на трех ключевых положениях:

- теории ситуационного управления;
- иерархическом принципе построения системы управления;
- обоснованном использовании четырех интеллектуальных технологий, наиболее разработанных на сегодняшний день (экспертных систем, нечеткой логики, нейронных сетей, ассоциативной памяти) [3, 6].

Данная концепция предполагает использование интеллектуальных систем в случаях, когда для повышения качества управления необходимо учитывать все факторы, влияющие на систему, в том числе информационную неопределенность. Интеллектуальные технологии постоянно претерпевают изменения в процессе своего развития. Одним из направлений этого процесса является объединение методов обработки знаний. Развитие интеллектуальных технологий связано с объединением различных методов обработки знаний. Данное направление обеспечивает повышение быстродействия, сокращение объема знаний. Предполагается возможным объединение нечеткой логики и экспертных систем [11].

Одним из направлений развития концепции является разработка бортовых интеллектуальных систем тактического уровня (БИС-ТУ) для антропоцентрических объектов (Антр/объект) [5]. Одним из этапов функционирования Антр/объекта является решение задачи оперативного целеполагания. Для решения данной задачи необходима поддержка, которую могут оказать бортовые оперативно-советующие экспертные системы типовых ситуаций полета (БОСЭС ТС) [5].

Бортовые оперативно советующие экспертные системы типовых ситуаций (БОСЭС ТС) полета летательного аппарата предназначены для решения задач второго глобального уровня управления (П ГлуУ) [5,12]. П ГлуУ – это задачи, с помощью которых определяются рациональные пути достижения текущей цели полета, т. е. тактические задачи.

Одной из таких тактических задач является преодоление боевыми самолетами насыщенной ПВО противника. На современном этапе развития бортового радиоэлектронного оборудования создание бортового комплекса обороны (БКО) как БОСЭС ТС экипажа стало объективной необходимостью.

Применение искусственного интеллекта (ИИ) обеспечивает также возможность создания систем обработки сигналов, способных к самообучению, и дает возможность оперативного вмешательства в программу обработки в зависимости от складывающейся обстановки в информационном пространстве. Нечеткая логика, как говорилось выше, является одной из наиболее используемых и разработанных искусственных технологий, применяемых при разработке современных систем управления.

Очевидной областью внедрения интеллектуальных технологий являются всевозможные экспертные системы, в том числе самообучающиеся системы, называемые иначе классификаторами.

### 1. Постановка задачи

Задача распознавания типов объектов в системах управления бортовых комплексов является чрезвычайно актуальной. Работа всего комплекса состоит из нескольких этапов. На первом этапе сигналы, полученные датчиками, проходят первичную обработку для дальнейшей передачи в систему распознавания.

Второй этап (распознавание) – на основе измеренных параметров принятого сигнала и сравнение их с базой знаний, принятие решения об отнесении объекта к тому или иному типу.

Третий этап – на основе распознавания типа объекта, принятие решения на распределение ресурсов по обслуживанию объекта.

В случае если решение на втором этапе было принято неверное (задача распознавания не выполнена), то и работа всего комплекса по обслуживанию объекта не эффективна. Для повышения эффективности работы системы управления на этапе распознавания необходимо искать пути совершенствования алгоритмов. Применение искусственного интеллекта для качественного анализа принятых сигналов в условиях неопределенности является реальной назревшей необходимостью [3, 4, 6].

В статье ставится и решается задача совершенствования алгоритмов распознавания типов объектов в системах управления путем объединения методов оптимальной фильтрации и нечеткой логики на этапе вторичной обработки информации о параметрах объектов.

### 2. Распознавание типа объекта

Решение задачи построения системы идентификации объектов представляется возможным с помощью внедрения элементов нечеткой логики. В рамках нечеткого подхода предлагается объединение методов фильтрации и нечеткой логики [13].



В теории распознавания оптимальные решения принимаются на основании байесовской процедуры [14].

Для предварительной обработки будем рассматривать ФК, для реализации которого в реальном времени требуется меньше вычислительных ресурсов по сравнению с алгоритмами гарантированного оценивания [15,16], которые целесообразно применять в случае отсутствия статистической информации о помехах в приемных каналах. В нашем случае применим банк фильтров Калмана (ФК). Структурная схема устройства распознавания объектов (объединение методов ФК и НЛ) представлена на рис. 1.

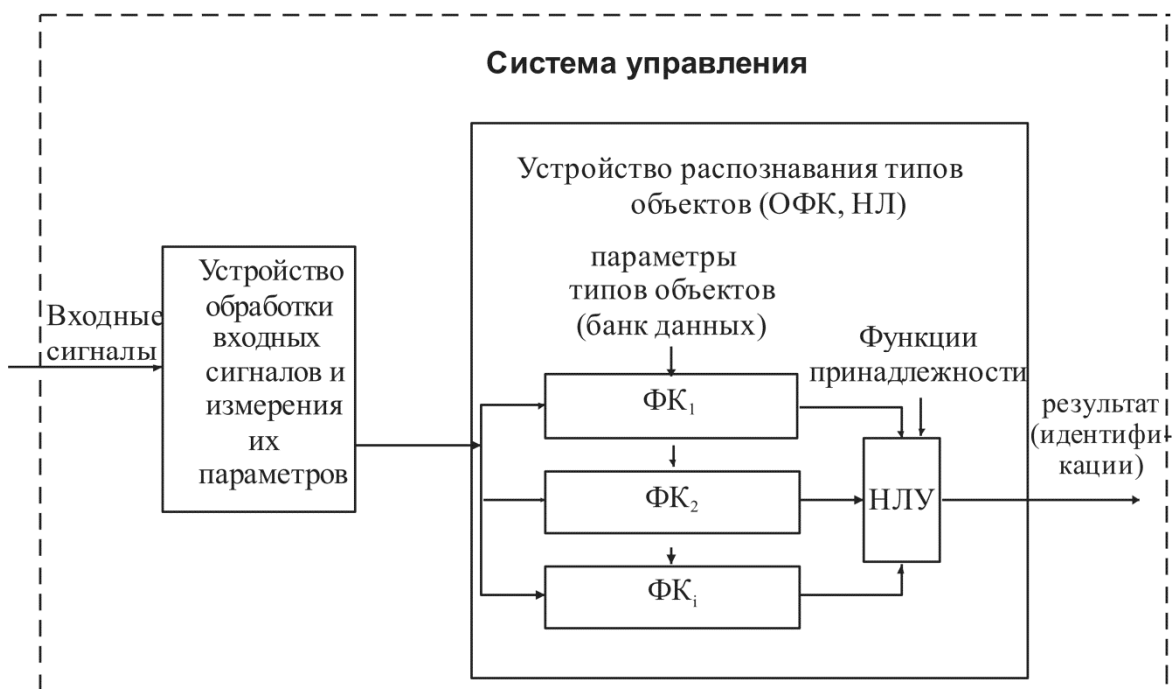


Рис. 1. Структурная схема устройства распознавания объектов (объединение методов ФК и НЛ)  
Fig. 1. Structural diagram of the object recognition device (combination of Kalman Filter and Fuzzy Logic methods)

Рассмотрим следующую ситуацию. Пусть в некотором районе (информационном пространстве) обнаружена группа объектов. Каждому типу объекта соответствует определенный набор параметров, который создается и хранится в базе данных. База создается на основе знаний экспертов в данной области.

Для использования аппарата фильтрации Калмана необходимо разработать математическую модель процесса эволюции параметров и модель процесса измерения [13]. Записываются уравнения процесса эволюции каждого типа объектов, на основании которых формируется банк фильтров Калмана [17]. Обработка принятых сигналов происходит параллельно.

Рассмотрим ситуацию, при которой отнести наблюдаемый объект к одному из известных типов, о котором занесена информация в базу данных (вектор измерения попадает в области принадлежности двух типов объекта), представляется невозможным (возникает неопределенность) (рис. 2) [13].

Пространство наблюдения в данном случае представлено координатами «параметр  $t_1$  – параметр  $t_2$ ». Оцениваем расположение векторов  $X_p$ ,  $X_j$  и  $X_i$  как видим из рис. 2, объекты, находящиеся в областях пространства  $O_j$  и  $O_p$ , относятся к классу  $K_j$  и  $K_p$ , т. е. их тип определяется однозначно. Для некоторого  $i$ -го неизвестного объекта измеренный вектор  $X_i$  не позволяет провести опознавание и отнести его к одному из известных типов, так как вектор  $X_i$  находится в области пространства (заштрихованная область на рис. 2), которая однозначно не может быть отнесена к какому-либо типу объектов.

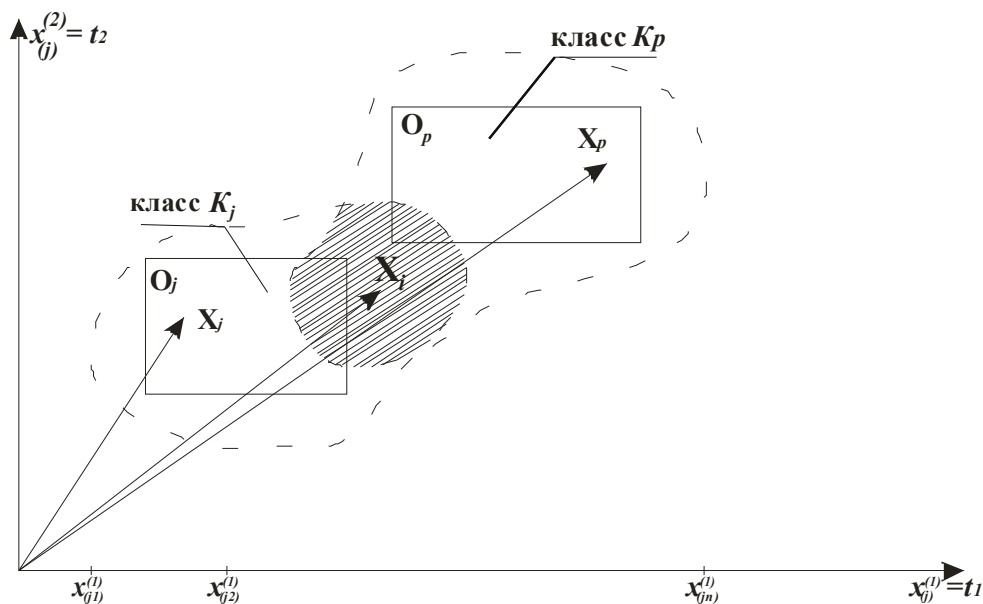


Рис. 2. Области пространства принадлежности типа объекта  
 Fig. 2. Object Type Ownership Space Regions

Применение банков фильтра Калмана позволяет сузить область пространства распознавания, в которое попадает вектор  $X_i$  (рис. 3, 4). В первом случае (см. рис. 3) неопределённость в классификации не возникает и вектор  $X_i$  располагается в области  $O_j$ , т. е. относится к классу  $K_j$ . Во втором случае (см. рис. 4) неопределенность остается, возникает неоднозначная ситуация, когда пространства принадлежности объекта пересекаются, в этом случае и применяем нечеткую логику.

Применение нечеткой логики для данного случая (см. рис. 4) в условиях недостаточности информации о характеристиках наблюдаемых объектов позволяет полнее использовать знания, полученные ранее, а также с помощью программной среды fuzzyTECH вносить оперативную информацию о вновь полученных данных. Знания экспертов используются для создания нечеткой модели устройства распознавания.

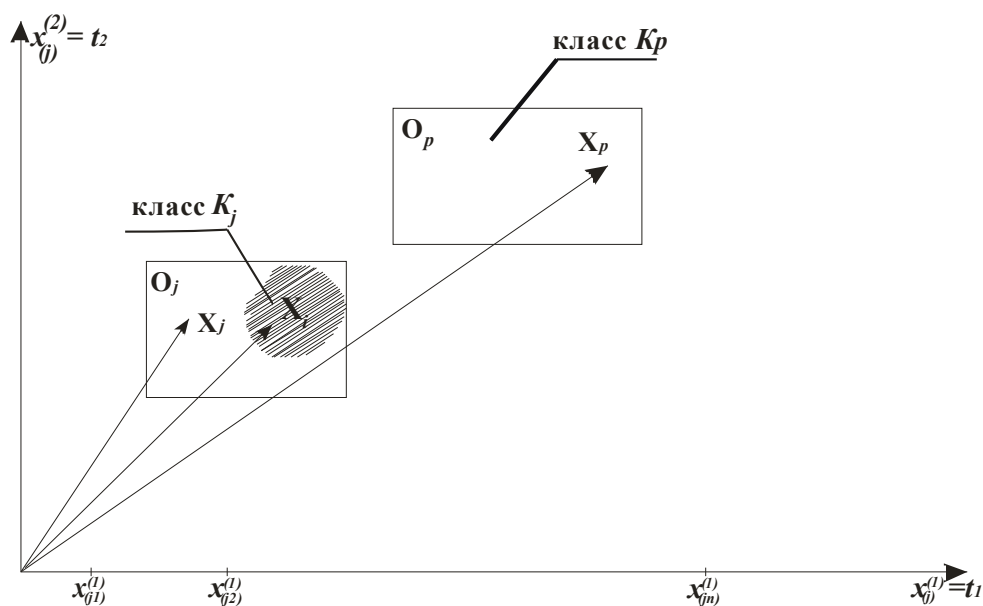


Рис. 3. Области пространства принадлежности типа объекта (ФК)  
 Fig. 3. Object Type Ownership Space Regions (Kalman Filter)

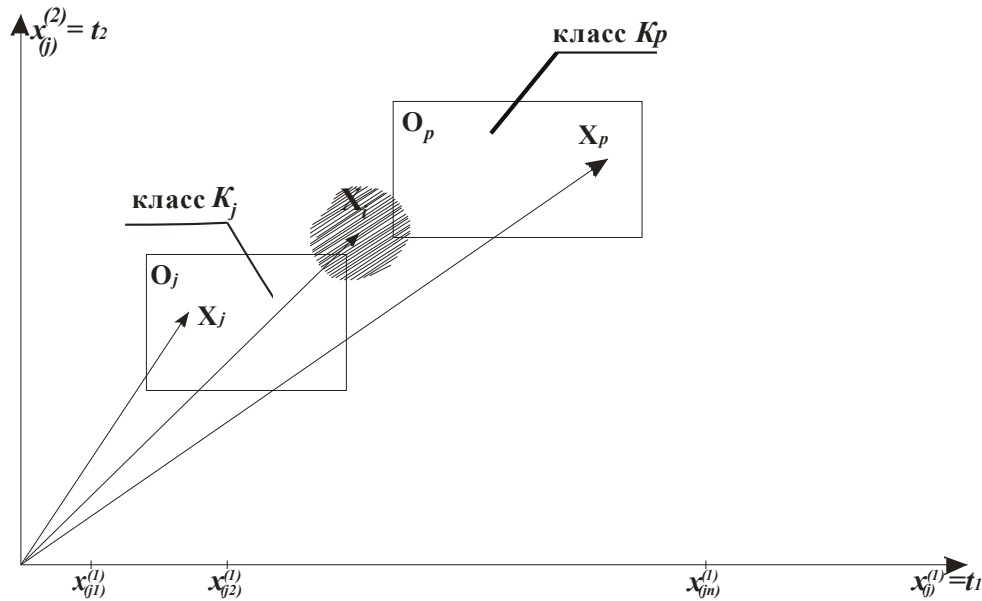


Рис. 4. Области пространства принадлежности типа объекта (НЛ)  
Fig. 4. Object Type Ownership Space Regions (Fuzzy Logic)

Проведенное математическое моделирование ФК в устройствах слежения за параметрами объектов в процессе распознавания в программной среде Mathcad 14 показало возможность применения банка фильтров в рассмотренных устройствах [13, 18, 19].

Были построены следующие модели слежения:

- модель для слежения за изменяющимся параметром (скорость изменения параметра много меньше периода измерения);
- модель, где измеряемый параметр может изменяться скачкообразно, по случайному закону (скорость изменения параметра сопоставима с периодом измерения);
- модель слежения за угловым положением наблюдаемого объекта (поступательное движение объекта).

В результате исследования моделей слежения (типичные ситуации) получены положительные результаты [13, 19]:

- повышается вероятность принятия решения об отнесении наблюдаемого объекта к тому или иному типу;
- повышена устойчивость слежения за движущимися объектами;
- уменьшается вероятность срыва слежения за маневрирующим объектом, а также принятия решения о появлении нового типа объекта [13, 19].

### 3. Построение нечеткой модели «Распознавание типа объекта»

В программной среде FuzzyTECH разрабатывается нечеткий проект «Распознавание типа объекта». Разработка нечеткой модели проходит в несколько этапов. Во-первых, представление входных переменных в терминах лингвистических переменных. Во-вторых, опираясь на знания экспертов, определяем термы для лингвистических переменных. В-третьих, создание блока правил. В-четвертых, исследование созданного нечеткого проекта и коррекция разработанной модели [19].

Определяем входные переменные в терминах лингвистических переменных, которые являются параметрами, характеризующими тип наблюдаемого объекта. Это следующие: скорость объекта (V), площадь объекта (S), принадлежность объекта (T), дистанция до объекта (D). Выходной лингвистической переменной с термами, определяющими классификацию объектов, обозначаем «ГПР». Исследование нечеткого проекта проводим в программной среде fuzzyTECH (рис. 5).

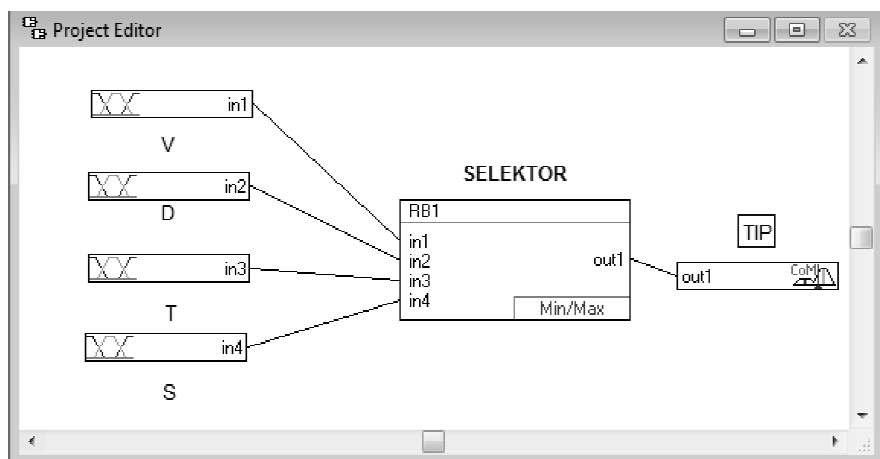


Рис. 5. Нечеткий проект «Распознавания типов объектов» в программной среде fuzzyTECH  
 Fig. 5. Fuzzy project “The Object Type Recognition” in the software environment fuzzyTECH

Термы для входных лингвистических переменных определяем исходя из выбранных параметров (характеристик), необходимых для классификации типов объектов. Например, функция принадлежности термов входной переменной «дистанция до объекта» (D) имеет вид (рис. 6).

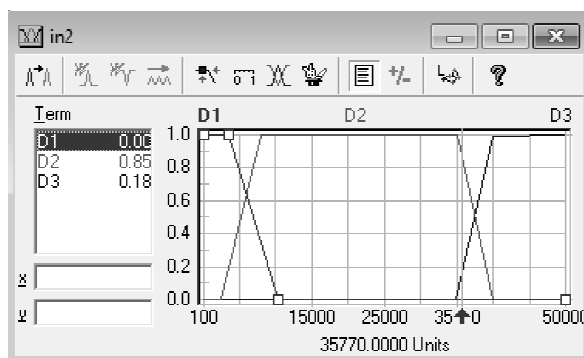


Рис. 6. Функция принадлежности лингвистической переменной «D»  
 Fig. 6. The function of belonging of linguistic variable “D”

В результате проведенной классификации объектов по измеряемым параметрам, создается блок правил, определяющий значение термов выходной переменной. Данные по типам существующих объектов на основании знаний экспертов вносятся в созданный блок правил. Блок правил представляет собой логическое рассуждение «Если ..., то...». В нашем случае набору параметров (их величинам (термам)) соответствует тип наблюдаемого объекта. Блок правил разрабатываемого нечеткого проекта представлен на рис. 7.

#	IF				THEN	
	in1	in2	in3	in4	DoS	out1
1	V1	D1	I	S1	1.00	TIP1
2	V2	D2	I	S4	1.00	TIP3
3	V2	D1	I	S3	1.00	TIP2
4	V3	D3	I		1.00	TIP4
5	V1	D3	I	S3	1.00	TIP6
6		D2	I		1.00	TIP5
7		D1	M		1.00	TIP4
8						

Рис. 7. Блок правил (7 правил)  
 Fig. 7. Rule block (7 rules)

Функция принадлежности выходной лингвистической переменной будет иметь вид (рис. 8).

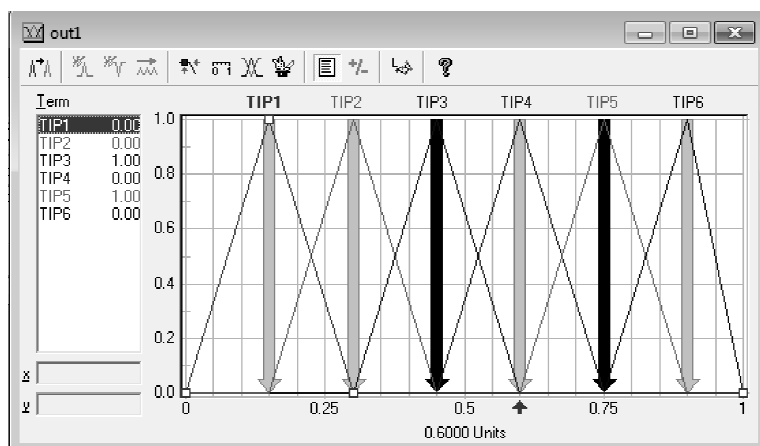


Рис. 8. Выходная переменная «TIP»  
Fig. 8. Output variable "TIP"

Для повышения эффективности разработанной нечеткой модели функции принадлежности входных и выходных переменных их весовые коэффициенты выбираются исходя из предполагаемой обстановки, наличия существующих типов наблюдаемых объектов в конкретном регионе.

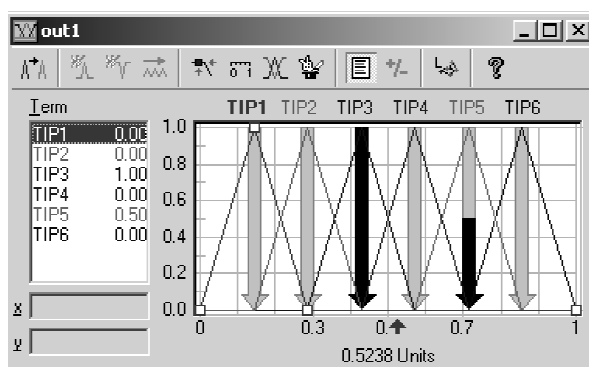


Рис. 9. Выходная переменная «TIP» (изменены весовые коэффициенты)  
Fig. 9. Output variable "TIP" (weight coefficients are changed)

Исследования созданной нечеткой модели показывает, что возникают ситуации, когда однозначное определение типа объекта затруднено. Внесение изменений в весовые коэффициенты на основании знаний экспертов о нахождении в данном регионе определенных типов объектов позволяет повысить вероятность правильного распознавания (рис. 9). Для термина «TIP3» определяем коэффициент 1, а для термина «TIP5» – 0,5 (см. рис. 9). В результате наблюдаем, что тип объекта определяется как «TIP3» с вероятностью 1. Для повышения эффективности разработанных алгоритмов необходимо ввести новый измеряемый параметр, который позволит однозначно отнести наблюдаемый объект к определенному типу. Вводим дополнительную переменную «priznak». Затем вносим изменения в блок правил (изменяем правила 2, 6, 7, 8) (рис. 10):

ПРАВИЛО 2: ЕСЛИ скорость объекта V2, дальность до объекта D2, принадлежность I, площадь S4, дополнительный признак «по», то объект относится к TIP3;

ПРАВИЛО 6: ЕСЛИ дальность до объекта D2, принадлежность I, дополнительный признак TIP5, то объект относится к TIP5;

ПРАВИЛО 7: ЕСЛИ скорость объекта V2, дальность D2, принадлежность I, площадь S4, дополнительный признак TIP3, то объект относится к TIP3.

ПРАВИЛО 8: ЕСЛИ дальность до объекта D2, принадлежность I, дополнительный признак «по», то объект относится к TIP5.

При срабатывании правила 6 происходит однозначное определение типа объекта.

#	IF					THEN	
	in1	in2	in3	in4	in5	DoS	out1
1	V1	D1	I	S1		1.00	TIP1
2	V2	D2	I	S4	no	0.50	TIP3
3	V2	D1	I	S3		1.00	TIP2
4	V3	D3	I			1.00	TIP4
5	V1	D3	I	S3		1.00	TIP6
6		D2	I		TIP5	1.00	TIP5
7	V2	D2	I	S4	TIP3	1.00	TIP3
8		D2	I		no	0.50	TIP5
9		D1	M			1.00	TIP4

Рис. 10. Блок правил (9 правил)  
Fig. 10. Rule block (9 rules)

Функция принадлежности выходной лингвистической переменной после внесения изменений в правила будет иметь вид (рис. 11). Оперативное внесение изменений в структуру нечеткого проекта позволяет учитывать быстроменяющуюся обстановку как появление новых типов объектов, не входящих в классификацию, так и изменение параметров существующих.

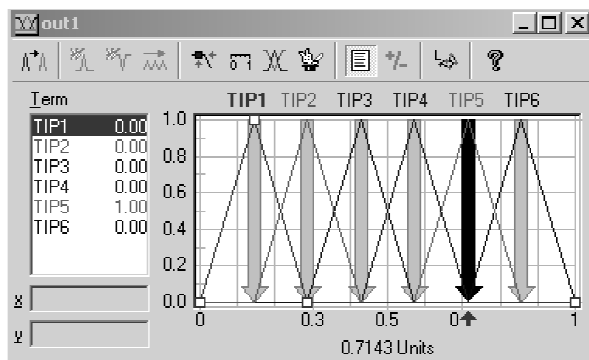


Рис. 11. Выходная переменная «TIP» (9 правил)  
Fig. 11. Output variable "TIP" (9 rules)

Для внедрения разработанных алгоритмов в существующие комплексы необходима только установка дополнительного программного обеспечения, что повышает эффективность системы распознавания типов наблюдаемых объектов и не требует больших затрат.

### Заключение

Системы управления комплексами слежения за объектами предполагают решение задачи распознавания типа объекта и представляют собой сложные технические системы. Создание современных систем управления комплексами слежения требует новых, нетрадиционных подходов. Предложенный метод объединения фильтрации Калмана и нечеткой логики позволяет решать задачи распознавания. Результаты исследования математических моделей фильтра Калмана и нечеткой модели «Распознавание типов объектов» показывают повышение эффективности системы управления. База правил нечеткого проекта может быть оперативно скорректирована при изменении условий наблюдения, а также при появлении новых типов объектов, не попадающих под существующую классификацию. Существующие комплексы располагают возможностью внедрения в них программного обеспечения, обеспечивающего работу системы управления, использующей элементы нечеткой логики.

### Литература

1. Трауб, Дж. *Информация, неопределенность, сложность* / Дж. Трауб, Г. Васильковский, Х. Вожьянковский. – М.: Мир, 1988. – 184 с.
2. Шалыгин, А.С. *Методы моделирования управления движением беспилотных летательных аппаратов* / А.С. Шалыгин, Л.Н. Лысенко, О.А. Толпегин; под ред. А.В. Ноздрачева и Л.Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 2012. – 584 с.
3. *Создание интеллектуальных систем автоматизации и управления на основе современных информационных технологий* / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2007. – № 4. – С. 13–20.
4. Бобырь, М.В. *Нечеткий цифровой фильтр для управления роботом-манипулятором* / М.В. Бобырь, М.Ю. Лунева, К.А. Ноливос // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2019. – Т. 20, № 4. – С. 244–250. DOI: 10.17587/mau.20.244-250
5. Федунов, Б.Е. *Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов)* / Б.Е. Федунов. – М.: Де'Либри, 2018. – 246 с.
6. Поспелов, Д.И. *Ситуационное управление: теория и практика* / Д.И. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
7. *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта* / А.Н. Аверкин, И.З. Батыришин, А.Ф. Блишун и др.; под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
8. Заде, Л.А. *Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений* / Л.А. Заде. – М.: Наука, 1974. – 167 с.
9. Беллман, Р.Э. *Принятие решений в расплывчатых условиях* / Р.Э. Беллман, Л.А. Заде // *Вопросы анализа процедуры принятия решений*. – М.: Наука, 1976. – С. 172–215.
10. Тэрано, Т. *Прикладные нечеткие системы* / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно; под ред. Т. Тэрано. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
11. Леоненков, А.В. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH* / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 736 с.
12. Федунов, Б.Е. *Модель «Этап» для разработки облика бортовых интеллектуальных систем антропоцентрических объектов* / Б.Е. Федунов // *Онтология проектирования*. – 2012. – № 2. – С. 36–43.
13. Колкк, А.А. *Совершенствование алгоритмов оценки параметров радиосигналов с использованием аппарата нечеткой логики при вторичной обработке информации в авиационных комплексах радиоэлектронного подавления* / А.А. Колкк // *Новые технологии: материалы IX Всерос. конф.* – М.: РАН, 2012. – Т. 1. – С. 135–143.
14. Хант, Э. *Искусственный интеллект* / Э. Хант. – М.: Мир, 1978. – 558 с.
15. Кац, И.Я. *Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределенных ситуациях* / И.Я. Кац, А.Б. Куржанский // *Автоматика и телемеханика*. – 1978. – № 11. – С. 79–87.
16. Ширяев, В.И. *Синтез управления линейными системами при неполной информации* / В.И. Ширяев // *Изв. РАН. Техническая кибернетика*. – 1994. – № 3. – С. 229–237.
17. Семушин, И.В. *Устойчивые алгоритмы фильтрации – обзор и новые результаты для систем судовождения* / И.В. Семушин, Ю.В. Цыганова, К.В. Захаров // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2013. – № 3. – С. 90–112.
18. Безмен, Г.В. *Функциональное диагностирование динамических систем с использованием нечетких правил анализа и принятия решений об отказе* / Г.В. Безмен, Н.В. Колесов // *Изв. РАН. Теория и системы управления* – 2011. – № 3. – С. 3–12.
19. *Об алгоритмах распознавания типов радиоэлектронных средств в бортовых комплексах разведки* / А.А. Колкк и др. // *Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: материалы II Всероссийской НПК «АВИАТОР» (11–13 февраля 2015 г.)*. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – Т. 2. – С. 86–92.

**Колкк Андрей Александрович**, преподаватель 1-го факультета подготовки штурманов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск; kandidatyra@mail.ru.

**Колкк Владимир Андреевич**, старший помощник руководителя полетов группы руководства полетами, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск; volodya2met@mail.ru.

**Ширяев Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой систем автоматического управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shiriaevvi@susu.ru.

*Поступила в редакцию 1 августа 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr200104

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS OF AUTOMATIC RECOGNITION OF OBJECTS IN CONTROL SYSTEMS USING FUZZY LOGIC IN TERMS OF UNCERTAINTIES

**A.A. Kolkk**<sup>1</sup>, kandidatyra@mail.ru,

**V.A. Kolkk**<sup>1</sup>, volodya2met@mail.ru,

**V.I. Shiryayev**<sup>2</sup>, shiriaevvi@susu.ru

<sup>1</sup> Russian Air Force Military Educational and Scientific Center "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin", Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

**Introduction.** The basis of modern information technology for complex automation systems in the face of uncertainty is the principle of situational management. Such technologies include the following: expert systems, neural network structures, fuzzy logic and associative memory. The development of intelligent technologies is associated with the combination of various methods of processing knowledge. This area provides increased performance, reduced knowledge. It is supposed that fuzzy logic and expert systems can be combined. **Aim.** Consider the task of improving recognition algorithms in control systems by combining optimal filtering methods and fuzzy logic at the stage of secondary processing of information about object parameters. **Materials and methods.** For preliminary processing, we will consider Kalman filters (FC), for the implementation of which in real time less computing resources are required in comparison with guaranteed estimation algorithms. In the proposed method, we apply FC Bank. We carry out mathematical modeling in the Mathcad 14. In the FuzzyTECH software environment, a fuzzy project "Recognizing the type of an object" is being developed. Development of a fuzzy model takes place in several stages. Firstly, the presentation of input variables in terms of linguistic variables. Secondly, relying on expert knowledge, we define terms for linguistic variables. Thirdly, the creation of a block of rules. Fourth, a study of the created fuzzy project. **Results.** The mathematical modeling of the FC in the devices for tracking the parameters of objects in the process of recognition in the Mathcad 14 software environment showed the possibility of using a filter bank in the considered devices. Algorithms for recognizing object types using fuzzy logic have been created and studied. **Conclusion.** The created control system algorithms, combining Kalman filtering and fuzzy logic, increase the efficiency of the recognition system.

*Keywords: information technologies, object type recognition, Kalman filtering, fuzzy logic.*



## References

1. Traub Dzh., Vasil'kovskiy G., Vozh'nyakovskiy H. *Informaciya, neopredelennost', slozhnost'* [Information, Uncertainty, Complexity]. Moscow, Mir Publ., 1988, 184 p.
2. Shalygin A.S., Lysenko L.N., Tolpegina O.A. *Metody modelirovaniya upravleniya dvizheniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Methods of Modeling Motion Control of Unmanned Aerial Vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, 584 p.
3. Makarov I.M., Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. [Creation of Intelligent Automation and Control Systems Based on Modern Information Technologies]. *Mechatronics, Automation, Control*, 2007, no. 4, pp. 13–20. (in Russ.)
4. Bobyr M. V., Luneva M. Yu., Nolivos K. A. [Fuzzy Digital Filter to Control a Robot Manipulator]. *Mechatronics, Automation, Control*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 244–250. (in Russ.) DOI: 10.17587/mau.20.244-250
5. Fedunov B.E. *Bortovye intellektual'nye sistemy takticheskogo urovnya dlya antropotsentricheskikh ob'ektov (primery dlya pilotiruemykh letatel'nykh apparatov)* [Onboard Intelligent Systems of Tactical Level for Anthropocentric Objects (Examples for Manned Aircraft)]. Moscow, De' Libri Publ., 2018, 246 p.
6. Pospelov D.I. *Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika* [Situational Control: Theory and Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 288 p.
7. Averkin A.N., Batyrshin I.Z., Blishen A.F., Silov V.B., Tarasov V.B. *Nechetkie mnozhestva v modelyakh upravleniya i iskusstvennogo intellekta* [Fuzzy Sets in Control Models and Artificial Intelligence]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 312 p.
8. Zadeh L.A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Making Approximate Decisions]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 167 p.
9. Bellman R.E., Zadeh L.A. *Prinyatie reshenii v rasplyvchatykh usloviyakh* [Decision-Making in Vague Conditions]. *V kn. "Voprosy analiza procedury prinyatiya resheniy"*. [In the Book "Issues of decision-Making Procedure Analysis"]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 172–215.
10. Terano T., Asai K., Sugeno M. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied Fuzzy System]. Moscow, Mir Publ., 1993, 368 p.
11. Leonenko A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy Modeling in MATLAB and FuzzyTECH]. St. Petersburg, BHV Petersburg Publ., 2005, 736 p.
12. Fedunov B.E. [Model "Stage" for the Development of Image-Board Intelligent Systems of Anthropocentric Objects]. *Design Ontology*, 2012, no. 2, pp. 36–43. (in Russ.)
13. Kolkk A.A. [Improvement of Algorithms for the Estimation of Radio Signal Parameters with the Use of Fuzzy Logic during the Secondary Processing of Information in the Aviation Complexes of Radio-Electronic Suppression]. *Novye tekhnologii: materialy IX Vserossiyskoj konferentsii. T. 1* [New Technologies: Materials of the IX All-Russian Conference. Vol. 1]. Moscow, RAN, 2012, pp. 135–143. (in Russ.)
14. Hunt. E. *Iskusstvennyj intellekt* [Artificial Intelligence]. Moscow, Mir Publ., 1978, 558 p.
15. Katz J.I., Kurzhanski A.B. [Minimax Multistep Filtering in Statistically Uncertain Situations]. *Automatic Equipment and Telemechanics*, 1978, no. 11, pp. 79–87. (in Russ.)
16. Shiryayev V.I. [Synthesis of Control of Linear Systems with Incomplete Information]. *News of RAS. Technical Cybernetics*, 1994, no. 3, pp. 229–237. (in Russ.)
17. Semushin I.V., Tsyganova Yu.V., Zakharov K.V. [Robust Filtering Algorithms – Overview and New Results for Navigation Systems]. *Information Technology and Computing*, 2013, no. 3, pp. 90–112. (in Russ.)
18. Bezmen G.V., Kolesov N.V. [Functional Diagnostics of Dynamic Systems Using Fuzzy Rules of Analysis and Decision-Making on Failure]. *News of RAS. Theory and Control Systems*, 2011, no. 3, pp. 3–12. (in Russ.)
19. Kolkk A.A., et al. [On Recognition Algorithms for Types of Electronic Equipment in Airborne Reconnaissance Systems]. *Aktual'nie voprosy issledovaniy v avionike: teoriya, obsluzhivanie, razrabotki. Materiali II Vserossiyskoj NPK "AVIATOR" (11–13 fevralya 2015 g.). T. 2*. [Actual Research Issues in

Avionics: Theory, Maintenance, Development. Materials of the II All-Russian NPK "AVIATOR" Vol. 2]. Voronezh, VUNC Air Force "VVA", 2015, pp. 86–92. (in Russ.)

*Received 1 August 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Колкк, А.А. Совершенствование алгоритмов распознавания типов объектов в системах управления с применением нечеткой логики в условиях неопределенности / А.А. Колкк, В.А. Колкк, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 39–50. DOI: 10.14529/ctcr200104

### FOR CITATION

Kolkk A.A., Kolkk V.A., Shiryayev V.I. Development of Algorithms of Automatic Recognition of Objects in Control Systems Using Fuzzy Logic in Terms of Uncertainties. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 39–50. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200104

---

## ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ОПАСНЫХ МИКРОДЕФЕКТОВ В КАБЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

**И.Е. Жигалов, О.И. Моногаров**

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия*

**Введение.** Рассмотрена проблема диагностики причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции. Данный вопрос является весьма актуальным, так как качество электрической изоляции оказывает непосредственное влияние на надежность и безопасность всего изделия. Для определения и устранения причин появления опасных микродефектов на предприятиях внедрены системы управления качеством, чья работа основана на циклических механизмах и сопряжена с экономическими издержками, вызванными проведением технологических экспериментов. При этом также большое значение имеют опыт и квалификация персонала, анализирующего поступающую информацию. Сложность проводимого анализа заключается в отсутствии однозначной взаимосвязи между значениями показателей качества и причинами микродефектов, в результате чего формируются ошибки при регулировании технологического процесса. **Цель исследования.** Разработка экспертной системы для оказания поддержки в принятии решений по диагностике причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции. **Материалы и методы.** Задача диагностики причин микродефектов может быть представлена как задача нечеткой классификации или распознавания образов. Для ее решения нами была разработана экспертная система, аккумулирующая опыт специалистов высокого уровня ведущих предприятий отрасли. Основными компонентами системы являются машина нечеткого логического вывода и продукционная база знаний. Механизм вывода основан на алгоритме Мамдани с включением дополнительных элементов, отвечающих специфике задачи. База знаний и функции принадлежности разработаны для силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Выходом экспертной системы является нечеткий образ возможных причин образования опасных микродефектов. **Результаты.** По результатам тестирования при использовании разработанной нами системы поддержки на проведение экспериментов сократились на 24 %. **Заключение.** Таким образом, создание системы позволило уменьшить число ошибок при диагностике причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции, повысить степень автоматизации технологического процесса и увеличить эффективность системы управления качеством.

*Ключевые слова:* кабельная изоляция, микродефекты, диагностика, экспертная система, машина нечеткого логического вывода.

### Введение

Технология изготовления изоляции высоковольтных силовых кабелей представляет собой сложный процесс, обусловленный огромным множеством факторов, связанных с условиями производства, настройкой оборудования, качеством исходного сырья, квалификацией персонала и другими. При этом к качеству продукции предъявляется достаточно жесткая система требований, гарантирующая для конечного потребителя надежную и безопасную эксплуатацию кабельных изделий [1]. В связи с этим контроль качества продукции на предприятиях кабельной промышленности имеет большое значение и непосредственно связан с процессом производства. Образование опасных дефектов в большинстве случаев связано с неправильными настройками технологического процесса, регулирование и адаптация которых к условиям производства осуществляются в рамках системы управления качеством на этапе технологической подготовки производства [2–4].

Одной из проблем управления качеством продукции является идентификация причин образования тех или иных дефектов, особенно это касается микродефектов, степень опасности которых связана с генерируемыми ими частичными разрядами. Решение данной проблемы требует от производственного персонала высокого уровня квалификации и опыта, которые часто не соот-

ветствуют сложности поставленной задачи. В результате предприятие терпит убытки, связанные с расходом ресурсов, растягиванием во времени технологической подготовки производства и неэффективной настройкой параметров технологического процесса. Для решения аналогичных задач в других сферах народного хозяйства – стекольной [5] или обрабатывающей промышленности [6] – разрабатываются интеллектуальные экспертные системы, аккумулирующие в себе накопленный опыт специалистов высокого уровня, что позволяет существенно повысить эффективность процесса диагностики. Разработка подобных систем для кабельной промышленности позволила бы повысить степень автоматизации технологического процесса производства высоковольтных кабелей, существенно улучшить диагностику причин образования опасных микродефектов и тем самым обеспечить повышение эффективности производственного процесса в данной сфере.

## 1. Математическая постановка задачи

Пусть после проведения требуемых измерений и испытаний контроля качества изготовления кабельной изоляции имеется множество значений показателей качества  $X$ , причем все показатели за исключением уровня частичных разрядов находятся в норме. Также имеется множество предполагаемых причин образования микродефектов  $V$ , вызвавших появление опасных частичных разрядов. В связи с тем, что в общем случае дать однозначную оценку полученным результатам контроля качества не представляется возможным, определение причин образования опасных микродефектов сводится к задаче нечеткой классификации в многомерном пространстве или распознавания образов, в результате решения которой необходимо получить отображение:

$$X \rightarrow D, D = \{(d_i, \mu(d_i)) \mid d_i \in V\}, \quad (1)$$

где  $d_i$  – класс причины микродефекта;  $V$  – множество возможных причин;  $\mu(d_i)$  – степень принадлежности микродефекта классу  $d_i$ .

## 2. Методология решения

Для решения задачи (1) была разработана машина нечеткого логического вывода, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

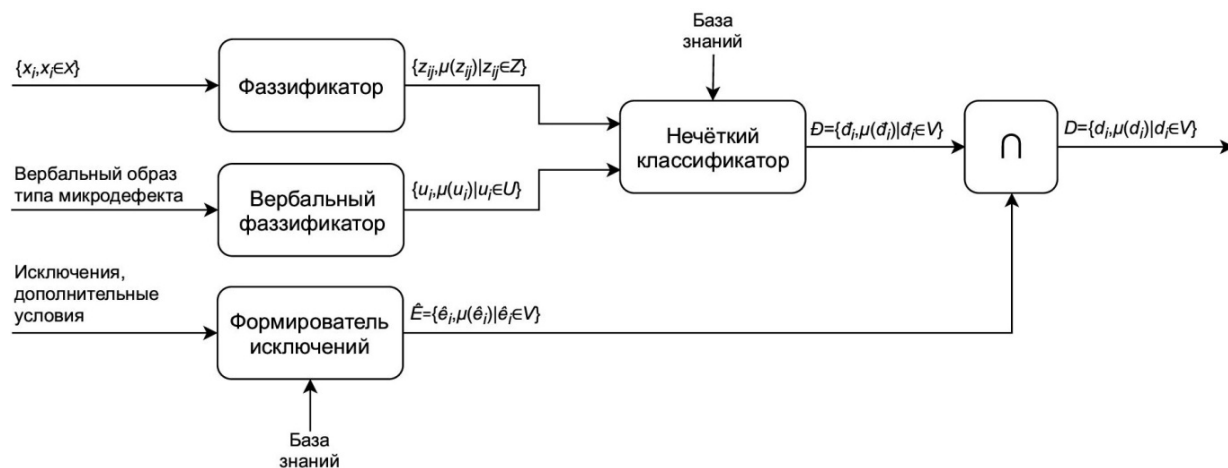


Рис. 1. Функциональная схема машины нечеткого логического вывода  
Fig. 1. Fuzzy logic output machine functional diagram

Процедура нечеткого логического вывода основана на алгоритме Мамдани [7] и содержит в себе дополнительные функциональные элементы, отвечающие специфике принятия решений в диагностике причин микродефектов кабельной изоляции.

Входными данными машины нечеткого логического вывода являются: множество значений показателей качества  $X$  (см. рис. 1), образ наиболее развитого поверхностного микродефекта, исключения и дополнительные условия, а выходными – нечеткий образ  $D$  причины образования опасных микродефектов.

Преобразование численной информации к нечеткому виду производится в фаззификаторе с помощью заданных на основе экспертной информации функций принадлежности следующего вида:

для ограниченных слева показателей качества:

$$\mu(x) = \begin{cases} ax + b & \text{для } c_1 < x \leq c_2, \\ 1 & \text{для } x \leq c_1, \\ 0 & \text{для } x > c_2; \end{cases}$$

для ограниченных справа показателей качества:

$$\mu(x) = \begin{cases} ax + b & \text{для } c_1 < x \leq c_2, \\ 0 & \text{для } x \leq c_1, \\ 1 & \text{для } x > c_2, \end{cases}$$

где  $a, b$  – коэффициенты функции принадлежности,  $c_1, c_2$  – границы областей определения функции принадлежности. Причем на выходе фаззификатора мы имеем множество  $\{(z_{ij}, \mu(z_{ij})) \mid z_{ij} \in Z\}$ , где  $Z$  – расширенное множество показателей качества  $X$ ;  $i$  – номер производственного правила;  $j$  – номер показателя качества из  $X^*$ . Состав показателей качества также расширился в связи с уточнением типов  $u_i \in U$  (см. рис. 1) поверхностных микродефектов по двум последним позициям. Новый состав показателей качества  $X^*$  представлен на рис. 2.

<b>X:</b> 1. тангенс угла диэлектрических потерь; 2. содержание гель-фракции; 3. относительное удлинение под нагрузкой; 4. остаточное относительное удлинение после снятия нагрузки; 5. усадка; 6. водопоглощение; 7. величина выступов на электропроводящем экране; 8. толщина наибольшего поверхностного микродефекта; 9. величина наибольшего поверхностного микродефекта.		<b>X*:</b> 1. тангенс угла диэлектрических потерь; 2. содержание гель-фракции; 3. относительное удлинение под нагрузкой; 4. остаточное относительное удлинение после снятия нагрузки; 5. усадка; 6. водопоглощение; 7. величина выступов на электропроводящем экране; 8. толщина трещины; 9. толщина усадочной раковины; 10. толщина твердой частицы; 11. толщина поры; 12. толщина области нагара; 13. величина трещины; 14. величина усадочной раковины; 15. величина твердой частицы; 16. величина поры; 17. величина области нагара.
<b>V:</b> 1. эластическая турбулентность; 2. эластическое восстановление; 3. усадка; 4. сильное трение в матрице; 5. грязное сырьё; 6. влажное сырьё; 7. продукты химических реакций; 8. поверхностные дефекты экрана.	<b>U:</b> 1. трещины; 2. усадочные раковины; 3. твердые частицы; 4. поры; 5. области нагара.	

Рис. 2. Множества X, V, U, X\*  
 Fig. 2. Sets X, V, U, X\*

Для получения формального представления типа микродефекта  $\{(u_i, \mu(u_i)) \mid u_i \in U\}$  на выходе вербального фаззификатора применяется метод парных сравнений [8], в качестве оцениваемого признака используется степень различимости типа микродефекта  $u_i \in U$ . Иными словами, при сопоставлении двух классов микродефектов из множества  $U$  лицо, принимающее решение, должно ответить на вопрос: «Какой из классов (типов) и в какой мере более узнаваем в имеющемся образе?». Оценивание меры узнаваемости производится на основе пятиуровневой шкалы, в которой ранг 1 соответствует отсутствию преимущества в узнаваемости рассматриваемых классов микродефектов, ранг 3 – слабому преимуществу, ранг 5 – существенному преимуществу, ранг 7 – очевидному преимуществу и ранг 9 – несомненному преимуществу. Соответственно, после завершения процедуры распознавания имеем образ типа микродефекта  $\{(u_i, \mu(u_i)) \mid u_i \in U\}$ .

На следующем этапе в нечетком классификаторе на основе правил базы знаний определяется прообраз причины образования опасных микродефектов  $D$ , механизм получения которого включает: вычисление степени выполнения правил, активизацию исходов правил и аккумуляцию.

Вычисление степени выполнения правил производится с использованием  $t$ -норм MIN, PROD и  $t$ -конормы MAX; конъюнкция во всех случаях выполняется с использованием  $t$ -нормы MIN, за исключением случаев, когда связываются элементы из  $U$  и  $X^*$ ; здесь используется оператор PROD, отражающий более тесную взаимосвязь, присутствующую между типом микродефекта и его значением.

Функции принадлежности исходов правил  $\mu(v_i) \ v_i \in V$  являются синглетами, равными единице. В результате их активации получаем функции принадлежности, равные степени выполнения левой части правил. Последующая аккумуляция объединяет исходы правил с их активированными функциями принадлежности в прообраз причины опасных микродефектов  $D = \{(\bar{d}_i, \mu(\bar{d}_i)) \mid \bar{d}_i \in V\}$ .

Еще один компонент машины нечеткого логического вывода – формирователь исключений – позволяет отсеять уже опровергнутые предположения о причинах образования микродефектов, а также учесть дополнительные сведения о проведенных испытаниях, например, появление опасных частичных разрядов после воздействия циклов нагрева и охлаждения. Правила, используемые в формирователе исключений, носят четкий характер, соответственно и функции принадлежности выходного множества  $\hat{E} = \{(\hat{e}_i, \mu(\hat{e}_i)) \mid \hat{e}_i \in V\}$  будут принимать только два значения – 0 и 1.

В завершающей стадии нечеткого логического вывода с помощью оператора MIN выполняется операция пересечения множеств  $D$  и  $\hat{E}$ , на выходе которой имеем искомое множество  $D$ .

Для работы машины нечеткого логического вывода на основе технической литературы и экспертной информации была сформирована продукционная база знаний. Сбор экспертной информации производился с помощью очного анкетирования. Состав экспертной группы подбирался с учетом формальных требований, взаимных рекомендаций и самооценок респондентов. Взаимные оценки учитывались неформально – через рекомендации, даваемые друг другу членами профессионального сообщества. При этом каждый из участников исследования должен был соответствовать определенным требованиям:

- 1) наличие профильного очного высшего образования;
- 2) занимаемая должность должна быть связана с производством или проведением испытаний кабельной изоляции (технолог, инженер отдела технического контроля, инженер испытательной лаборатории и производные);
- 3) стаж работы в занимаемой должности (должностях) должен составлять не менее 10 лет.

Принятие решения о численности группы и ее квалификации производилось на основе показателей экспертных и групповых самооценок по подготовке сырья, экструзии и вулканизации кабельной изоляции. Целевым показателем была установлена групповая самооценка не ниже 8 по 10-балльной шкале в каждой предметной области. В результате была сформирована рабочая экспертная группа из 12 человек, имеющая следующие групповые самооценки:

- в области подготовки сырья – 8,75;
- в области экструзии – 8,05;
- в области вулканизации – 8,05.

Здесь следует отметить, что согласно [9, 10] численность экспертной рабочей группы из 12 человек принадлежит рекомендуемому диапазону от 5 до 15 человек.

Основная анкета по сбору экспертной информации состоит из описания сложившейся ситуации и 10 вопросов, на рис. 3 представлен шаблон анкеты.

<b>Анкета</b>
<p><b>Описание ситуации:</b> Пусть для изготовленного образца кабеля выполняются все требования по качеству изоляции кроме требования к уровню частичных разрядов. Требуется определить причину образования опасных частичных разрядов, используя результаты контроля других показателей качества, косвенно указывающих на возможную причину. Считать при этом оборудование производственной линии исправным.</p>
<p><b>Вопросы:</b> 1 - 8. Как вы считаете, какие показатели качества изготовления кабельной изоляции и в какой мере связаны с образованием микродефектов, способных вызвать в изоляции опасные частичные разряды вследствие &lt;причина <math>v_i, v_i \in V</math>&gt;?</p>
<p>Перечень показателей качества</p>
<p>9. Укажите для каждого показателя качества предельное значение, начиная с которого он начинает учитываться при диагностике причины образования микродефектов, способных вызвать опасные частичные разряды?</p>
<p>Перечень показателей качества</p>
<p>10. Укажите для каждого показателя качества предельное значение, начиная с которого он оказывает сильное влияние при диагностике причины образования микродефектов, способных вызвать опасные частичные разряды?</p>
<p>Перечень показателей качества</p>

Рис. 3. Анкета экспертного опроса  
Fig. 3. Questionnaire of expert poll

Определение меры взаимосвязи показателей качества с причинами образования микродефектов, способных вызвать опасные частичные разряды, осуществлялось на основе шкалы лингвистических оценок, представленной в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Шкала оценок меры взаимосвязи показателей качества и причин образования микродефектов**  
**Table 1**  
**Scale of assessments of the relationship between quality and causes of microdefects**

Ранг	Лингвистическая переменная
0	«отсутствует»
1	«очень низкая»
2	«низкая»
3	«средняя»
4	«высокая»
5	«очень высокая»

При последующей обработке полученной экспертной информации решались три задачи: 1) оценка качества информации; 2) определение параметров функций принадлежности; 3) составление продукционных правил.

Для решения первой задачи был произведен расчет коэффициентов вариации  $k_V$  [11] ответов на поставленные вопросы, наибольшее значение данного коэффициента оказалось равным 0,201, среднее – 0,098. В соответствии с [12] полученные оценки характеризуют проведенное исследование в целом как имеющее низкую вероятность неверного определения исследуемых величин, в наиболее неоднозначном вопросе – как умеренную, что свидетельствует о высоком уровне надежности принимаемых системой решений.

Вторая задача решается на основе информации о мерах взаимосвязи показателей качества с причинами образования опасных микродефектов и данных об их предельных значениях. На первом этапе ее решения рассчитываются коэффициенты компетентности экспертов, определение которых согласно приведенному в [13–15] описанию является слабо структурированной задачей, в результате чего любая оценка компетентности будет носить весьма условный характер. В связи с этим по рекомендации тех же источников следует пользоваться комбинированными методами оценок, учитывающих как формальные характеристики квалификации экспертов, так и статистику их ответов. Для формальной оценки знаний экспертов будем учитывать их стаж работы, связанной с производством и контролем качества кабельной изоляции, должность и долю рынка предприятия [16]. Шкала оценки данных факторов представлена в табл. 2.

**Таблица 2**  
**Шкала оценок формальных характеристик знаний экспертов**  
**Table 2**  
**Scale of assessments of formal knowledge characteristics of experts**

Стаж, $k_{\text{стаж}}$		Должность, $k_{\text{долж}}$		Доля рынка, $k_{\text{др}}$
От 10 до 15 лет	1,5	Исполнитель	1,5	
От 15 до 25 лет	1,75	Управляющий СЗ	1,75	
Более 25 лет	2	Управляющий ВЗ	2	

Примечания: СЗ – среднее звено (начальник отдела, цеха, заведующий лабораторией, ...); ВЗ – высшее звено (главный инженер, главный технолог, директор по качеству, ...);  $\omega$  – занимаемая предприятием доля российского рынка.

Для статистической оценки ответов используется коэффициент отклонения суждений экспертов, рассчитываемый в соответствии с [15] по формуле

$$k_{\Delta} = \frac{\Delta_l}{\Delta_{\text{max}}},$$

где  $\Delta_l$  – абсолютное значение отклонения суждения  $l$ -го эксперта от среднего,  $\Delta_{\max}$  – максимальное отклонение от среднего.

Тогда результирующий коэффициент компетентности  $l$ -го эксперта  $k_c$  по некоторому оцениваемому показателю равен

$$k_c = k_{\text{стаж}} \cdot k_{\text{долж}} \cdot k_{\text{др}} \cdot (2 - k_{\Delta}).$$

Для расчета коэффициента  $k_c$  выбран мультипликативный механизм образования, так как он в наибольшей степени соответствует логике оценивания компетентности посредством операции «И».

Теперь рассмотрим множества экспертных оценок по 9-му и 10-му вопросам  $C_{01}$  и  $C_{02}$ , включающие в себя соответственно левые и правые границы функций принадлежности. Функции принадлежности, построенные по данным оценкам, представляют собой оригинальные отображения, которые требуется адаптировать к конкретному производственному правилу. Для этого по оси  $OX$  откладываются значения некоторого  $j$ -го показателя качества  $i$ -го производственного правила, а по оси  $OY$  значения его функции принадлежности, и выполняется следующая последовательность действий:

1) находятся оригинальные значения коэффициентов  $a_0$  и  $b_0$  линейного участка  $y_0(x) = a_0x + b_0$  функции принадлежности по точкам  $(x_{01}, 0,2)$  и  $(x_{02}, 1)$  ( $(x_{01}, 1)$  и  $(x_{02}, 0,2)$  для ограниченных слева показателей качества);

2) определяется  $x$ -координата  $c_1$  ( $c_2$  для ограниченных слева показателей качества) точки пересечения функции  $y_0(x)$  с осью  $OX$ ;

3) рассчитываются коэффициенты функции  $y_{ij}(x)$  по формулам:

$$a = \frac{a_0 \cdot \eta}{\eta_{\max}}, \quad b = y_0(x_{01}) - a \cdot x_{01} \quad (b = y_0(x_{02}) - a \cdot x_{02}),$$

где  $\eta$  – мера взаимосвязи показателя качества и причины образования микродефекта, рассчитываемая как средневзвешенная оценка по ответам экспертов с учётом весовых коэффициентов компетентности экспертов  $k_c$ ;

4) определяется  $x$ -координата  $c_2$  ( $c_1$  для ограниченных слева показателей качества) точки, в которой функция  $y_{ij}(x)$  принимает значение 1.

После определения функций принадлежности последней задачей остается формирование правил базы знаний, которое производится на основе ответов на вопросы 1–8. В соответствии с числом элементов множества  $V$  имеем 8 производственных правил (для компактности записи условимся, что для показателей качества из множества  $X^*$  имеется в виду принадлежность их значений к категории высоких, а для элементов множества  $U$  – степень принадлежности к определенному типу микродефектов):

1. ЕСЛИ  $((U(1) \text{ И } X^*(13)) \text{ ИЛИ } (U(1) \text{ И } X^*(8))) \text{ И } ((U(2) \text{ И } X^*(14)) \text{ ИЛИ } (U(2) \text{ И } X^*(9)))$ , ТО  $V(1)$ ;

2. ЕСЛИ  $(U(1) \text{ И } X^*(13)) \text{ ИЛИ } (U(1) \text{ И } X^*(8))$ , ТО  $V(2)$ ;

3. ЕСЛИ  $X^*(5) \text{ И } X^*(6) \text{ И } ((U(2) \text{ И } X^*(14)) \text{ ИЛИ } (U(2) \text{ И } X^*(9)))$ , ТО  $V(3)$ ;

4. ЕСЛИ  $(U(5) \text{ И } X^*(17)) \text{ ИЛИ } (U(5) \text{ И } X^*(12))$ , ТО  $V(4)$ ;

5. ЕСЛИ  $X^*(1) \text{ И } ((U(3) \text{ И } X^*(15)) \text{ ИЛИ } (U(3) \text{ И } X^*(10)))$ , ТО  $V(5)$ ;

6. ЕСЛИ  $X^*(1) \text{ И } ((U(4) \text{ И } X^*(16)) \text{ ИЛИ } (U(4) \text{ И } X^*(11)))$ , ТО  $V(6)$ ;

7. ЕСЛИ  $X^*(2) \text{ И } X^*(3) \text{ И } X^*(4) \text{ И } X^*(6) \text{ И } ((U(4) \text{ И } X^*(16)) \text{ ИЛИ } (U(4) \text{ И } X^*(11)))$ , ТО  $V(7)$ ;

8. ЕСЛИ  $X^*(7)$ , ТО  $V(8)$ .

Отметим, что полученные нами функции принадлежности и производственные правила базы знаний были разработаны для систем управления качеством производства кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ и отражают специфику их изготовления. В качестве объекта исследования нами были выбраны кабели данного класса, так как они являются наиболее востребованными и их производство составляет более 90 % рынка. При необходимости система может быть расширена для кабелей других номинальных напряжений и типов изоляции путем добавления в базу новых правил и соответствующих функций принадлежности.

### 3. Научная новизна

В данной работе на основе экспертной информации были разработаны база знаний и машина нечеткого логического вывода экспертной системы, позволяющей выявлять причины образова-



ния опасных микродефектов в кабельной изоляции и предназначенной для использования в составе автоматизированных производственных систем на предприятиях кабельной промышленности. Отличительной особенностью предлагаемой системы нечеткого логического вывода является механизм формирования функций принадлежности с помощью трансформации некоторой исходной функции на основе экспертных оценок меры взаимосвязи рассматриваемого показателя с заключением продукционного правила.

#### 4. Результаты тестирования

Тестирование разработанной экспертной системы проводилось на основе архивных данных отдела технического контроля одного из предприятий кабельной промышленности, содержащих результаты испытаний кабельной изоляции и уставки параметров технологического процесса. Для каждого кабеля, имеющего проблему, подходящую под описание из анкеты экспертного опроса, была проведена процедура распознавания образа причины опасного микродефекта с использованием разработанной нами экспертной системы. Всего было протестировано 44 кабеля, для диагностики которых специалистам предприятия потребовалось проведение 75 экспериментов с образцами кабелей, а при использовании нашей системы – 57.

#### 5. Анализ полученных результатов

Анализ результатов тестирования показал, что с использованием разработанной нами экспертной системы число проведенных экспериментов и соответственно затраты на их проведение уменьшились на 24 %.

#### Вывод

Таким образом, разработанная экспертная система, предназначенная для диагностирования причины образования опасных микродефектов в кабельной продукции при ее использовании в составе системы управления качеством кабельного производства, позволяет повысить эффективность технологического процесса промышленных предприятий данного профиля.

#### Литература

1. ГОСТ Р 55025–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.
2. Образцов, Ю.В. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества / Ю.В. Образцов, А.А. Фрик, А.А. Сликов // Кабели и провода. – 2005. – № 1. – С. 9–13.
3. Леонов, А.П. Выявление дефектов кабелей и проводов при испытаниях по категории ЭИ-2 / А.П. Леонов, В.В. Редько // Кабели и провода. – 2015. – № 1. – С. 15–20.
4. Баринев, В.М. Входной контроль качества кабельной продукции / В.М. Баринев, А.В. Прохин, Н.Н. Соловьев // Кабели и провода. – 2016. – № 6. – С. 16–18.
5. Домнич, В.С. Построение базы знаний для поиска причин аварийных ситуаций при формировании листового стекла / В.С. Домнич, В.А. Иващенко // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 33. – С. 218–232.
6. Козлова, Т.Д. Экспертная система поддержки принятия решений для определения причин отказов автоматизированных станочных модулей / Т.Д. Козлова, А.А. Игнатьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 19–25.
7. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
8. Борисов, А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
9. Рязанцев, В.И. Методика проведения согласования экспертных оценок, полученных путем индивидуального анкетирования методом анализа иерархий / В.И. Рязанцев, А.В. Морозов // Инженерный вестник. – 2014. – № 12. – <http://engsi.ru/doc/742182.html> (дата обращения: 25.10.2019).
10. Елтаренко, Е.А. Обработка экспертных оценок: учеб. пособие / Е.А. Елтаренко, Е.К. Крупнова. – М.: Изд-во МИФИ, 1982. – 96 с.

11. Бешелев, С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1980. – 263 с. – (Матем. статистика для экономистов).

12. Менеджмент: учеб. / под ред. проф. В.И. Королева. – М.: Экономистъ, 2006. – 432 с. – (Ното faber).

13. Бухарин, С.Н. Проблема оценки компетентности и психологических свойств эксперта / С.Н. Бухарин, Н.А. Дивуева // Инноватика и экспертиза. – 2013. – Вып. 1 (10). – С. 108–115.

14. Коробов, В.Б. Организация проведения экспертных опросов при разработке классификационных моделей / В.Б. Коробов // Социологические исследования. – 2003. – № 11. – С. 102–108.

15. Литвак, Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений / Б.Г. Литвак. – М.: Патент, 1996. – 271 с.

16. Назад в неопределенность: будущее кабельного рынка. – [https://www.ruscable.ru/article/back\\_to\\_uncertainty/](https://www.ruscable.ru/article/back_to_uncertainty/) (дата обращения: 25.10.2019).

**Жигалов Илья Евгеньевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир; [ikgij@vlsu.ru](mailto:ikgij@vlsu.ru).

**Моногаров Олег Игоревич**, соискатель кафедры информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир; [Olegmngarv@rambler.ru](mailto:Olegmngarv@rambler.ru).

*Поступила в редакцию 25 октября 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr200105

## THE EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE REASONS FOR DANGEROUS MICRODEFECTS IN CABLE INSULATION

*I.E. Zhigalov, [ikgij@vlsu.ru](mailto:ikgij@vlsu.ru),*

*O.I. Monogarov, [Olegmngarv@rambler.ru](mailto:Olegmngarv@rambler.ru)*

*Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation*

**Introduction.** In the article the diagnostics problem of the reasons for dangerous microdefects in cable insulation is considered. This issue is very actual, since the quality of electrical insulation had a direct effect on reliability and safety of the whole product. To identify and address the causes of dangerous microdefects companies have installed a quality management system, whose work based on cyclic mechanisms and linked to economic costs caused by technological experiments. In this the experience and qualifications of personnel, analyzing incoming information, are very important. The complexity of the analysis is to lack of unequivocal correlation between values of quality indicators and causes of microdefects, resulting in regulatory mistakes of technological process are formed. **Aim.** The development of the expert system for decision support in diagnosis of cause for dangerous microdefects in cable insulation. **Materials and methods.** The task of diagnosis can be represented as a fuzzy classification task or pattern recognition. To solve it we developed the expert system, accumulating an experience of high-level specialists from leading industry enterprises. Main components of this system are fuzzy inference machine and knowledge base. Inference technique is based on Mamdani algorithm with additional elements for the task. The knowledge base and membership functions are developed only for power cross-linked polyethylene cables for rated voltages from 6 up to and including 35 kV. Output of expert system is a fuzzy pattern of possible causes for dangerous microdefects. **Results.** According to the results of testing by using our developed system experimentation costs were reduced by 24 %. **Conclusion.** Thus, our system has enabled to

reduce number of errors in diagnosis of cause for dangerous microdefects in cable insulation, increase the level of technological process automation and enhance the effectiveness of the quality management system.

*Keywords: cable insulation, microdefects, diagnostics, fuzzy inference machine.*

### References

1. GOST R 55025–2012. *Kabeli silovye s plastmassovoy izolyatsiyey na nominal'noe napryazhenie ot 6 do 35 kV vklyuchitel'no* [Power Cables with Plastic Insulation for Rated Voltages from 6 up to and Including 35 kV]. Moscow, Standartinform, 2014, 31 p.
2. Obratsov Yu.V., Frik A.A., Slivov A.A. [Medium Voltage Cables with XLPE Insulation. Quality Factors]. *Cables and Wires*, 2005, no. 1, pp. 9–13. (in Russ.)
3. Leonov A.P., Red'ko V.V. [The Defect Detection of Cables and Wires in Tests for Categories EI-2]. *Cables and Wires*, 2015, no. 1, pp. 15–20. (in Russ.)
4. Barinov V.M., Pronin A.V., Solov'ev N.N. [Incoming Quality Control of Cable Products]. *Cables and Wires*, 2016, no. 6, pp. 16–18. (in Russ.)
5. Domnich V.S., Ivashhenko V.A. [Development of the Knowledge Base to Search an Accident Reasons at Float Glass Forming]. *Large-Scale System Control*, 2011, vol. 33, pp. 218–232. (in Russ.)
6. Kozlova T.D., Ignat'ev A.A. [Expert Decision Making Support System Determining the Causes of Automated Machine Module Failures]. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, 2013, no. 1 (25), pp. 19–25. (in Russ.)
7. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. *Nechetkie modeli i seti* [Fuzzy Models and Networks]. Moscow, Hot line – Telecom Publ., 2007, 284 p.
8. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Prinyatie resheniy na osnove nechetkikh modelek: Primery ispol'zovaniya* [Decision-Making Based on Fuzzy Model: Examples of Application]. Riga, Knowledge Publ., 1990, 184 p.
9. Ryazantsev V.I., Morozov A.V. [Methodology for the Coordination of Expert Assessments Obtained through an Individual Questionnaire Using the Hierarchy Analysis Method]. *Engineering Bulletin*, 2014, no. 12. Available at: <http://engsi.ru/doc/742182.html> (accessed 25.10.2019).
10. Eltareno E.A., Krupnova E.K. *Obrabotka ekspertnykh otsenok. Uchebnoe posobie* [Interpretation of Expert Appraisals. Manual]. Moscow, MEPhI Publ., 1982, 96 p.
11. Beshelev S.D., Gurvich F.G. *Matematiko-statisticheskie metody ekspertnykh otsenok* [Mathematical-Statistical Methods of Peer Review]. Moscow, Statistics Publ., 1980, 263 p.
12. *Menedzhment: uchebnik* [Management: Tutorial]. Moscow, Economist Publ., 2006, 432 p.
13. Bukharin S.N., Divueva N.A. *Problema otsenki kompetentnosti i psikhologicheskikh svoystv eksperta* [Issue of Assessing the Competence and Psychological Properties of the Expert]. *Innovatics and Expert Examination*, 2013, vol. 1 (10), pp. 108–115. (in Russ.)
14. Korobov V.B. [Organization of Expert Surveys in the Development of Classification Models]. *Sociological Studies*, 2003, no. 11, pp. 102–108. (in Russ.)
15. Litvak B.G. *Ekspertnye otsenki i prinyatie resheniy* [Expert Evaluations and a Decision Making]. Moscow, Patent Publ., 1996, 271 p.
16. *Nazad v neopredelennost': budushhee kabel'nogo rynka* [Back to Uncertainty: the Future of the Cable Market]. Available at: [https://www.ruscable.ru/article/back\\_to\\_uncertainty/](https://www.ruscable.ru/article/back_to_uncertainty/) (accessed 25.10.2019).

*Received 25 October 2019*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Жигалов, И.Е. Экспертная система диагностики причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции / И.Е. Жигалов, О.И. Моногаров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 51–59. DOI: 10.14529/ctcr200105

### FOR CITATION

Zhigalov I.E., Monogarov O.I. The Expert Diagnostic System of the Reasons for Dangerous Microdefects in Cable Insulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 51–59. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200105

## К НАСТРОЙКЕ АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ БАРОМЕТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА СИСТЕМОЙ ВОЗДУШНЫХ СИГНАЛОВ

**В.И. Панферов<sup>1, 2</sup>, Н.А. Тренин<sup>1</sup>, С.В. Панферов<sup>2</sup>,  
А.М. Хаятин<sup>1</sup>, Д.В. Пауков<sup>1</sup>, К.С. Халдин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>3</sup> Target Games, центр разработки компьютерных игр, г. Екатеринбург, Россия

**Введение.** В условиях повышения требований к точности определения высотно-скоростных параметров летательных аппаратов задача настройки алгоритмического обеспечения их систем воздушных сигналов (СВС) по реальным полетным данным является вполне актуальной. **Цель исследования.** Рассмотреть задачу оценки реального значения градиента температуры по высоте атмосферы для целей оперативной подстройки штатного алгоритмического обеспечения СВС. **Материалы и методы.** Традиционный подход заключается в использовании численного значения градиента температуры, принятого для международной стандартной атмосферы (МСА). Особенность предлагаемого подхода заключается в том, что градиент температуры по высоте определяется по текущим измерениям атмосферного давления и температуры, а не высоты и температуры. **Результаты.** Разработаны адаптивный и неадаптивный алгоритмы параметрической идентификации. Предложен усовершенствованный вариант адаптивного алгоритма, обеспечивающий должную настройку его фильтрующих свойств на конкретную статистическую обстановку. Проведена апробация алгоритмов как по характеристикам МСА с применением компьютерного генерирования случайных помех, так и по известным в литературе результатам реальных измерений, полученным с помощью метеорологической ракеты. Выполнено сравнение свойств адаптивного и неадаптивного алгоритмов. Показано, что многократная «прогонка» одних и тех же экспериментальных данных через адаптивный алгоритм приводит практически к одинаковой точности оценки градиента, что и при использовании неадаптивного алгоритма. **Заключение.** Реализация алгоритмов способствует повышению точности определения барометрической высоты воздушного судна (ВС), не требует какой-либо модернизации аппаратной части СВС, необходимо только некоторое дополнение алгоритмического обеспечения системы. Адаптивный алгоритм рекомендуется к применению в случае существенного дрейфа характеристик атмосферы для оперативной подстройки системы.

*Ключевые слова:* барометрическая высота, система воздушных сигналов, градиент температуры, алгоритмы идентификации, экспериментальные данные, фильтрующие свойства.

### Постановка задачи

Известно [1], что для достаточно точного определения высоты воздушного судна (ВС) барометрическим методом необходимо знать, как реально по высоте атмосферы изменяется ее температура. Известно также, что в реальных условиях эта температура обычно убывает с ростом высоты. Причем скорость этого убывания непредсказуемо меняется как в течение суток, так и в течение года, а также она различна в разных пунктах и на разных высотах. Кроме того, в некоторых случаях в определенном диапазоне высот температура может не убывать, а, наоборот, возрастет. Таким образом, зависимость температуры  $T$  от высоты  $h$ , то есть  $T = T(h)$ , почти всегда неизвестна, да и непрерывно меняется. Поэтому при построении теории барометрических высотомеров используют такое понятие, как международная стандартная атмосфера (МСА). Это условное понятие. В МСА считается, что температура по высоте атмосферы изменяется в соответствии с формулой

$$T = T_0 - \gamma(h - h_0), \quad (1)$$

где  $T_0$  – температура воздуха на некоторой высоте  $h_0$ ,  $\gamma = 0,0065$  К/м – градиент температуры для стандартной атмосферы. Также в МСА принято, что на уровне моря атмосферное давление составляет всегда 760 мм рт. ст. (1013,2 гПа), а температура равна +15 °С (288 К), т. е. считается, что

$$T = 288 - 0,0065(h - h_0), \quad (2)$$

а если при этом  $h_0 = 0$ , то высота ВС в этом случае называется абсолютной.

Заметим, что именно формула (2) «заложена» в конструкцию механических барометрических высотомеров [1]. Кремальера прибора позволяет конкретизировать только величину  $h_0$  с помощью указания того давления  $p_0$ , какое есть в МСА на уровне  $h_0$ . Таким образом, температурная погрешность механических высотомеров обуславливается как тем, что его конструкцией «считается», что на уровне моря температура всегда равна 288 К, так и тем, что эта температура уменьшается на 6,5 градуса на каждый километр высоты.

В современных системах воздушных сигналов (СВС) используется следующая зависимость [1–10]

$$T = T_0 - 0,0065(h - h_0), \quad (3)$$

т. е. имеется возможность указать по факту температуру  $T_0$ , которая имеет место на уровне  $h_0$  ( $h_0$ , как и в механических высотомерах, задается давлением  $p_0$ ). Таким образом, методическая погрешность определения высоты СВС будет заметно меньше той погрешности, какая есть у механических высотомеров. Тем не менее остается погрешность, обусловленная тем, что в СВС по-прежнему «считается», что  $\gamma = 0,0065$  К/м, что в реальных условиях может быть совсем не так. Поэтому возникает задача разработки алгоритма оценки реального значения параметра  $\gamma$  по тем данным, которые достаточно надежно измеряются в процессе полета с целью оперативной подстройки алгоритмического обеспечения СВС, задача совершенствования которого является вполне актуальной [2–10].

### Решение задачи

Известно [1], что барометрическая высота ВС определяется в соответствии с формулой

$$p = p_0 \left\{ 1 - \frac{\gamma(h - h_0)}{T_0} \right\}^{\uparrow} \left( \frac{g}{\gamma R} \right). \quad (4)$$

Здесь знак  $\uparrow$  означает возведение в степень, а  $g$  и  $R$  – соответственно ускорение свободного падения и газовая постоянная атмосферного воздуха. Учитывая, что имеет место зависимость (1), данную формулу перепишем в виде

$$\gamma \ln \left( \frac{p}{p_0} \right) = \frac{g}{R} \ln \left( \frac{T}{T_0} \right). \quad (5)$$

Далее предположим, что есть экспериментальные точки  $(p_i^{\exists}; T_i^{\exists})$  – это определенные в процессе полета реальные значения давления и температуры на разных высотах. Эта задача весьма просто решается с помощью СВС. После этого решим следующую задачу оптимизации:

$$I = \sum_{i=1}^n \left[ \gamma \ln \left( \frac{p_i^{\exists}}{p_0} \right) - \frac{g}{R} \ln \left( \frac{T_i^{\exists}}{T_0} \right) \right]^2 \xrightarrow{\gamma} \min. \quad (6)$$

Здесь  $n$  – количество экспериментальных точек. Таким образом, требуется найти такое значение параметра  $\gamma$ , при котором сумма квадратов невязок между правой и левой частями уравнения (5) с подставленными в него экспериментальными данными будет минимальной.

Решая задачу (6), определим, что оптимальное значение параметра  $\gamma$  следует вычислять по соотношению

$$\gamma = \frac{g}{R} \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \ln \left( \frac{T_i^{\ominus}}{T_0} \right) \ln \left( \frac{p_i^{\ominus}}{p_0} \right) \right\}}{\sum_{i=1}^n \left\{ \ln \left( \frac{p_i^{\ominus}}{p_0} \right) \right\}^2}. \quad (7)$$

Рассмотренная задача – это задача параметрической идентификации (параметрической настройки) модели Земной атмосферы на экспериментальные данные по таким ее характеристикам, как температура, давление и высота (уравнения (1), (4) (5)). Решение (7) – это решение данной задачи неадаптивным методом наименьших квадратов (МНК) [11]. Однако представляет интерес решение задачи и адаптивным методом наименьших квадратов, который позволяет уточнять значение идентифицируемого параметра  $\gamma$  по мере получения новой экспериментальной информации [11–14]. Существо адаптивного метода заключается в следующем.

Пусть известно значение идентифицируемого параметра  $\gamma_i$  на  $i$ -м шаге идентификации. Пусть получена новая экспериментальная точка  $(p_{i+1}^{\ominus}; T_{i+1}^{\ominus})$ . Требуется определить «новое» откорректированное значение параметра  $\gamma_{i+1}$  через  $\gamma_i$  и  $(p_{i+1}^{\ominus}; T_{i+1}^{\ominus})$ . Формально задача записывается так:

$$(p_{i+1}^{\ominus}; T_{i+1}^{\ominus}; \gamma_i) \rightarrow \gamma_{i+1}. \quad (8)$$

Запишем выражение для квадрата локальной невязки между правой и левой частями уравнения (5) – локальное значение критерия  $I$ .

$$I_{i+1} = \left[ \gamma_i \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) - \frac{g}{R} \ln \left( \frac{T_{i+1}^{\ominus}}{T_0} \right) \right]^2. \quad (9)$$

Вычислим производную

$$\frac{\partial I_{i+1}}{\partial \gamma_i} = 2 \left[ \gamma_i \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) - \frac{g}{R} \ln \left( \frac{T_{i+1}^{\ominus}}{T_0} \right) \right] \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) \quad (10)$$

и будем определять «новое» откорректированное значение параметра по следующему соотношению:

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i - S_{i+1} \frac{\partial I_{i+1}}{\partial \gamma_i}, \quad (11)$$

где  $S_{i+1}$  – некоторый коэффициент. Оптимальное значение этого коэффициента найдем из условия достижения минимума локальной невязкой после подстановки в ее выражение формулы (11), т. е.

$$S_{i+1\text{ОПТ}} = \frac{1}{2 \left( \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) \right)^2}. \quad (12)$$

Если использовать полученное оптимальное значение коэффициента  $S_{i+1\text{ОПТ}}$ , то окажется, что алгоритм коррекции будет иметь вид

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i - \frac{\left[ \gamma_i \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) - \frac{g}{R} \ln \left( \frac{T_{i+1}^{\ominus}}{T_0} \right) \right]}{\ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right)}. \quad (13)$$

Если упростить это соотношение, то получим

$$\gamma_{i+1} = \frac{\frac{g}{R} \ln \left( \frac{T_{i+1}^{\ominus}}{T_0} \right)}{\ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right)}. \quad (14)$$

Как видно из формулы (14), алгоритм коррекции не имеет «памяти» и с точки зрения помехоустойчивости такое свойство алгоритма (14) считается плохим [11–14]. Данную формулу можно было бы получить, и напрямую отыскивая минимум локальной невязки (9), однако проделанные выкладки позволяют сформировать структуру алгоритма, имеющую большую помехоустойчивость. Для этого несколько откорректируем формулу для  $S_{i+1}$  и будем полагать, что

$$S_{i+1} = \frac{0,5}{\alpha + \left( \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) \right)^2}, \quad (15)$$

где  $\alpha$  – некоторый параметр,  $0 \leq \alpha < \infty$  – используется для повышения помехоустойчивости алгоритма. В этом случае алгоритм коррекции будет иметь вид

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i - \frac{\left[ \gamma_i \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) - \frac{g}{R} \ln \left( \frac{T_{i+1}^{\ominus}}{T_0} \right) \right] \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right)}{\alpha + \left( \ln \left( \frac{p_{i+1}^{\ominus}}{p_0} \right) \right)^2}. \quad (16)$$

Если сравнить соотношения (13) и (16), то вполне очевидно, что по алгоритму (16) параметр  $\gamma$  будет исправляться от шага к шагу заметно осторожнее. В новом вычисленном значении этого параметра  $\gamma_{i+1}$  будет содержаться информация как о прежнем его значении  $\gamma_i$ , так и «новая» информация об экспериментальных значениях давления и температуры  $(p_{i+1}^{\ominus}; T_{i+1}^{\ominus})$ .

### Особенности предлагаемого подхода

Если искать решение задачи определения градиента температуры по высоте  $\gamma$  по экспериментальным данным, как говорится «в лоб», то в первую очередь возникает идея напрямую использовать для этого уравнение  $T = T_0 - \gamma(h - h_0)$ . Однако это уравнение в данном случае непригодно для решения задачи, так как для этого необходимо иметь достаточно точные экспериментальные значения высоты  $h$ , что в принципе невозможно, поскольку вся теория измерения барометрической высоты основана на предположении о том, что  $\gamma$  уже известно. Радиовысотомер для этой цели также непригоден, так как даже при горизонтальном полете он будет выдавать переменный сигнал из-за изменения рельефа пролетаемой местности. Особенность предлагаемого подхода к решению задачи заключается в том, что для идентификации параметра  $\gamma$ , необходимого для подстройки алгоритмического обеспечения СВС, используются измеренные той же СВС значения давления и температуры на разных высотах. Кроме того, такой подход позволяет не нарушать свойство автономности СВС.

### Апробация алгоритмов идентификации

Для апробации адаптивного и неадаптивного алгоритмов идентификации были разработаны специальные компьютерные программы.

Если с помощью алгоритма (7) обработать данные, содержащиеся в характеристиках СТА, то вычисленное значение  $\gamma$  в точности равно его заявленному в литературе значению для СТА. Кроме того, если эти же данные использовать для апробации алгоритма (13), то сразу же на первой итерации ошибка в задании начального значения  $\gamma$  исправляется и последующие вычисляемые его значения в точности равны 0,0065 К/м.

Далее при исследовании свойств предлагаемых алгоритмов идентификации на эти же данные накладывались помехи, генерируемые датчиком случайных чисел, качество работы алгоритма (7) в этом случае получается также практически удовлетворительным. Так, при максимальной помехе в определении давления в  $\pm 50$  Па и помехе в определении температуры в  $\pm 5$  °С погрешность в определении  $\gamma$  не превысила по модулю 0,000022 К/м, что весьма удовлетворительно.

Алгоритм (13), или что то же самое (14), в данной ситуации настолько неприемлем, насколько

ко велики помехи в сигналах давления и температуры. Причем погрешность в определении температуры оказывает большее влияние на погрешность оценки  $\gamma$ , чем погрешность измерения давления. Так, при максимальной случайной погрешности в определении давления в  $\pm 20$  Па и случайной помехе в определении температуры в  $\pm 1$  °С максимальная погрешность оценки  $\gamma$  по модулю составила  $0,0023$  К/м. При увеличении случайной помехи в измерении температуры до  $\pm 2$  °С максимальная погрешность оценки  $\gamma$  по модулю выросла до  $0,0046$  К/м. Если же случайную погрешность в измерении температуры оставить на уровне  $\pm 1$  °С, а случайную погрешность в измерении давления уменьшить с  $\pm 20$  до  $\pm 10$  Па, то погрешность в определении  $\gamma$  практически не изменится – ее изменение составило всего лишь  $9 \cdot 10^{-7}$  К/м.

Работа алгоритма (16) иллюстрируется рис. 1.

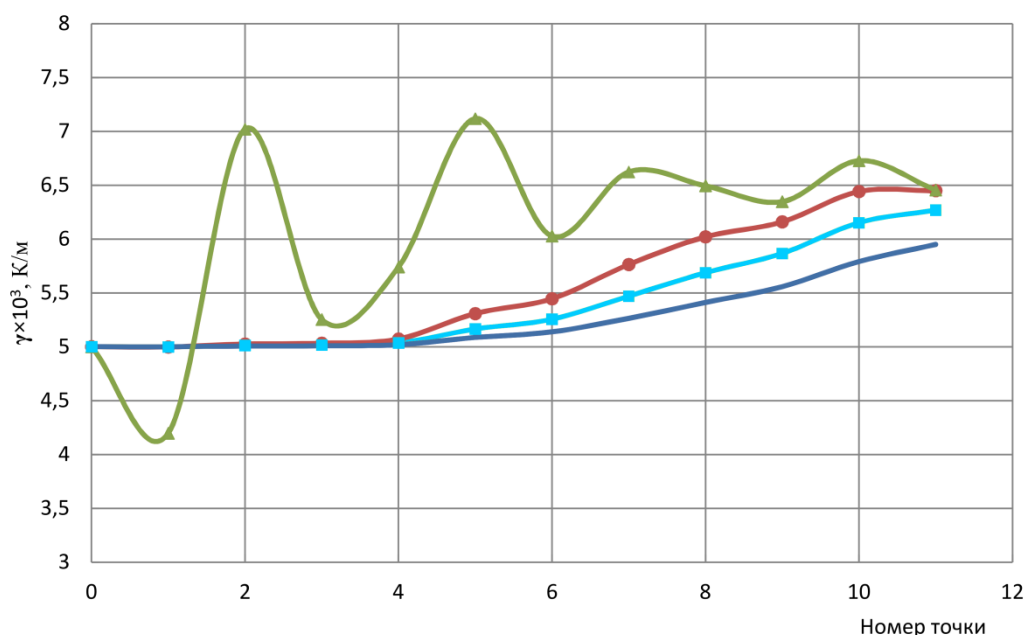


Рис. 1. Отслеживание численного значения градиента температуры  
Fig. 1. Tracking the numerical value of the temperature gradient

На рис. 1 кривая, отмеченная «треугольниками», – это оценка градиента температуры по алгоритму (13), или что то же самое по алгоритму (14), или что то же самое по алгоритму (16), при параметре  $\alpha=0$ ; три другие кривые – это оценки градиента температуры по алгоритму (16), при этом для кривой, отмеченной «кружками»,  $\alpha=0,25$ ; для кривой, отмеченной «квадратами»,  $\alpha=0,5$ ; для кривой без отметок (марок)  $\alpha=1,0$ . Здесь погрешность в измерениях давления и температуры генерировалась с помощью датчика случайных чисел в диапазонах  $[-50, +50]$  Па и  $[-1, +1]$  К соответственно.

Как видно из рис. 1, подбирая численное значение параметра  $\alpha$  для конкретной статистической обстановки, можно добиться удовлетворительного качества работы адаптивного алгоритма (16). Как видно из рис. 1, алгоритм (16) с  $\alpha=0,25$  вполне приемлем для отслеживания параметра  $\gamma$  в имеющейся статистической обстановке. Увеличение численного значения параметра  $\alpha$  приводит к замедлению скорости отслеживания параметра  $\gamma$ .

Для апробации алгоритмов идентификации были использованы также и экспериментальные данные работы [15]. По этим данным найденное неадаптивным МНК (алгоритм (7)) численное значение градиента температуры составило  $\gamma = 0,00693$  К/м, что подтверждает возможность отличия реальных значений этого параметра от значения МСА. Кроме того, экспериментальные данные этой же работы обрабатывались также и адаптивным алгоритмом (16), результаты представлены на рис. 2.



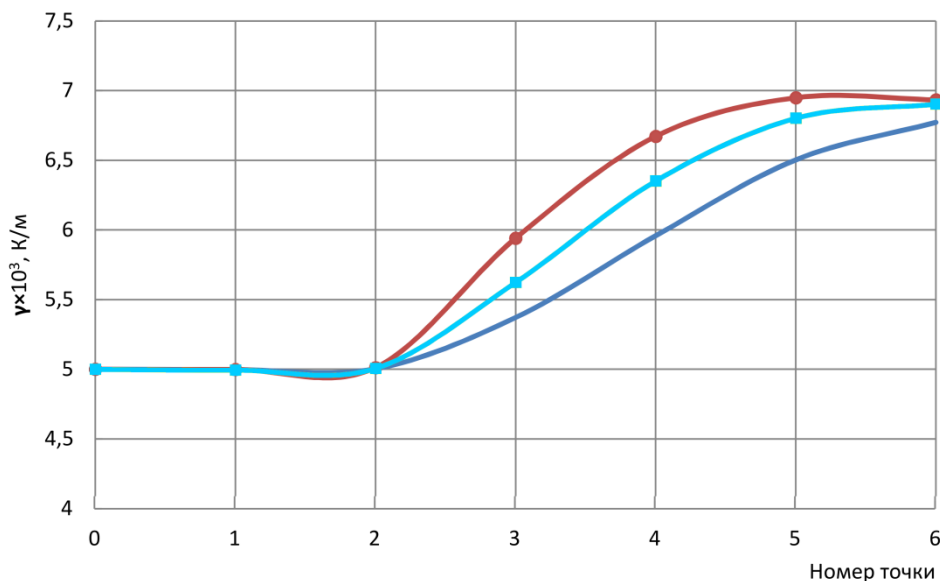


Рис. 2. Отслеживание численного значения градиента температуры по экспериментальным данным

Fig. 2. Track the numerical value of the temperature gradient from experimental data

Здесь также для кривой, отмеченной «кружками»,  $\alpha=0,25$ ; для кривой, отмеченной «квадратами»,  $\alpha=0,5$ ; для кривой без отметок (марок)  $\alpha=1,0$ .

Как видно из рис. 2, здесь статистическая обстановка такова, что ошибка в задании начального значения параметра  $\gamma$  практически удовлетворительно исправляется уже по 6 точкам, причем лучшая скорость отслеживания наблюдается при  $\alpha=0,25$ . Как известно [16], общих рекомендаций по выбору параметра  $\alpha$  дать нельзя, необходима «...подгонка его к конкретной статистической обстановке» [16, с. 64].

В работе также исследовался тот факт, что многократная прогонка одних и тех же экспериментальных данных через адаптивный алгоритм позволяет добиться того же качества идентификации, что и при использовании неадаптивного алгоритма [11]. В данном случае применялись двукратная и трехкратная прогонка 6 экспериментальных точек. На рис. 3 приведены результаты двукратной прогонки экспериментальных данных.

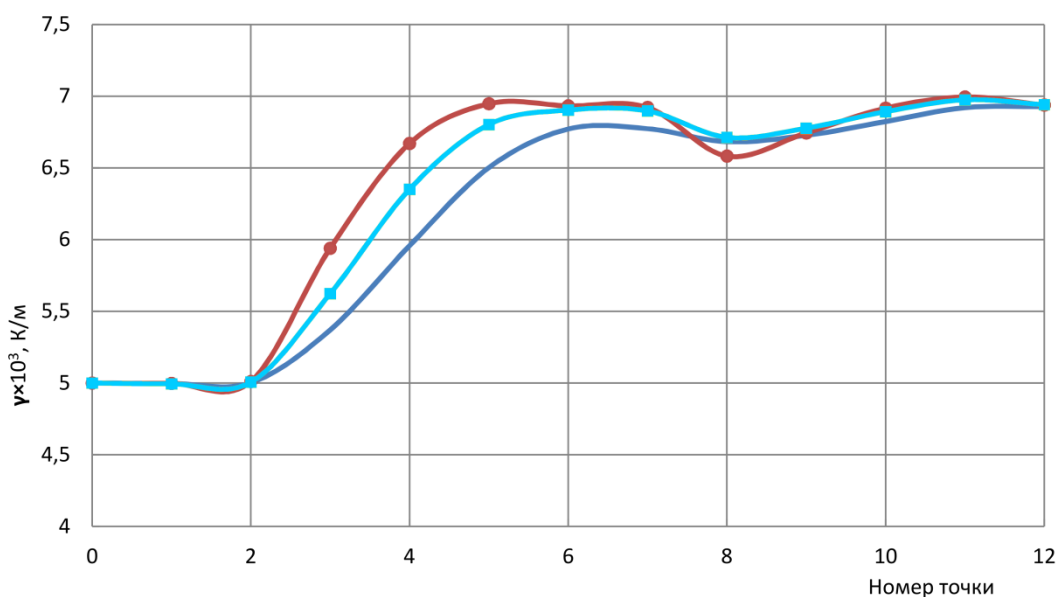


Рис. 3. Двукратная прогонка экспериментальных данных через адаптивный алгоритм

Fig. 3. Double run of experimental data via adaptive algorithm

Как видно из рис. 3, при тех значениях параметра  $\alpha$ , что и для случаев на рис. 1 и 2, все три кривые к концу уже второй прогонки практически «сливаются», а отслеживаемое значение параметра  $\gamma$  практически полностью совпадает со значением, найденным неадаптивным МНК.

На рис. 4 приведены результаты трехкратной прогонки экспериментальных данных.

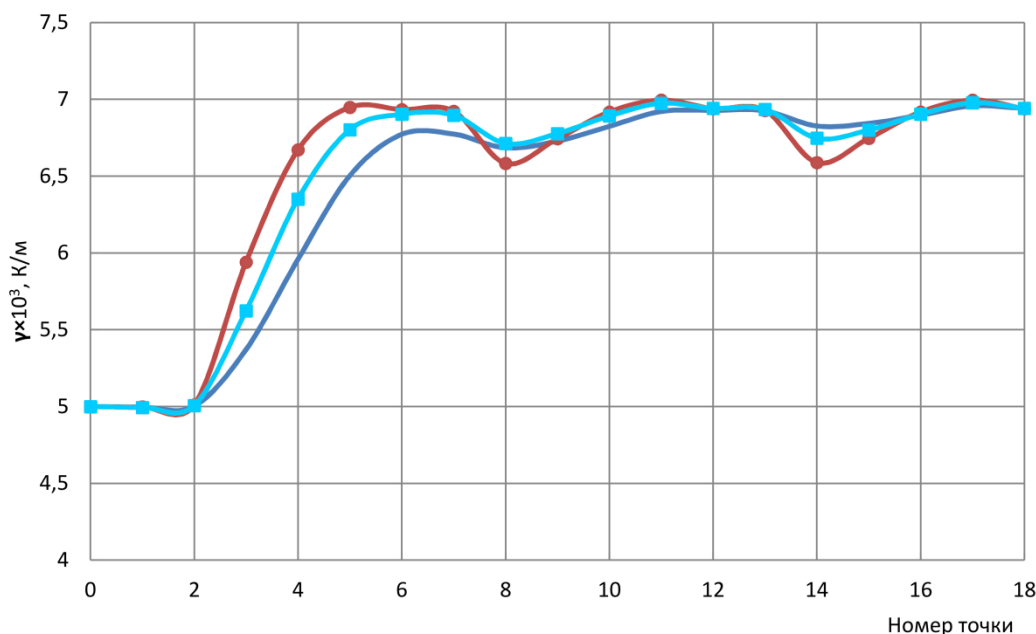


Рис. 4. Трехкратная прогонка экспериментальных данных через адаптивный алгоритм  
Fig. 4. Three-fold run of experimental data via adaptive algorithm

Как видно из рис. 4, трехкратная прогонка экспериментальных данных через адаптивный алгоритм уже мало что дает. Очевидно, что удовлетворительная точность оценки достигается и ранее, а по существу уже в конце первой прогонки.

Провал кривых в точках стыка разных прогонок объясняется, очевидно, повышенной погрешностью начальных данных в используемом экспериментальном наборе или какими-то атмосферными аномалиями, имевшими место во время эксперимента.

### Выводы

Разработаны адаптивный и неадаптивный алгоритмы оценки градиента температуры по высоте атмосферы, которые могут быть использованы для оперативной подстройки штатного алгоритмического обеспечения СВС. Особенность предлагаемого подхода заключается в том, что градиент температуры определяется по текущим измерениям атмосферного давления и температуры, а не высоты и температуры. Реализация алгоритмов не требует какой-либо модернизации аппаратной части СВС, необходимо только некоторое дополнение алгоритмического обеспечения системы.

### Литература

1. Панферов, В.И. *Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы: учеб. пособие: в 3 ч.* / В.И. Панферов, Н.А. Тренин, А.М. Хаяутин. – Челябинск: филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – Ч. I. – 145 с.
2. Козицин, В.К. *Система воздушных сигналов вертолета на основе свободно ориентированного приемника давлений: автореф. ... дис. канд. техн. наук* / В.К. Козицин. – Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2006. – 23 с.
3. Василюк, Н.Н. *Повышение точности ракетного барометрического высотомера с учётом аэродинамики и итогов радиолокационных наблюдений в лётных экспериментах: автореф. ... дис. канд. физ-мат. наук* / Н.Н. Василюк. – М.: Физтех-полиграф, 2004. – 23 с.

4. Солдаткин, В.В. Алгоритмы формирования и обработки информации системы воздушных сигналов вертолета на основе неподвижного многофункционального аэрометрического приемника / В.В. Солдаткин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 3 (299). – С. 110–120.

5. Крылов, Д.Л. Функциональная схема, алгоритмы обработки информации и погрешности системы воздушных сигналов самолета с неподвижными невыступающими приемниками потока / Д.Л. Крылов, В.М. Солдаткин // *Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф.* – Казань: Изд-во Академии наук Республики Татарстан. – 2016. – С. 570–574.

6. Алгоритмическое обеспечение системы воздушных сигналов одновинтового вертолета с неподвижным аэрометрическим приемником на характерных режимах эксплуатации / В.В. Солдаткин, И.Ф. Мингазов, А.Р. Мустафин, Д.Н. Нурутдинова // *Труды Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии»*. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН. – 2018. – С. 881–885.

7. Ефремова, Е.С. Алгоритмическое обеспечение вихревой системы воздушных сигналов дозвукового самолета / Е.С. Ефремова // *Труды Международной научно-техн. конф. «Перспективные информационные технологии»*. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН. – 2018. – С. 812–816.

8. Солдаткин, В.В. Автоматическая подстройка измерительных каналов системы воздушных сигналов вертолета / В.В. Солдаткин // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. – 2004. – № 2. – С. 26–29.

9. Kaletka, J. Evaluation of the Helicopter Low Airspeed System Lassie / J. Kaletka // *Journal of American Helicopter Society*. – 1983. – No. 4. – P. 35–43. DOI: 10.4050/JAHS.28.35

10. Leishman J.G. Aerodynamic Interactions Between a Rotor and a Fuselage in Forward Flight / J.G. Leishman, B.I. Naipei // *J.Amer. Helicopter. Soc.* – 1990. – Vol. 35, no. 3. – P. 22–31. DOI: 10.4050/JAHS.35.22

11. Растрюгин, Л.А. Современные принципы управления сложными объектами / Л.А. Растрюгин. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.

12. Панферов, В.И. Об адаптации системы управления температурным режимом протяженных термоагрегатов / В.И. Панферов, Г.П. Кулаченков // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1990. – № 10. – С. 72.

13. Identifying linear models from time domain simulations / J.J. Sanchez-Gasca, K. Clark, N.W. Miller et al. // *IEEE Computer Applications in Power*. – Apr. 1997. – Vol. 10, no. 2. – P. 26–30. DOI: 10.1109/67.582448

14. Hemerly, E.E. PC-based packages for identification, optimization, and adaptive control / E.E. Hemerly // *IEEE Control Systems Magazine*. – Feb. 1991. – Vol. 11, iss. 2. – P. 37–43. DOI: 10.1109/37.67674

15. Ракетные исследования атмосферы / П.П. Алексеев, Е.А. Бесядовский, Г.И. Гольшев и др. // *Метеорология и гидрология*. – 1957. – № 8. – С. 3–13.

16. Салыга, В.И. Идентификация и управление процессами в черной металлургии / В.И. Салыга, Н.Н. Карабуртов. – М.: Металлургия, 1986. – 192 с.

**Панферов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске; профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

**Тренин Николай Александрович**, канд. воен. наук, начальник 13 кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

**Панферов Сергей Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; panferovsv@susu.ru.

**Хаютин Андрей Михайлович**, канд. техн. наук, заместитель начальника 13 кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

**Пауков Дмитрий Викторович**, преподаватель 13 кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

**Халдин Константин Сергеевич**, канд. техн. наук, программист, Targem Games, центр разработки компьютерных игр, г. Екатеринбург; lar3811@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 4 ноября 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr200106

## TO THE SOLUTION OF THE PROBLEM ON THE DETERMINATION OF BAROMETRIC HEIGHT OF THE AIRCRAFT SYSTEM OF AIR SIGNALS

*V.I. Panferov<sup>1, 2</sup>, tgsiv@mail.ru,*

*N.A. Trenin<sup>1</sup>,*

*S.V. Panferov<sup>2</sup>, panferovsv@susu.ru,*

*A.M. Hayutin<sup>1</sup>,*

*D.V. Paukov<sup>1</sup>,*

*K.S. Haldin<sup>3</sup>, lar3811@yandex.ru*

<sup>1</sup> *Russian Air Force Military Educational and Scientific Center "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin", Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation,*

<sup>2</sup> *South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,*

<sup>3</sup> *Targem Games, Computer Games Development Center, Ekaterinburg, Russian Federation*

**Introduction.** In conditions of increasing requirements for the accuracy of determining the altitude and speed parameters of aircraft, the task of tuning up the algorithmic support of their air signal systems (SHS) based on real flight data is quite relevant. **Aim.** Consider the task of assessing the real value of the temperature gradient along the height of the atmosphere for the purpose of operational adjustment of the standard algorithmic support of SHS. **Materials and methods.** The traditional approach is to use the numerical value of the temperature gradient, adopted for the international standard atmosphere (ISA). A feature of the proposed approach is that the temperature gradient in height is determined by current measurements of atmospheric pressure and temperature, and not height and temperature. **Results.** Adaptive and non-adaptive parametric identification algorithms are developed. An improved version of the adaptive algorithm is proposed, which ensures proper tuning of its filtering properties to a specific statistical situation. Algorithms were tested both according to the characteristics of the ISA using computer-generated random interference, and according to the results of real measurements known in the literature obtained using a meteorological rocket. The properties of adaptive and non-adaptive algorithms are compared. It is shown that repeated "running" of the same experimental data through an adaptive algorithm leads to almost the same accuracy of the gradient

estimate, as when using a non-adaptive algorithm. **Conclusion.** The implementation of the algorithms improves the accuracy of determining the barometric altitude of the aircraft (AC), does not require any modernization of the hardware of the SHS, only some addition of the algorithmic support of the system is necessary. The adaptive algorithm is recommended for use in the case of a significant drift of atmospheric characteristics for the operational adjustment of the system.

*Keywords:* barometric altitude, air signal system, temperature gradient, identification algorithms, experimental data, filtering properties.

## References

1. Panferov V.I., Trenin N.A., Hayutin A.M. *Aviatsionnyye pribory i pilotazhno-navigatsionnyye komplekсы: uchebnoye posobiye: v 3 ch. Ch. I.* [Aircraft Instruments and Flight-Navigation Complexes: A Manual: at 3 Parts. Part. I.]. Chelyabinsk, Branch of VUZS VVS Air Force Publ., 2018, 145 p.
2. Kozitsin V.K. *Sistema vozdushnykh signalov vertoleta na osnove svobodno oriyentirovannogo priyemnika davleniy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Helicopter Air Signal System Based on Freely Oriented Pressure Receiver. Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Kazan, KSTU Publ., 2006, 23 p.
3. Vasilyuk N.N. *Povysheniye tochnosti raketnogo barometricheskogo vysotomera s uchetom aerodinamiki i itogov radiolokatsionnykh nablyudeniy v letnykh eksperimentakh: avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Improving the Accuracy of the Rocket Aerometric Altimeter, Taking into Account Aerodynamics and the Results of Radar Observations in Flight Experiments. Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Moscow, Fiztekhn-Polygraph Publ., 2004, 23 p.
4. Soldatkin V.V. [Algorithms for the Formation and Processing of Information System Helicopter Air Signals Based on a Fixed Multi-functional Aerometric Receiver]. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2013, no. 3 (299), pp. 110–120. (in Russ.)
5. Krylov D.L. [Functional Diagram, Information Processing Algorithms and Errors of the Aircraft's Air Signal System with Fixed, Non-Protruding Flow Receivers]. *Novyye tekhnologii, materialy i oborudovaniye rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli: sb. dokl. Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf.* [New Technologies, Materials and Equipment of the Russian Aerospace Industry: Sat. Report All-Russian Scientific and Practical. Conf.]. Kazan, 2016, pp. 570–574. (in Russ.)
6. Soldatkin V.V. [Algorithmic Support of the Airborne Signal System of a Single-Rotor Helicopter with a Fixed Aerometric Receiver at Characteristic Operating Conditions]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhn. konf. "Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii"* [Proceedings of the International Scientific and Technical. Conf. "Perspective Information Technologies"]. Samara, 2018, pp. 881– 885. (in Russ.)
7. Efremova E.S. [Algorithmic Support of the Vortex System of Air Signals Subsonic Aircraft]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. "Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii"* [Proceedings of the International Scientific and Technical. Conf. "Perspective Information Technologies"]. Samara, 2018, pp. 812– 816. (in Russ.)
8. Soldatkin V.V. [Automatic Adjustment of the Measuring Channels of the Helicopter Air Signal System]. *Bulletin of KSTU*, 2004, no. 2, pp. 26–29. (in Russ.)
9. Kaletka J. Evaluation of the Helicopter Low Airspeed System Lassie. *Journal of American Helicopter Society*, 1983, no. 4, pp. 35–43. DOI: 10.4050/JAHS.28.35
10. Leishman J.G., Naipai B.I. Aerodynamic Interactions Between a Rotor and a Fuselage in Forward Flight. *J. Amer. Helicopter. Soc.*, 1990, vol. 35, no. 3, pp. 22–31. DOI: 10.4050/JAHS.35.22
11. Rastrigin L.A. *Sovremennyye printsipy upravleniya slozhnymi ob'yektami* [Modern Principles of Control of Complex Objects]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1980, 300 p.
12. Panferov V.I. [On the Adaptation of the Temperature Control System of the Continuous Thermoaggregates]. *News of Higher Education Institutions. Ferrous Metallurgy*, 1990, no. 10, p. 72.
13. Sanchez-Gasca J.J., Clark K., Miller N.W., Okamoto H., Kurita A., Chow J.H. Identifying Linear Models from Time Domain Simulations. *IEEE Computer Applications in Power*, Apr. 1997, vol. 10, no. 2, pp. 26–30. DOI: 10.1109/67.582448
14. Hemerly E.E. PC-Based Packages for Identification, Optimization and Adaptive Control. *IEEE Control Systems Magazine*, Feb. 1991, vol. 11, iss. 2, pp. 37–43. DOI: 10.1109/37.67674

15. Alekseev P.P., Besyadovsky E.A., Golyshev G.I., Izakov M.N., Kasatkin A.M., Kokin G.A., Livshits N.S., Masanova N.D., Shvidkovsky E.G. [Rocket Atmospheric Research]. *Meteorology and Hydrology*, 1957, no. 8, pp. 3–13. (in Russ.)

16. Salyga V.I., Karabutov N.N. *Identifikatsiya i upravleniye protsessami v chernoy metallurgii* [Identification and Control of Processes in the Steel Industry]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986, 192 p.

*Received 4 November 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

К настройке алгоритма вычисления барометрической высоты летательного аппарата системой воздушных сигналов / В.И. Панферов, Н.А. Тренин, С.В. Панферов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 60–70. DOI: 10.14529/ctcr200106

### FOR CITATION

Panferov V.I., Trenin N.A., Panferov S.V., Hayutin A.M., Paukov D.V., Haldin K.S. To the Solution of the Problem on the Determination of Barometric Height of the Aircraft System of Air Signals. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 60–70. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200106

## SPECTRUM TRANSFORMATION OF AN AMPLITUDE-MODULATED SIGNAL ON AN OHMIC NONLINEAR ELEMENT

*B.B. Saidov*<sup>1, 2</sup>, *matem.1994@mail.ru*,

*V.I. Tambovtsev*<sup>1</sup>, *tamboval@mail.ru*,

*I.I. Prokopov*<sup>1</sup>, *Prokopovii@susu.ru*

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

**Introduction.** In many physical processes, the spectrum of the modulated signal is transferred to the low-frequency region, which also manifests itself in active dielectrics in radio sound. In the general case, the analysis of the spectrum transformation process is a very difficult task related with solving a system of nonlinear differential equations. And in the accepted form, the principle of superposition is not applicable here, since the parameters of the output signal cannot be determined by algebraic summation of the signals received separately from each source. The spectrum of an input amplitude-modulated signal is nonlinearly related to the spectrum at the output. **Aim.** The conversion of the current spectrum under supplying an amplitude-modulated voltage to an active non-linear element with a non-linear current-voltage characteristic is considered. **Materials and methods.** In the analysis of the spectral transformation, a power approximation of the current-voltage characteristic in the form of a polynomial of the third degree with trigonometric functions is used. In the examples, spectrum transformations for a mono signal, amplitude-modulated signal, and beats are considered. Application of amplitude modulation methods is essential for transferring the spectrum of the signal to the low frequency region. **Results.** A graphical representation of the dependence of the current function on time for an AM signal and beats, as well as their spectral representation, is given. **Conclusion.** The paper analyzes the transformation of the signal spectrum for the current when applying any, but amplitude-modulated voltage on the ohmic nonlinear element. The carrier signal is represented as a harmonic trigonometric function of the cosine of the current time. However, signal spectrum conversion has not related with detection.

*Keywords:* nonlinear element, current-voltage characteristic, amplitude modulation, beats.

### Introduction

In many physical processes, the spectrum of the modulated signal is transferred to the low-frequency region, for example, in the occurrence of radio sound in active dielectrics [1] or the appearance of an acoustic signal at the beats frequency during the interaction of signals from two ultrasonic sources [2]. In the general case, the analysis of the spectrum transformation process is a very difficult task related to solving a system of nonlinear differential equations. And in this case, the principle of superposition is not applicable. Nevertheless, research and analysis can be carried out using relatively simple methods if the form of the current-voltage characteristic (CVC) for a nonlinear element (NE) in the dynamic mode is the same as for a constant voltage (or in static mode). Such a NE is called a resistive inertialess element [3, 4]. Physically inertialess NE means the appearance of a response in the form of a function of time from the current  $i(t)$  after the input action as a function of time from the voltage  $u(t)$ . Formally, there are practically not inertialess NE. At the same time, many modern circuit elements are perfect in their frequency parameters and can be idealized from the point of view of their inertialess. Such elements are called not only resistive, but also active or ohmic [5].

In order to effectively transmit signals in any environ, it is necessary to transfer the spectrum of these signals from the low-frequency region to the region of sufficiently high frequencies. This procedure is

called modulation in communication technology. The frequency  $\omega$  for the physical information carrier is selected taking into account the peculiarities of the propagation of oscillations in communication lines or in the environ of radio communication. But in any case, the frequency  $\omega$  is much higher than the highest frequency  $\Omega$  of the primary signal, which performs modulation [5, 6].

Under these conditions, the parameters of the modulated oscillation change slowly compared to the rate of change of the carrier oscillation. In one period of the modulating signal  $T_F = 1/F = 2\pi/\Omega$  usually contain hundreds, thousands and more periods of high-frequency oscillations. Consequently, during several periods of the last  $T_f = 1/f = 2\pi/\omega$ , only slight changes in the parameters of the modulating signal occurs [7, 8].

## 1. The concept of current-voltage characteristics (CVC)

CVC – a special case of the transfer characteristics that determine the dependence (function) of the output quantity on the input for a given specific device or circuit. CVC is a graph of the current through a two-terminal circuit versus the voltage at this two-terminal circuit. CVC characteristic describes the behavior of a two-terminal circuit in static mode. Most often, the analysis of nonlinear elements by CVC degree of nonlinearity, which is determined by the coefficient of nonlinearity  $K = \frac{U dI}{I dU}$ . For linear elements, CVC is a straight line and is not of particular interest [7, 8].

While analyzing the spectral transformation under the influence of harmonic voltage, for example, a power-law approximation in the form of a polynomial with trigonometric functions is used:

$$i(t) = b_0 + b_1 U_m \cos \omega t + b_2 U_m^2 \cos^2 \omega t + b_3 U_m^3 \cos^3 \omega t, \quad (1)$$

where we limit ourselves to a polynomial of the third degree. Here  $b_i$  – dimensional parameters;  $b_0$  – constant component is not of interest in the work.

### Example 1.

1. If  $t = 0$  c,  $R = 1$  Ohm, then based on Ohm's law from (1) we obtain:

$$I = U, \quad (2)$$

where CVC (and below in the example) is represented in **dimensionless form**.

2. If  $b_1 = 1, b_2 = 0, b_3 = 1$  of (1) we get:

$$I_1 = U + U^3. \quad (3)$$

3. If  $b_1 = 1, b_2 = 0,5, b_3 = 1$  of (1) we get:

$$I_2 = U + 0,5U^2 + U^3. \quad (4)$$

4. If  $b_1 = 1, b_2 = 1, b_3 = 1$  of (1) we get:

$$I_3 = U + U^2 + U^3. \quad (5)$$

5. If  $b_1 = 1, b_2 = 2, b_3 = 1$  of (1) we get:

$$I_4 = U + 2U^2 + U^3. \quad (6)$$

CVC for **example 1** in dimensionless form are presented in Fig. 1.

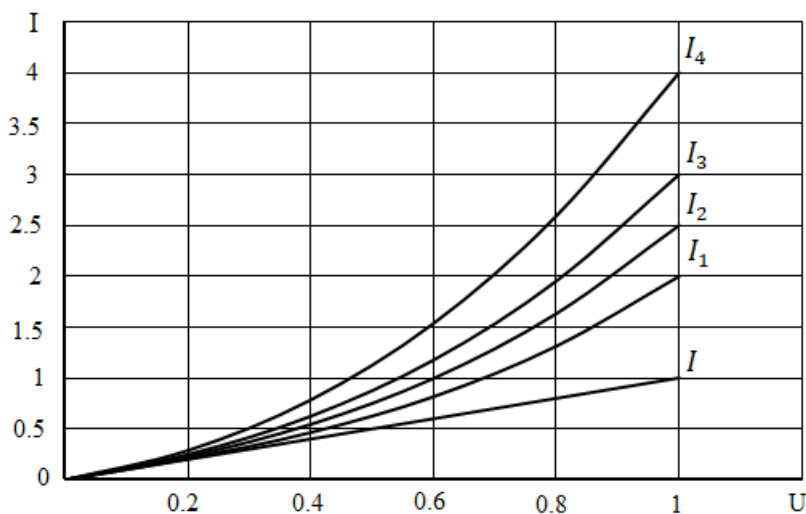


Fig. 1. Dimensionless form of CVC for example 1



## 2. Spectrum transformation for a mono signal

Consider the analysis of an example of a current spectrum under supplying a harmonic voltage. When the element is linear, then receive harmonic current (one component). When the element is non-linear, then receive a lot of components [6].

For the spectrum concept, it is important to find the amplitude spectral components and initial phases. The frequencies of all components will be multiples of the fundamental frequency or the frequency of exposure [7–12].

The best choice of approximation method depends on the type of nonlinear characteristic, as well as on the mode of operation of the nonlinear element. One of the most common methods is power polynomial approximation [13–15].

In the analysis of the spectral transformation under the influence of harmonic voltage, for example, a power approximation in the form of a polynomial with trigonometric functions is used:

$$i(t) = b_0 + b_1 U_m \cos \omega t + b_2 U_m^2 \cos^2 \omega t + b_3 U_m^3 \cos^3 \omega t + \dots + b_n U_m^n \cos^n \omega t, \quad (7)$$

where  $U_m$  [V] – voltage amplitude;  $b_0$  [A] – constant current component;  $b_1$  [ $\text{Ohm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ ],  $b_2$  [ $\text{Ohm}^{-2} \cdot \text{V}^{-2}$ ]... – dimensional coefficients.

When using the cosines of all the initial phase is zero. In this paper, we mainly limit ourselves to the polynomial of the third degree (1).

### Example 2.

Given:  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = 0$ ,  $b_3 = 1$ ,  $U_m = 1$ . Determine the current.

Solution. If  $b_2 = 0$ , then applying the degree reduction formula

$$\cos^3 \omega t = \frac{\cos 3\omega t + 3 \cos \omega t}{4}$$

From (1) we get the expression for current:

$$i(t) = \left( \frac{3b_3 U_m^3}{4} + b_1 U_m \right) \cos \omega t + \frac{b_3 U_m^3}{4} \cos 3\omega t. \quad (8)$$

The result is shown in Fig. 2.

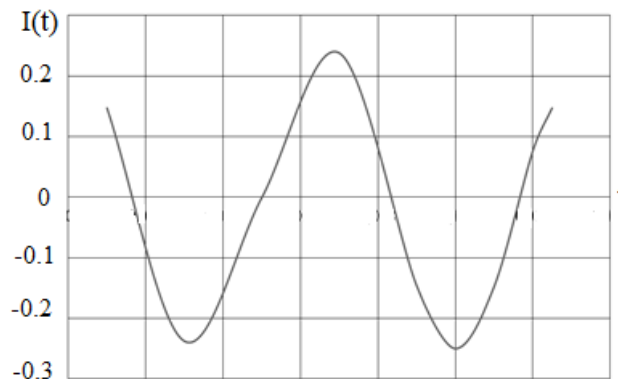


Fig. 2. Current function versus time for example 2

## 3. Spectrum transformation for amplitude-modulated signal

Under AM, the spectrum of the modulating signal is transmitted to the region of the carrier frequency, forming the upper and lower side components of the spectrum. Since such a transformation creates new frequencies, the modulation procedure is a nonlinear transformation. But since the AM spectrum of the modulating signal does not change, but is transmitted only to the high-frequency region, AM is considered a type of linear modulation. In many cases, the spectrum of the AM signal is relatively simple and can be determined from the spectrum of the modulating signal, which is noticeably simpler than its direct calculation. The basic relationships required for this can be relatively easily obtained using the example of the AM signal when the AM signal is performed by a harmonic signal [9–13].

Carrier frequency, frequency of harmonic oscillations subjected to modulation by signals for transmitting information. Low-frequency oscillations are sometimes called carrier oscillations. The oscillations with the LF themselves do not contain information, they only “carry” it. The spectrum of modulated oscillations contains, in addition to low frequencies, side frequencies, which contain the transmitted information [4].

Every modulated oscillation is non-sinusoidal and has a complex spectrum. Consider an amplitude-modulated signal in the simplest case where the modulating function represents a sinusoidal character. The voltage acting on the NE:

$$u(t) = U \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} U (\cos(\omega_0 + \Omega) t + \cos(\omega_0 - \Omega) t), \quad (9)$$

where  $U$  – is the amplitude;  $m$  – is the modulation depth;  $\omega_0$  – is the carrier frequency;  $\Omega$  – is the modulation frequency.

We apply by analogy the substitution  $u(t)$  in (1). The analysis of the validity of this formal substitution is not discussed in the work, but in the field of LF is not in doubt. So, we get:

$$\begin{aligned} i(t) = & b_1 \left( U \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} U (\cos(\omega_0 + \Omega) t + \cos(\omega_0 - \Omega) t) \right) + \\ & + b_2 \left( U \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} U (\cos(\omega_0 + \Omega) t + \cos(\omega_0 - \Omega) t) \right)^2 + \\ & + b_3 \left( U \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} U (\cos(\omega_0 + \Omega) t + \cos(\omega_0 - \Omega) t) \right)^3. \end{aligned} \quad (10)$$

Next, we use the following formulas to reduce the degrees:

$$\cos^2 \omega t = \frac{\cos 2\omega t + 1}{2}, \quad (11)$$

$$\cos^3 \omega t = \frac{\cos 3\omega t + 3 \cos \omega t}{4}. \quad (12)$$

For current  $i(t)$  because of substitution, we obtain:

$$\begin{aligned} i(t) = & \frac{1}{2} b_2 U^2 + \frac{m^2}{4} b_2 U^2 + m b_2 U^2 \cos \Omega t + \frac{m^2}{4} b_2 U^2 \cos 2\Omega t + \\ & + \left( \frac{m}{2} b_1 U + \frac{9m}{8} b_3 U^3 + \frac{9m^3}{32} b_3 U^3 \right) \cos(\omega_0 - \Omega) t + \left( b_1 U + \frac{3}{4} b_3 U^3 + \frac{9m^2}{8} b_3 U^3 \right) \cos \omega_0 t + \\ & + \left( \frac{m}{2} b_1 U + \frac{9m}{8} b_3 U^3 + \frac{9m^3}{32} b_3 U^3 \right) \cos(\omega_0 + \Omega) t + \frac{9m^2}{16} b_3 U^3 \cos(\omega_0 - 2\Omega) t \dots \end{aligned} \quad (13)$$

Here and below, the low-frequency components of the spectrum are of interest.

**Example 3.** Given:  $m = 1$ ,  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = 1$ ,  $b_3 = 1$ ,  $U = 1$ . Determine the low frequency current.

Solution. From (13) we get the current LF:

$$\text{LF: } i(t) = \frac{1}{2} b_2 U^2 + \frac{m^2}{4} b_2 U^2 + m b_2 U^2 \cos \Omega t + \frac{m^2}{4} b_2 U^2 \cos 2\Omega t. \quad (14)$$

There is a constant component and there are two harmonics. For Fig. 3 and 4 the results are presented as reamers of the signal and its spectrum.

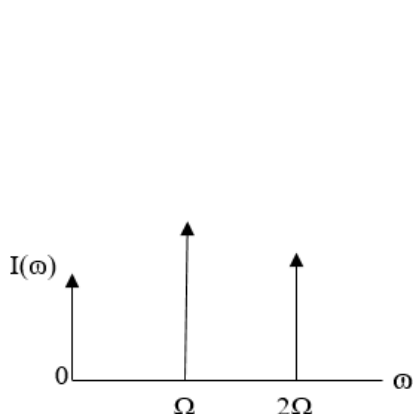


Fig. 3. The spectrum of the signal with amplitude modulation for example 3

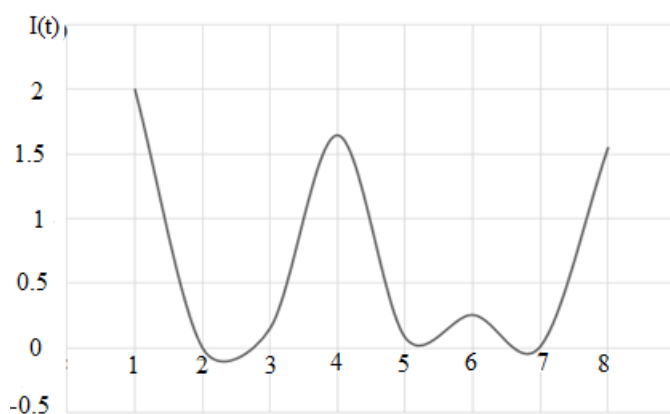


Fig. 4. The dependence of the function of current on time for example 3

**Example 4.** In the dimensionless form, it is given:  $m = 1$ ,  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = 0$ ,  $b_3 = 1$ ,  $U = 1$ . Determine the low frequency current.

Solution. If  $b_2 = 0$ , then (14) results in the absence of a low-frequency current and a constant component.

#### 4. Beat Spectrum transformation

Beats occur due to the fact that one of the two signals is linear in time lags the other in phase, and at those moments when the oscillations coincide in phase, the total signal is the maximum, and at those moments when the two signals are not in phase, they mutually suppress each other. These moments periodically replace each other as the lag increases [4].

If at the same time two tuning-forks with slightly different frequencies are slightly excited, the resulting sound periodically oscillates and decays. These modulations are called beats; their frequency is equal to the difference in frequency of the initial tones. Beats are obtained when electrical signals from the outputs of two generators are mixed and fed to the speaker. On the other hand, these same signals can be simultaneously applied to two different dynamics and also hear beats [5].

Beats relate to amplitude modulation, but without a carrier frequency. Consider the addition of two high-frequency oscillations:

$$u = u_1 + u_2 = U_1 \cos(\omega - \Omega)t + U_2 \cos(\omega + \Omega)t, \quad (15)$$

where the difference frequency  $\Delta\omega = 2\Omega$ .

To analyze the spectral transformation of beats we write an approximating power polynomial with trigonometric cosine functions in the form:

$$i(t) = b_1(U_1 \cos(\omega_0 - \Omega)t + U_1 \cos(\omega_0 + \Omega)t) + b_2(U_1 \cos(\omega_0 - \Omega)t + U_1 \cos(\omega_0 + \Omega)t)^2 + b_3(U_1 \cos(\omega_0 - \Omega)t + U_1 \cos(\omega_0 + \Omega)t)^3. \quad (16)$$

We use the formulas for lowering the degrees (11) and (12) below to transform. We obtain

$$i(t) = \frac{1}{2}b_2U_1^2 + \frac{1}{2}b_2U_2^2 + b_2U_1U_2 \cos 2\Omega t + \left(b_1U_1 + \frac{3}{4}b_3U_1^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right) \cos(\omega - \Omega)t + \left(b_1U_2 + \frac{3}{4}b_3U_2^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right) \cos(\omega + \Omega)t + b_2U_1U_2 \cos 2\omega t + \frac{1}{2}b_2U_1^2 \cos 2(\omega - \Omega)t + \frac{1}{2}b_2U_2^2 \cos 2(\omega + \Omega)t + \dots \quad (17)$$

In Fig. 5 and 6 shows the results in the form of a sweep of the signal and its spectrum.

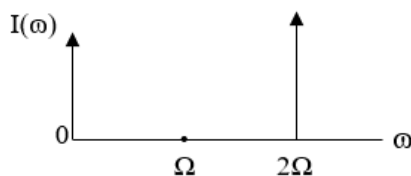


Fig. 5. Low-frequency spectrum for beats: constant component and frequency  $2\Omega$

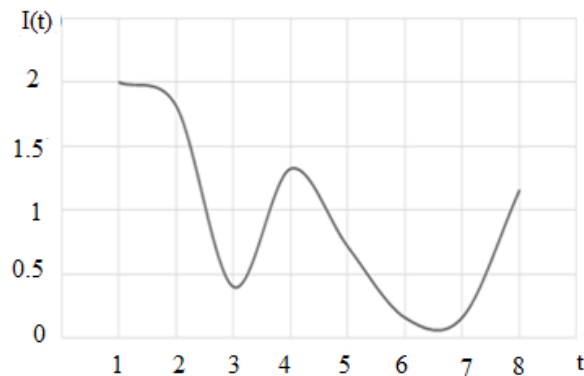


Fig. 6. The dependence of the LF current on time for beats

If we substitute  $b_2 = 0$ , in polynomial (17), then we obtain for the current:

$$i(t) = \left(b_1U_2 + \frac{3}{4}b_3U_2^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right) \cos(\omega - \Omega)t + \left(b_1U_2 + \frac{3}{4}b_3U_2^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right) \cos(\omega + \Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2 \cos(\omega - 3\Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2 \cos(\omega + 3\Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2 \cos(3\omega - \Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2 \cos(3\omega + \Omega)t + \frac{1}{4}b_3U_1^3 \cos 3(\omega - \Omega)t + \frac{1}{4}b_3U_1^3 \cos 3(\omega + \Omega)t. \quad (18)$$

There are no low frequencies and no constant component in this polynomial.

#### Conclusion

The transformation for the current spectrum under supplying a modulated voltage to an ohmic non-linear element is considered. Transformation for any type of amplitude modulation to the low-frequency

region is observed when there is a quadratic nonlinearity of the CVC. Similar transformations can be observed in active dielectrics, for example, in piezoceramics. In the presented examples, the transformation process has nothing to do with signal detection.

### References

1. Zheleznyak I.L., Fedoseev S.Y., Tambovtsev V.I. [Transformation of Modulated Radio Signal in Active Dielectric]. *Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"* (RLNC\*2019) [Proc. of XXV International Scientific and Technical Conference "Radar, Navigation, Communication"]. Voronezh, 2019, vol. 5, pp. 433–436. (in Russ.)
2. Asyaev G.D., Bagaev V.N., Saidov B.B. [Ultrasound in Office Communications: Service Channels and Dictation Recorder Suppression]. *Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"* (RLNC\*2019) [Proc. of XXV International Scientific and Technical Conference "Radar, Navigation, Communication"]. Voronezh, 2019, vol. 5, pp. 207–211. (in Russ.)
3. Lanskih A.M. *Elektrotehnika i elektronika: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Electrical and Electronics: Textbook for Universities]. Kirov, VyatSU Publ., 2012, 678 p.
4. Saidov B.B., Slednev I.S., Tambovtsev V.I. [Transformations of the Signal Spectrum in an Active Nonlinear Element with a Cubic Characteristic]. *Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz"* (RLNC\*2019) [Proc. of XXV International Scientific and Technical Conference "Radar, Navigation, Communication"]. Voronezh, 2019, vol. 6, pp. 1–6. (in Russ.)
5. Andreev V.S. *Teoriya nelineynykh elektricheskikh tsepey* [Theory of Nonlinear Electrical Circuits: Textbook for Universities]. Moscow, Radio and communication Publ., 1982, 280 p.
6. Deutsch Ralph. *Nonlinear Transformations of Random Processes*, Courier Dover Publications, 2017, 176 p.
7. Gonorovskiy I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio Circuits and Signals]. Moscow, Radio Publ., 1977, 608 p.
8. Akhmediev N.N., Korneev V.I., Mitskevich N.V. N-Modulation Signals in a Single-Mode Optical Waveguide under Nonlinear Conditions. *Sov. Phys. JETP*, 1988, 67 (1), pp. 89–95.
9. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering: Textbook for Universities]. Moscow, Higher School Publ., 1996, 638 p.
10. Apushkinsky E.G. [Nonlinear Transformations of the Spectra of Signals]. *Scientific and Technical Statements of the St. Petersburg State Polytechnic University. Physics and Mathematics*, 2012, vol. 3, pp. 182–190. (in Russ.)
11. Bateman A., Haines D.M., Wilkinson R.J. Direct Conversion Linear Transceiver Design. *IEE 5th Int. Conf. on Mobile Radio and Personal Com.*, Warwick, UK, 1989, pp. 53–56.
12. Atabekov G.I. *Teoriya lineynykh elektricheskikh tsepey* [Theory of Linear Electrical Circuits]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1960, 713 p.
13. Tzfat Yosef, Le Zion Rishon. System and Method for Using Ultrasonic Communication. Patent No.: US 8,854,985 B2, No. 61/428,907, filed on Dec. 31, 2010, Publication Data Oct. 7, 2014.
14. Maltsev S.V., Bogush R.P. [Formation of Nonlinear Binary Sequences with an Extended Ensemble]. *Radio Engineering*, 2001, no. 11, pp. 52–53. (in Russ.)
15. Vernigorov N.S. [The Process of Nonlinear Transformation and Scattering of the Electromagnetic Field by Electrically Nonlinear]. *Radio Engineering and Electronics*, 1997, no. 10, pp. 1181–1185. (in Russ.)

Received 4 September 2019

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СПЕКТРА АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА НА ОМИЧЕСКОМ НЕЛИНЕЙНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

Б.Б. Саидов<sup>1,2</sup>, В.И. Тамбовцев<sup>1</sup>, И.И. Прокопов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,  
г. Душанбе, Республика Таджикистан

**Введение.** Во многих физических процессах наблюдается перенос спектра модулированного сигнала в низкочастотную область, что проявляется и в активных диэлектриках при радиозвуке. В общем случае анализ процесса преобразования спектра является очень сложной задачей, связанной с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений. И в принятой форме принцип суперпозиции здесь не применим, поскольку параметры выходного сигнала не могут быть определены алгебраическим суммированием сигналов, получаемых отдельно от каждого источника. Спектр входного амплитудно-модулированного сигнала нелинейным образом связан со спектром на выходе. **Цель исследования.** Рассматривается преобразование спектра тока при подаче амплитудно-модулированного напряжения на активный нелинейный элемент с нелинейной вольтамперной характеристикой. **Материалы и методы.** В анализе спектрального преобразования применяется степенная аппроксимация вольтамперной характеристики в виде полинома третьей степени с тригонометрическими функциями. В примерах рассматриваются преобразования спектра для моносигнала, амплитудно-модулированного сигнала и биений. Применение амплитудных методов модуляции необходимо для переноса спектра сигнала в область низких частот. **Результаты.** Приводится графическое представление зависимости функции тока от времени для амплитудно-модулированного сигнала и биений, а также их спектрального представления. **Заключение.** В работе анализируется преобразование спектра сигнала для тока при подаче амплитудно-модулированного напряжения на омическом нелинейном элементе. Несущий сигнал представлен в виде гармонических тригонометрических функций косинуса текущего времени. Однако преобразование спектра сигнала никак не связано с детектированием.

*Ключевые слова:* нелинейный элемент, вольтамперная характеристика, амплитудная модуляция, биения.

### Литература

1. Железняк, И.Л. Преобразование модулированного радиосигнала в активном диэлектрике / И.Л. Железняк, С.Ю. Федосеев, В.И. Тамбовцев // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2019). – Воронеж, 2019 – Т. 5. – С. 433–436.
2. Асяев, Г.Д. Ультразвук в офисной связи: служебные каналы и подавление диктофонов / Г.Д. Асяев, В.Н. Багаев, Б.Б. Саидов // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2019). – Воронеж, 2019 – Т. 5. – С. 207–211 с.
3. Ланских, А.М. Электротехника и электроника: учеб. пособие для вузов / А.М. Ланских. – Киров: ПРИП ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2012. – 678 с.
4. Саидов, Б.Б. Преобразования спектра сигнала в активном нелинейном элементе с кубической характеристикой / Б.Б. Саидов, И.С. Следнев, В.И. Тамбовцев // Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2019). – Воронеж, 2019 – Т. 6. – С. 1–6.
5. Андреев, В.С. Теория нелинейных электрических цепей: учеб. пособие для вузов / В.С. Андреев. – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.
6. Deutsch, Ralph. Nonlinear Transformations of Random Processes / Ralph Deutsch. – Courier Dover Publications, 2017 – 176 p.

7. Гоноровский, И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы* / И.С. Гоноровский. – М.: Радио, 2006. – 722 с.
8. Akhmediev, N.N. *N-modulation signals in a single-mode optical waveguide under nonlinear conditions* / N.N. Akhmediev, V.I. Korneev, N.V. Mitskevich // *Sov. Phys. JETP*. – 1988. – 67 (1). – P. 89–95.
9. Бессонов, Л.А. *Теоретические основы электротехники: учеб. пособие для вузов* / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
10. Апушкинский, Е.Г. *Нелинейные преобразования спектров сигналов* / Е.Г. Апушкинский // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. – 2012. – Т. 3. – С. 182–190 с.
11. Bateman, A. *Direct conversion linear transceiver design* / A. Bateman, D.M. Haines, R.J. Wilkinson // *IEE 5th Int. Conf. on Mobile Radio and Personal Com.* – Warwick, UK, 1989. – P. 53–56.
12. Атабеков, Г.И. *Теория линейных электрических цепей* / Г.И. Атабеков. – М.: Советское радио, 1960. – 713 с.
13. Patent No.: US 8,854,985 B2. *System and method for using ultrasonic communication* / Yosef Tzfat, Rishon Le Zion. – No. 61/428,907; filed on Dec. 31, 2010; Publication Data Oct. 7, 2014. – <https://patents.google.com/patent/US8854985B2/en>.
14. Мальцев, С.В. *Формирование нелинейных бинарных последовательностей с расширенным ансамблем* / С.В. Мальцев, Р.П. Бозуш // *Радиотехника*. – 2001. – № 11. – С. 52–53.
15. Вернигоров, Н.С. *Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами* / Н.С. Вернигоров // *Радиотехника и электроника*. – 1997. – № 10. – С. 1181–1185.

**Саидов Бехруз Бадридинович**, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан; [matem.1994@mail.ru](mailto:matem.1994@mail.ru).

**Тамбовцев Владимир Иванович**, д-р физ.-мат. наук, заслуженный изобретатель СССР, действующий член Нью-Йоркской академии наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [tamboval@mail.ru](mailto:tamboval@mail.ru)

**Прокопов Игорь Игоревич**, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [Prokopovii@susu.ru](mailto:Prokopovii@susu.ru).

*Поступила в редакцию 4 сентября 2019 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Saidov, B.B. Spectrum Transformation of an Amplitude-Modulated Signal on an Ohmic Nonlinear Element / B.B. Saidov, V.I. Tambovtsev, I.I. Prokopov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 71–78. DOI: 10.14529/ctcr200107

### FOR CITATION

Saidov B.B., Tambovtsev V.I., Prokopov I.I. Spectrum Transformation of an Amplitude-Modulated Signal on an Ohmic Nonlinear Element. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 71–78. DOI: 10.14529/ctcr200107

## АНАЛИЗ МЕЖПЕРИОДНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПАССИВНОЙ ГАУССОВОЙ ПОМЕХИ

И.Е. Чухломин<sup>1</sup>, Н.А. Файзулин<sup>1</sup>, В.В. Павлик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы», г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Челябинский государственный университет, г. Челябинск, Россия

**Введение.** Адаптивная обработка сигналов в присутствии помех является актуальной задачей для различных радиотехнических систем. Адаптация основана на оптимизации алгоритма обработки в зависимости от параметров помехи, при этом априорно независимые параметры помехи заменяются их оценками в соответствии с методологией адаптивного гауссового подхода. Оценка параметров помехи производится по классифицированной выборке, при этом предполагается стационарность помехи в пределах обучающего окна. **Цель исследования.** Провести анализ влияния нестационарности помехи на решающую статистику адаптивной межпериодной обработки. Определить зависимость оценки корреляционной матрицы помехи и решающей статистики от положения и интенсивности помехи в обучающем окне. Провести анализ влияния нестационарности помехи на уровень ложных тревог при межпериодной обработке с адаптацией к корреляционной матрице помехи. Выполнить оценку уровня ложных тревог при скачке помехи для последетекторной межпериодной обработки. **Материалы и методы.** Применение отношения Релея позволяет определить характер изменения решающей статистики межпериодной обработки. В качестве исходных данных используется модель скачкообразного изменения мощности помехи в обучающем окне. Исследуется изменение выборочной матрицы помехи при произвольном расположении скачка помехи и ее влияние на решающую статистику. **Результаты.** Получено общее выражение для относительного изменения решающей статистики и проведены расчеты для крайних положений помехи в окне. Определены пределы изменения решающей статистики, показано, что максимальное увеличение ее относительно стационарного уровня не превышает значения два, а минимальное уменьшение обратно пропорционально половинному значению скачка интенсивности помехи. Для случая последетекторной межпериодной обработки приведена численная оценка значений вероятности ложной тревоги. **Заключение.** Полученные результаты показывают, что относительное изменение решающей статистики пропорционально скачку интенсивности помехи и соответствующему изменению вероятности ложной тревоги и приводит к необходимости принятия мер по ее стабилизации.

*Ключевые слова:* межпериодная обработка, нестационарная пассивная помеха, вероятность ложной тревоги.

### Введение

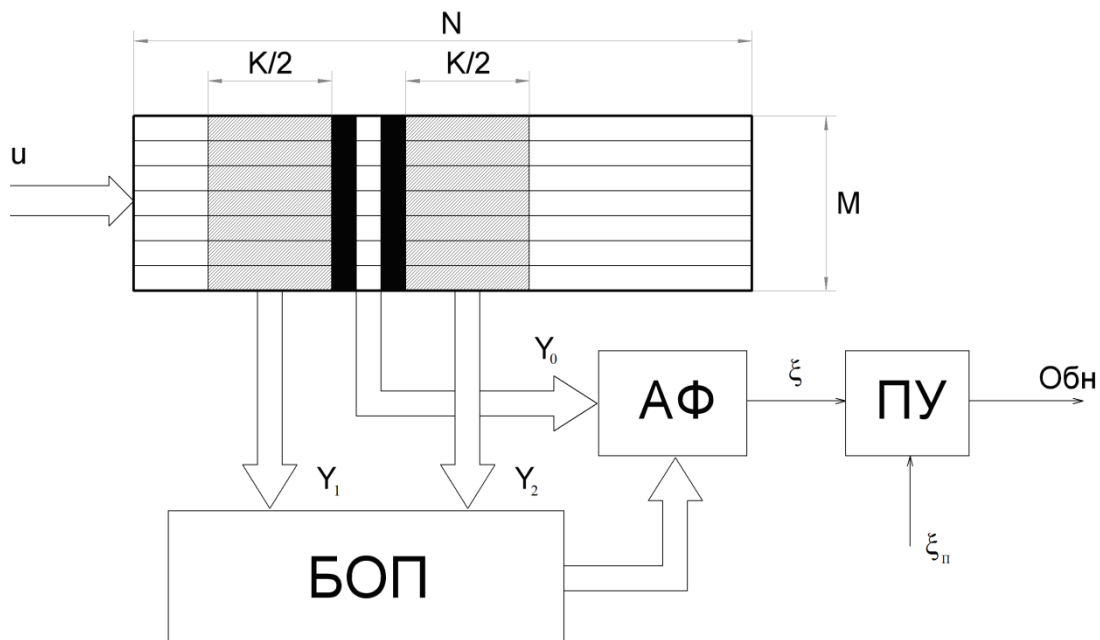
При обнаружении сигналов на фоне коррелированных пассивных помех межпериодная обработка (МПО) использует матричную фильтрацию исходных отсчетов. Матричный фильтр представляет собой фильтр с весовыми коэффициентами, определяемыми обратной корреляционной матрицей помехи [1–3]. Для адаптивной МПО в качестве оценки корреляционной матрицы помехи используется выборочная матрица, сформированная из обучающих векторов. Обучающие векторы располагаются на временных позициях, отстоящих симметрично относительно анализируемой позиции. Полученная матрица является оценкой максимального правдоподобия корреляционной матрицы общего вида [4].

Входное воздействие помехи часто стационарно только на ограниченном временном интервале. В связи с этим отсчеты обрабатываются в «скользящем» окне конечной протяженности. При анализе характеристик МПО, как правило, предполагается стационарность процесса в анализируемом окне и отмечается важнейшее достоинство адаптивных МПО – обеспечение постоянства вероятности ложной тревоги  $F$ . В то же время именно нестационарность процесса в «скользящем» окне вызывает изменение  $F$ . Так как выборочная матрица МПО формируется по отсчетам

этого окна, то представляет интерес анализ помехоустойчивости МПО при нестационарности помехи в «скользящем» окне.

## 1. Постановка задачи

Обобщенная структурная схема адаптивной МПО сигналов цели на фоне коррелированных протяженных пассивных помех приведена на рис. 1 [5].



**Рис. 1. Структурная схема адаптивной МПО:**

БОП – блок оценки параметров помехи; АФ – адаптивный фильтр; ПУ – пороговое устройство

**Fig. 1. Structural diagram of adaptive IPP (Interperiod processing):**

БОП (IPEU) – interference parameter estimation unit; АФ (AF) – adaptive filter; ПУ (TD) – threshold device

МПО производит обработку поступающих с периодом повторения  $T_{\Pi}$  в одном элементе дальности  $M$  цифровых отсчетов  $u_i$  пассивной помехи и собственного шума приемного устройства. Отсчеты  $u_i$  образуют в  $N$  элементах дальности  $M$ -мерный вектор-столбец  $\mathbf{u} = \{u_{ij}\}_{j=1}^M$  с корреляционной матрицей  $\Phi = \sigma_P^2 \cdot \{\rho_{ij}\} + \sigma_N^2 \cdot \mathbf{I}_M$ , где  $\sigma_P^2$  – дисперсия пассивной помехи,  $\{\rho_{ij}\}$  – матрица междупериодных коэффициентов корреляции,  $\sigma_N^2$  – дисперсия шума,  $\mathbf{I}_M$  – единичная диагональная матрица.

Заштрихованные области, изображенные на рис. 1, содержат  $K/2$  смежных пачек  $\mathbf{Y}_1 = \{y_i^{(1)}\}_{i=1}^{K/2}$ , предшествующих центральной  $\mathbf{Y}_0$ , и  $K/2$  смежных пачек  $\mathbf{Y}_2 = \{y_i^{(2)}\}_{i=1}^{K/2}$ , следующих за ней, образующих обучающую выборку объема  $K$ :

$$\mathbf{Y} = \{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2\} = \{y_i\}_{i=1}^K; \quad y_i = \{y_{ij}\}_{j=1}^M. \quad (1)$$

В результате обработки в блоке оценки параметров (БОП) формируется выборочная матрица

$$\hat{\Phi} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \sum_{i=1}^K \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H, \quad (2)$$

где  $\mathbf{Y}^H$  – эрмитово-сопряженная матрица.

Обратная матрица  $\hat{\Phi}^{-1}$  определяет коэффициенты адаптивного фильтра (АФ).



Образованная решающая статистика

$$\xi = \mathbf{Y}_0^H \cdot \hat{\Phi}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_0 \quad (3)$$

испытывается на порог  $\xi_{\text{П}}$  в пороговом устройстве (ПУ).

Затененные области, изображенные на рис. 1, представляют собой защитный интервал, который не участвует в вычислениях выборочной матрицы.

Помехой представлен коррелированный гауссовый сигнал с изменением интенсивности «кромка помехи», при этом размер объекта, являющегося источником пассивной помехи, превышает размер «скользящего» окна.

В общем случае скользящее окно является двумерным (по дальности и азимуту) и интенсивность помехи может изменяться в любом из этих измерений. При этом без учета собственного шума ввиду его малости по сравнению с помехой ( $\sigma_P^2 \gg \sigma_N^2$ ), что соответствует реальной ситуации, корреляционная матрица входного процесса МПО принимает вид  $\Phi = \sigma_P^2 \cdot \{ \rho_{ij} \}$ .

Для анализа используем следующие допущения:

а) корреляционная матрица  $\Phi$  известна;

б) объем  $K$  обучающей выборки достаточно велик и элементы  $\rho_{ij}$  корреляционной матрицы внешних воздействий  $\Phi$  и выборочной матрицы  $\hat{\Phi}$  равны между собой;

в) интенсивность  $\sigma_P^2$  помехи изменяется скачком в любом элементе дальности при постоянстве  $\rho_{ij}$ .

При принятых допущениях рассмотрим изменение решающей статистики  $\xi$  при отличии корреляционной матрицы  $\Phi_0$  процесса  $\mathbf{Y}_0$  от корреляционной матрицы  $\hat{\Phi}$ .

Это изменение можно вычислить через отношение Релея, которое в принятых обозначениях имеет вид

$$R = \frac{\mathbf{Y}_0^H \cdot \hat{\Phi}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_0}{\mathbf{Y}_0^H \cdot \Phi_0^{-1} \cdot \mathbf{Y}_0} \quad (4)$$

и представляет собой относительное изменение  $\xi$ , которое при известном законе распределения  $\xi$  можно пересчитать в значение вероятности ложной тревоги  $F$ .

## 2. Результаты анализа

Взаимное пространственное расположение «скользящего» окна и скачка помехи приведено на рис. 2.

Примем, что до скачка помехи имеется дисперсия помехи, равная  $\sigma_0^2$ , а после скачка дисперсия помехи равна  $\sigma_1^2 = \gamma \cdot \sigma_0^2$ . В соответствии с (2) и учетом принятых допущений выражение для  $\hat{\Phi}$  запишем в виде

$$\begin{aligned} \hat{\Phi} &= K^{-1} \cdot \left( \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{Y}_i^H + \sum_{i=n}^K \mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{Y}_i^H \right) = \\ &= K^{-1} \cdot \left( n \cdot [\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H]_0 + (n - K) \cdot [\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H]_1 \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $n$  – номер ячейки дальности относительно начала скользящего окна по дальности, на которой произошел скачек помехи;

$[\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H]_0 = \sigma_0^2 \cdot \{ \rho_{ij} \}$  – корреляционная матрица помехи до скачка;

$[\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H]_1 = \sigma_0^2 \cdot \{ W_{ij} \}$  – корреляционная матрица помехи после скачка;

$\mathbf{W} = \{ W_{ij} \} = \begin{Bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{Bmatrix}$  – блочная матрица;

$$\mathbf{A} = \begin{Bmatrix} 1 & \dots & \rho_{m-1}^* \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_{m-1} & \dots & 1 \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \sqrt{\gamma} \cdot \begin{Bmatrix} \rho_m^* & \dots & \rho_{M-1}^* \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho^* & \dots & \rho_{M-m}^* \end{Bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \sqrt{\gamma} \cdot \begin{Bmatrix} \rho_m & \dots & \rho \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_{M-1} & \dots & \rho_{M-m} \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \gamma \cdot \begin{Bmatrix} 1 & \dots & \rho_{M-m-1}^* \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_{M-m-1} & \dots & 1 \end{Bmatrix}.$$

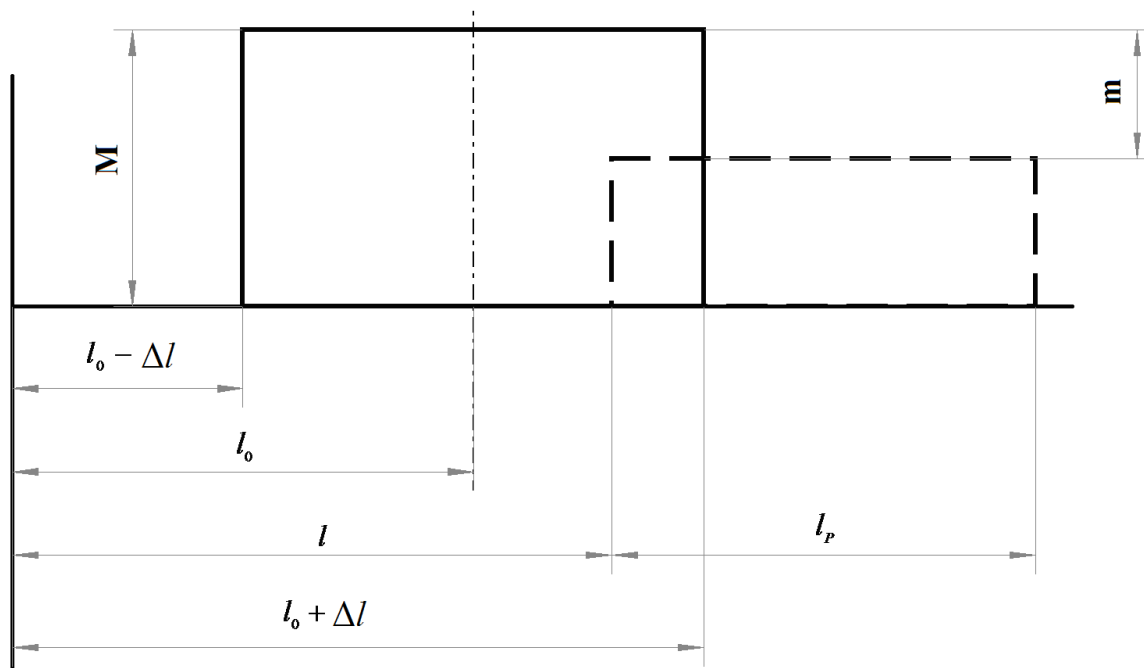


Рис. 2. Пространственное расположение «скользящего» окна и скачка помехи:

$l_0$  – положение центра «скользящего» окна;  $l$  – положение скачка помехи по дальности;  $2 \cdot \Delta l$  – размер «скользящего» окна по дальности;  $M$  – размер «скользящего» окна по азимуту;  $m$  – положение скачка помехи по азимуту;  $l_p$  – протяженность помехи по дальности

Fig. 2. Spatial location of sliding window and interference jump:

$l_0$  – position of the sliding window center;  $l$  – position of interference jump by range;  $2 \cdot \Delta l$  – the size of the “sliding” window on range;  $M$  – size of “sliding” window in azimuth;  $m$  – position of interference jump in azimuth;  $l_p$  – length of interference by range

Так как значения  $n$  и  $K$  в (5) пропорциональны длительности соответствующего интервала, изображенного на рис. 2, то можно записать для переднего фронта помехи выражение:

$$\hat{\Phi}_1 = (2 \cdot \Delta l)^{-1} \cdot \left[ (l - l_0 + \Delta l) \cdot \sigma_0^2 \cdot \{ \rho_{ij} \} + (l_0 + \Delta l - l) \cdot \sigma_0^2 \cdot \{ W_{ij} \} \right]; \quad (6)$$

$$\Phi_0 = \begin{cases} \sigma_0^2 \cdot \{ \rho_{ij} \}, & \text{при } l > l_0, \\ \sigma_0^2 \cdot \{ W_{ij} \}, & \text{при } l \leq l_0. \end{cases}$$

Для заднего фронта помехи:

$$\hat{\Phi}_2 = (2 \cdot \Delta l)^{-1} \cdot \left[ (l - l_0 + \Delta l) \cdot \sigma_0^2 \cdot \{ W_{ij} \} + (l_0 + \Delta l - l) \cdot \sigma_0^2 \cdot \{ \rho_{ij} \} \right]; \quad (7)$$

$$\Phi_0 = \begin{cases} \sigma_0^2 \cdot \{ W_{ij} \}, & \text{при } l \geq l_0, \\ \sigma_0^2 \cdot \{ \rho_{ij} \}, & \text{при } l < l_0, \end{cases}$$

где  $\Phi_0$  – корреляционная матрица отсчетов в центре скользящего окна.

В соответствии с (6) и (7) отношение Релея (4) для указанных случаев имеет вид:

$$R_1 = \frac{\mathbf{Y}_0^H \cdot \hat{\Phi}_1^{-1} \cdot \mathbf{Y}_0}{\mathbf{Y}_0^H \cdot \Phi_0^{-1} \cdot \mathbf{Y}_0}; \quad R_2 = \frac{\mathbf{Y}_0^H \cdot \hat{\Phi}_2^{-1} \cdot \mathbf{Y}_0}{\mathbf{Y}_0^H \cdot \Phi_0^{-1} \cdot \mathbf{Y}_0} \quad (8)$$

и граничные значения  $R_{1,2}$  определяются из характеристического уравнения [6]:

$$\det(\hat{\Phi}_{1,2}^{-1} - \lambda \cdot \Phi_0^{-1}) = 0; \quad \lambda_{\min} \leq R_{1,2} \leq \lambda_{\max}. \quad (9)$$

Значения  $R$  по выражениям (8) и (9) в общем виде при произвольных значениях  $m$  и  $l$  аналитическому расчету не поддаются и могут быть получены численными расчетами. Однако для крайних значений положения помехи в «скользящем» окне выражения  $R$  сводятся к значительно более простым.

При  $m = 0$  и любом  $l$  в пределах «скользящего» окна по дальности (все азимутальные позиции поражены помехой) получим из (5)  $\{W_{ij}\} = \gamma \cdot \{\rho_{ij}\}$  и соответственно из (6):

$$\hat{\Phi}_1 = (2 \cdot \Delta l)^{-1} \cdot [(l - l_0 + \Delta l) + \gamma \cdot (l_0 + \Delta l - l)] \cdot \sigma_0^2 \cdot \{\rho_{ij}\};$$

$$\Phi_0 = \begin{cases} \sigma_0^2 \cdot \{\rho_{ij}\}, & \text{при } l > l_0, \\ \gamma \cdot \sigma_0^2 \cdot \{\rho_{ij}\}, & \text{при } l \leq l_0. \end{cases}$$

Отсюда

$$\hat{\Phi}_1^{-1} = \frac{(2 \Delta l) \cdot \{\rho_{ij}\}^{-1} \cdot \sigma_0^{-2}}{[(l - l_0 + \Delta l) + \gamma \cdot (l_0 + \Delta l - l)]}; \quad (10)$$

$$\Phi_0^{-1} = \begin{cases} \sigma_0^{-2} \cdot \{\rho_{ij}\}^{-1}, & \text{при } l > l_0, \\ \gamma^{-1} \cdot \sigma_0^{-2} \cdot \{\rho_{ij}\}^{-1}, & \text{при } l \leq l_0. \end{cases}$$

Далее из выражения (10) получим

$$\hat{\Phi}_1^{-1} = \begin{cases} \left( \frac{2 \cdot \Delta l}{(l - l_0 + \Delta l) + \gamma \cdot (l_0 + \Delta l - l)} \right) \cdot \Phi_0^{-1}, & l > l_0, \\ \left( \frac{2 \cdot \Delta l \cdot \gamma}{(l - l_0 + \Delta l) + \gamma \cdot (l_0 + \Delta l - l)} \right) \cdot \Phi_0^{-1}, & l \leq l_0. \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом,  $\hat{\Phi}_1^{-1}$  отличается от  $\Phi_0^{-1}$  только скалярным множителем и, следовательно, значение  $R_1$  равно этому множителю

$$R_1 = \begin{cases} \frac{2 \cdot \Delta l}{(l - l_0 + \Delta l) + \gamma \cdot (l_0 + \Delta l - l)}, & l > l_0, \\ \frac{2 \cdot \Delta l \cdot \gamma}{(l - l_0 + \Delta l) + \gamma \cdot (l_0 + \Delta l - l)}, & l \leq l_0. \end{cases} \quad (12)$$

Проведя аналогичные вычисления для заднего фронта помехи (7), получим

$$R_2 = \begin{cases} \frac{2 \cdot \Delta l \cdot \gamma}{(l - l_0 + \Delta l) \cdot \gamma + (l_0 + \Delta l - l)}, & l > l_0, \\ \frac{2 \cdot \Delta l}{(l - l_0 + \Delta l) \cdot \gamma + (l_0 + \Delta l - l)}, & l \leq l_0. \end{cases} \quad (13)$$

При любых  $m$  в пределах «скользящего» окна по азимуту и  $l < l_0 - \Delta l$  (все позиции по дальности поражены скачком помехи) получим из (5)

$$[\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H]_0 = [\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Y}^H]_1 = \sigma_0^2 \cdot \{W_{ij}\}$$

и соответственно из (6)

$$\hat{\Phi}_{1,2} = \Phi_0 = \sigma_0^2 \cdot \{W_{ij}\}, \quad R_{1,2} = 1.$$

Из выражений (12) и (13) следует, что в точке  $l_0$  (середине «скользящего» окна) значения  $R_1$  и  $R_2$  меняются скачком от величины  $R_{\max} = 2 \cdot \gamma / (\gamma + 1)$  до  $R_{\min} = 2 / (\gamma + 1)$ .

На рис. 3 приведены зависимости  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3 = 1$  при скачке  $\gamma = 10$  дБ.

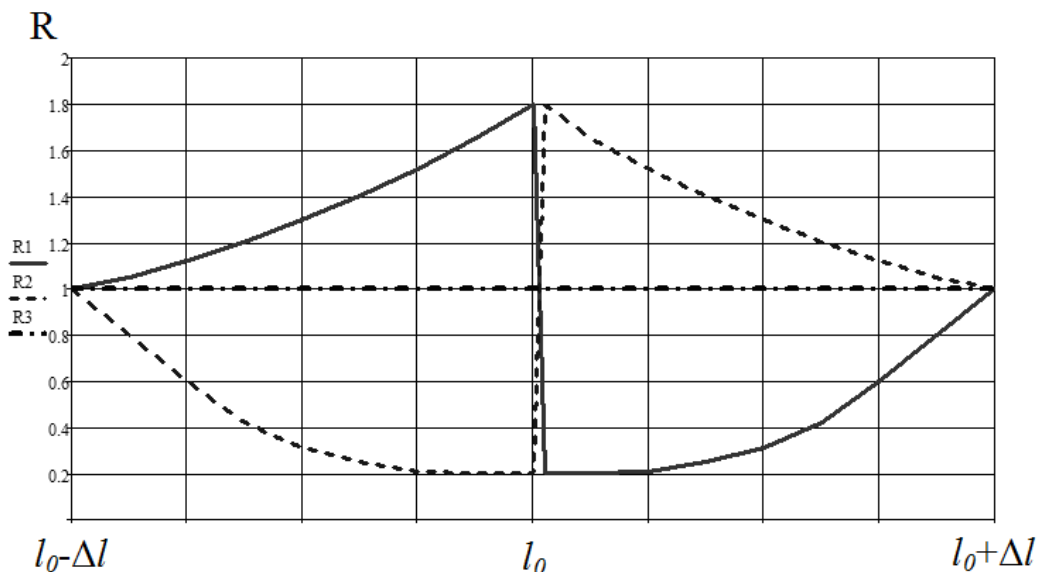


Рис. 3. Зависимости  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3 = 1$  при скачке  $\gamma = 10$  дБ

Fig. 3. Dependencies  $R_1$ ,  $R_2$  and  $R_3 = 1$  at jump  $\gamma = 10$  dB

Таким образом, по результатам приведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- при скачке помехи на любом участке дальности с поражением помехой всех азимутальных позиций «скользящего» окна на этом участке решающая статистика изменяется в соответствии со скалярным множителем независимо от мощности и вида корреляционной матрицы входного процесса;
- при скачке помехи на любой азимутальной позиции с поражением помехой всех дальномерных позиций «скользящего» окна решающая статистика не изменяется независимо от мощности и вида корреляционной матрицы входного процесса;
- полученные значения  $R_1$  и  $R_2$  позволяют провести оценку значений вероятности ложной тревоги  $F$  для рассматриваемых положений скачка помехи.

### 3. Влияние «кромки» помехи на вероятность ложной тревоги последетекторной МПО

Вероятность ложной тревоги определяется плотностью распределения решающей статистики  $\xi$  в отсутствие сигнала. При этом изменение  $\xi$  в соответствии с  $R_1$ ,  $R_2$  может быть учтено множителем  $R_1^{-1}$ ,  $R_2^{-1}$  в пороговом уровне  $\xi_{\Pi}$  при расчете  $F$ .

В частности, для последетекторной МПО плотность вероятности  $\xi$  описывается логнормальным законом, параметры которого при отсутствии сигнала зависят только от  $M$  [5].

Для логнормального закона распределения плотность равна

$$p(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln x - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (14)$$

где  $\mu$ ,  $\sigma$  – параметры распределения, приведенные в табл. 1.

Для этого закона вероятность превышения порога  $\xi_{\Pi}$  определяется из выражения [6]

$$F = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(\xi_{\Pi}) - \mu}{\sigma}\right), \quad (15)$$

где  $\Phi = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ .

Значения пороговых уровней при  $F = 10^{-1}$ ,  $F = 10^{-2}$ ,  $F = 10^{-3}$  для  $M = 3, 5$  и  $8$  приведены в табл. 1.

Значения пороговых уровней

Таблица 1

Values of threshold levels

Table 1

M	$\mu_0$	$\sigma_0$	$\ln(\xi_{\Pi})$		
			$F = 10^{-1}$	$F = 10^{-2}$	$F = 10^{-3}$
3	0,62	0,81	$1,28 \cdot \sigma_0 + \mu_0$	$2,35 \cdot \sigma_0 + \mu_0$	$3,1 \cdot \sigma_0 + \mu_0$
5	1,53	0,72			
8	2,1	0,53			

Для логнормального распределения (14) при умножении  $\xi$  на  $R$  вероятность  $F_1$  равна

$$F_1 = 1 - \Phi \left( \frac{\ln \left( \frac{\xi_{\Pi}}{R} \right) - \mu_0}{\sigma_0} \right). \quad (16)$$

Учитывая, что  $R_{\text{MAX}} / R_{\text{MIN}} = \gamma$ , можно сделать вывод, что количество ложных тревог существенно изменяется при прохождении скачка помехи через «скользящее» окно. Передний фронт помехи, приближаясь к центру «скользящего» окна, занижает  $F$ , при прохождении через центр «скользящего» окна происходит резкий рост  $F$  с дальнейшим понижением до стационарного уровня  $F_0$ . Задний фронт помехи, приближаясь к центру окна, повышает  $F$ , при прохождении центра «скользящего» окна происходит резкое понижение  $F$  с дальнейшим повышением до стационарного уровня  $F_0$ .

Численные расчеты значений  $F_{\text{MAX}}$  и  $F_{\text{MIN}}$  для  $M = 3, 5, 8$  и  $\gamma = 10, 100$  приведены в табл. 2 и 3.

Численные расчеты  $F$  при  $\gamma = 10$

Таблица 2

Numerical calculations  $F$  at  $\gamma = 10$

Table 2

$F_0$	$F_{\text{MAX}}$			$F_{\text{MIN}}$		
	$M = 3$	$M = 5$	$M = 8$	$M = 3$	$M = 5$	$M = 8$
$10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	$< 10^{-6}$
$10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$13 \cdot 10^{-2}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$< 10^{-6}$
$10^{-3}$	$10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

Численные расчеты  $F$  при  $\gamma = 100$

Таблица 3

Numerical calculations  $F$  at  $\gamma = 100$

Table 3

$F_0$	$F_{\text{MAX}}$			$F_{\text{MIN}}$		
	$M = 3$	$M = 5$	$M = 8$	$M = 3$	$M = 5$	$M = 8$
$10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-1}$	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$5,3 \cdot 10^{-1}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$
$10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$17 \cdot 10^{-2}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$
$10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

Данные из табл. 2 и 3 показывают, что величина  $F_{\text{MAX}}$  слабо зависит от  $M$  и  $\gamma$ , приводя к увеличению ложных тревог не более чем на порядок, в то время как  $F_{\text{MIN}}$  может измениться на 3–4 порядка.

Проведенные расчеты показывают высокую нестабильность  $F$  при скачке помехи на входе МПО. Эти обстоятельства вынуждают к применению специальных мер по реализации адаптивного порогового устройства для стабилизации  $F$ . В работах [7–10] приведены алгоритмы адаптивных пороговых устройств, которые могут быть перспективны для решения этой задачи.

### Заключение

В результате проведенного анализа получены общие выражения для выборочной матрицы адаптивной МПО, определены выборочные матрицы для предельных положений скачка помехи в «скользящем» окне. С использованием отношения Релея определены множители решающей статистики, обусловленные скачком помехи. Для последдетекторной адаптивной МПО проведена оценка значений вероятности ложной тревоги.

### Литература

1. Попов, Д.И. Адаптивная обработка сигналов на фоне пассивных помех / Д.И. Попов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2000. – Т. 43, № 1. – С. 59–68.
2. Попов, Д.И. Адаптивное обнаружение сигналов на фоне пассивных помех / Д.И. Попов // Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2017. – № 70. – С. 5–10.
3. Попов, Д.И. Адаптация систем обработки сигналов на фоне пассивных помех / Д.И. Попов // Вестник Московского энергетического института (Вестник МЭИ). – 2016. – № 3. – С. 78–83.
4. Попов, Д.И. Оценивание корреляционных параметров пассивных помех / Д.И. Попов // Радиопромышленность. – 2017. – № 1. – С. 57–62. DOI: 10.21778/2413-9599-2017-1-57-62
5. СДЦ в импульсных РЛС: 5. Адаптивные системы междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д.И. Леховицкий, В.П. Рябуха, Г.А. Жуга и др. // Прикладная радиоэлектроника. 2011. – Т. 10, № 4. – С. 508–525. – <http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/4718/1/508-525.pdf>.
6. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
7. Трухачев, А.А. Адаптивные пороговые уровни в устройствах обнаружения радиолокационных сигналов / А.А. Трухачев. – М.: Юлис, 2017. – 339 с.
8. Попов, Д.И. Адаптивные пороговые устройства / Д.И. Попов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2006. – Т. 49, № 3. – С. 30–35.
9. Чухломин, И.Е. Адаптивная последдетекторная междупериодная обработка в следящей амплитудной моноимпульсной РЛС / И.Е. Чухломин, Н.А. Файзулин // Радиолокация, Навигация, Связь: сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. – 2019. – Т. 3. – С. 82–101.
10. Чухломин, И.Е. Анализ обнаружителя LOG-CFAR с цифровым адаптивным порогом обнаружения на фоне морских помех / И.Е. Чухломин, Н.А. Файзулин // Журнал радиоэлектроники: электрон. журн. – 2015. – № 2. – <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/7/text.pdf>.

**Чухломин Иван Евгеньевич**, ведущий инженер, АО «Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы», г. Челябинск; [office@niit-rk.ru](mailto:office@niit-rk.ru).

**Файзулин Наиль Абдулович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный конструктор проекта, АО «Научно-исследовательский институт по измерительной технике – радиотехнические комплексы», г. Челябинск; [office@niit-rk.ru](mailto:office@niit-rk.ru).

**Павлик Виталий Вадимович**, студент 2-го курса, Челябинский государственный университет, г. Челябинск; [vitaliyavlik@mail.ru](mailto:vitaliyavlik@mail.ru).

*Поступила в редакцию 4 ноября 2019 г.*

## ANALYSIS OF INTERPERIOD PROCESSING UPON NON-STATIONARY INFLUENCE OF PASSIVE GAUSSIAN CLUTTER

I.E. Chukhlomin<sup>1</sup>, office@niiit-rk.ru,  
N.A. Faizulin<sup>1</sup>, office@niiit-rk.ru,  
V.V. Pavlik<sup>2</sup>, vitaliypavlik@mail.ru

<sup>1</sup> JSC "Research Institute for the Measurement Technology – Radio Systems",  
Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**Introduction.** Adaptive processing of signals in interference is an actual task for different radio systems. Adaptation is based on optimization of the processing algorithm depending on interference parameters, at that a priori independent interference parameters are replaced with their evaluations according to the adaptive Gaussian approach methodology. The interference parameters evaluation is carried out by classified sampling, at that interference stationarity within the training window is supposed. **Aim.** To analyze effect of interference instability on adaptive interperiod processing decision statistics, to determine dependence of interference correlation matrix evaluation and decision statistics on location and interference intensity in the training window, to research evaluation of false alarm level at interference jump for postdetection interperiod processing, to analyze effect of interference instability on false alarm level at interperiod processing with adaptation to the interference correlation matrix. **Materials and methods.** The Rayleigh ratio is applied as an interference instability research method. Applying of the Rayleigh ratio allows to determine character of interperiod processing decision statistics change. A model of interference power stepwise change in the educational window is used as reference data. By means of the Rayleigh ratio, change of sample interference matrix at random location of interference jump and its effect on decision statistics is researched. **Results.** A common expression is received for relative change of decision statistics, and calculations for the interference extreme positions in the window are carried out. Limits of decision statistics are determined, and it is demonstrated that its maximum increase relative to stationary level does not exceed the value of two, and minimum decrease is inversely proportional to half value of interference intensity jump. For postdetection interperiod processing case, numeric evaluation of false alarm probability values is given. **Conclusion.** Received results show that relative change of decision statistics proportional to interference intensity jump and to corresponding change of false alarm probability necessitates taking measures on its stabilization.

*Keywords:* interperiod signal processing, non-stationary clutter, probability of false alarms.

### References

1. Popov D.I. [Adaptive Signal Processing against the Background of Passive Interference]. *University News Radioelectronics*, 2000, vol. 43, no. 1, pp. 59–68. (in Russ.)
2. Popov D.I. [Adaptive Signal Detection against Passive Interference]. *Bulletin of the National Technical University of Ukraine Kiev Polytechnic Institute. Ser. Radio Engineering. Development of the Radio Equipment*, 2017, no. 70, pp. 5–10. (in Ukr.)
3. Popov D.I. [Adaptation of Signal Processing Systems against the Background of Passive Interference]. *Bulletin of the Moscow Energy Institute (Bulletin of MEI)*, 2016, no. 3, pp. 78–83. (in Russ.)
4. Popov D.I. [Evaluation of Clutter Correlation Parameters]. *Radio Industry*, 2017, vol. 1, pp. 57–62. (in Russ.) DOI: 10.21778/2413-9599-2017-1-57-62
5. Likhovitskiy D.I., Ryabukha V.P., Zhuga D.S., Rachkov D.S., Semeniaka A.V. [MTD in Pulse Radars: 5. Adaptive Systems for Interperiod Processing of Gaussian Signals against the Background of Gaussian Clutter]. *Applied Radio Electronics: Sci. Journ.*, 2011, vol. 10, no. 4, pp. 508–525. Available at: <http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/4718/1/508-525.pdf>.
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 720 p.

7. Trukhachev A.A. *Adaptivnye porogovye urovni v ustroystvakh obnaruzheniya radiolokatsionnykh signalov* [Adaptive Threshold Levels in Radar Detection Devices]. Moscow, Julis Publ., 2017, 339 p.

8. Popov D.I. [Adaptive Threshold Devices]. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Radioelectronics*, 2006, vol. 49, no. 3, pp. 30–35. (in Russ.)

9. Chukhlomin I.E., Faizulin N.A. [Adaptive Postdetector Interperiod Processing in Tracking Amplitude Monopulse Radar]. *Radiolokatsiya, Navigatsiya, Svyaz': sb. tr. XXV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* ["Radar Navigation Communication": Proc. of XXV International Scientific and Technical Conference]. Voronezh, 2019, vol. 3, pp. 82–101.

10. Chukhlomin I.E., Faizulin N.A. [Analysis of a LOG-CFAR Detector with a Digital Adaptive Detection Threshold against a Background of Sea Clutter]. *Journal of Radio Electronics: Electronic Journal*, 2015, vol. 2. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/feb15/7/text.pdf> (in Russ.)

*Received 4 November 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Чухломин, И.Е. Анализ межпериодной обработки при нестационарном воздействии пассивной гауссовой помехи / И.Е. Чухломин, Н.А. Файзулин, В.В. Павлик // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 79–88. DOI: 10.14529/ctcr200108

### FOR CITATION

Chukhlomin I.E., Faizulin N.A., Pavlik V.V. Analysis of Interperiod Processing upon Non-Stationary Influence of Passive Gaussian Clutter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 79–88. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200108



# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

DOI: 10.14529/ctcr200109

## AN APPROACH TO FAULT DIAGNOSIS OF GEARBOX BASED ON AN INSTANTANEOUS ANGULAR ACCELERATION. EXPERIMENTAL STUDY

V.V. Sinitsin, [sinitsinvv@susu.ru](mailto:sinitsinvv@susu.ru),

A.L. Shestakov, [a.l.shestakov@susu.ru](mailto:a.l.shestakov@susu.ru)

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**Introduction.** Gears are important parts of almost every operating mechanism in many industries. The gear condition monitoring is an important unit of condition monitoring of a mechanism as a whole. The vibration is one of the most used sources of information for equipment technical diagnostics. Traditionally, vibration is measured by accelerometers which are fixed on the mechanism body. Analyse of the measured data from the accelerometers requires applying the special methods and the staff with developed analytical skills. On the other hand, a novel approach to the accelerometer fitting location allows receiving extra diagnostic information and facilitating diagnosis. **Aim.** The present study shows the application of the novel approach to the accelerometer fitting location and the analyse of extra information for gearbox diagnosis. **Materials and methods.** The novel accelerometer fitting location is a rotating shaft of the mechanism. The extra diagnostic information is an angular acceleration of the rotating shaft. The theoretical base for the angular acceleration as diagnosis information is shown in the study. **Results.** The study contains experimental results of fault detecting such as the 'chipped tooth' and 'broken tooth' of a pinion. In addition, the study contains the proposed criteria for the detection of the local fault. **Conclusion.** The experimental results and the applied criteria show that the proposed approach allows detecting the pinion local defect on the first pinion rotation frequency clearly at various rotation frequencies.

*Keywords: diagnostics, accelerometer, wireless acceleration sensor, rotating shaft, rotating machinery, angular acceleration.*

### Introduction

Gears are widely used in operating mechanisms in many industries. Variable loads and speeds lead to gear wear. Moreover, the growth of the defect rapidly evaluates and can be a factor of irreparable harm. In addition, the diagnosis of the gears is highly important but it is a difficult problem because of non-steady-state operations, as previously mentioned.

The most common method of gears diagnosis is vibration diagnostics [1, 2]. Nevertheless, even a defect-free gear pair has some work vibration, which has a wide frequency band. The vibration is the result of key factors: cyclic variation of gear teeth stiffness in a meshing phase and manufacturing and assembly errors [3]. The cyclic variation and constant meshing tooth error excite oscillations on a gear-meshing frequency  $f_z$

$$f_z = z_1 f_1 = z_2 f_2,$$

where  $z_1, z_2$  are teeth number of pinion and gear, respectively. The  $f_1, f_2$  are rotation frequencies of the pinion and gear, respectively [4]. The variable meshing tooth appears on the rotation frequencies  $kf_1, kf_2$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), and the modulated frequencies  $mf_z \pm nf_1, mf_z \pm nf_2$  ( $m, n = 1, 2, 3, \dots$ ) [5]. At the same time, the frequency spectrum has components that are associated with cutting error of pinion and gear  $f_d$

$$f_d = kz_d f, \quad k = 1, 2, \dots,$$

where  $z_d$  is the number of teeth of the gear wheel of the gear cutting machine. Operating defects of gears

mating surfaces (such as wear, microchipping, sticking, crack, chipping, broke and related) are an additional consideration of frequency spectrum change. Moreover, a broken tooth is the most dangerous type of defect in view of rapid growth from crack to broke. Operational defects of gear at an early stage have a low energy contribution in the frequency spectrum that makes more complicated detecting them. Furthermore, commonly gearboxes are operated with other mechanical nodes, which also make high-level noises [6, 7]. That fact is challenging to methods of gearbox diagnosis and successfully fault detection [8, 9].

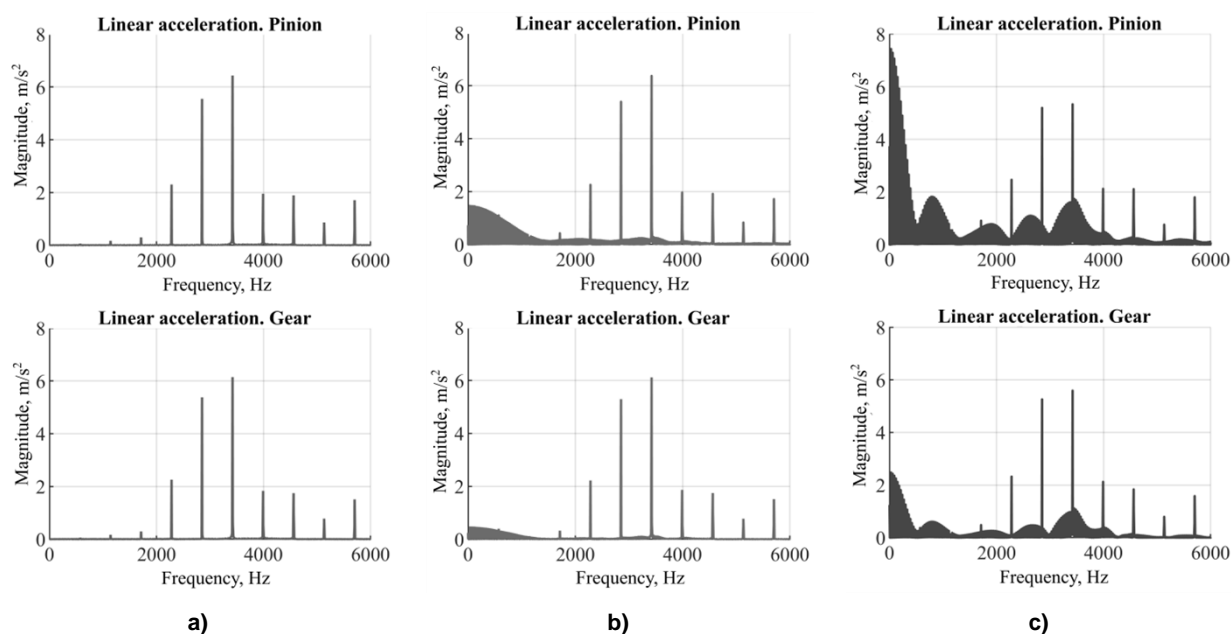
Traditional source of information about condition gearbox is accelerometers which are fixed on the gearbox body. Moreover, various methods, criteria, and indicators are used for gearbox diagnosis in the time-domain, frequency-domain, and time-frequency domain. The time-domain diagnosis is the poorly-successful and problematic approach. That fact was shown in studies [10–12]. On the other hand, diagnosis in frequency-domain and time-frequency domain are more successful approaches. The commonly conditional indicators in the frequency-domain are the kurtogram [13, 14], kurtogram with TSA [15], adaptive SK filtering method on the grounds of Morlet wavelet [16] et alii. The commonly conditional indicators in the time-frequency domain are Hilbert-transform based methods [17, 18].

The author in study [19] describes the 8-DOF dynamic model of a gearbox in detail with a local defect of the pinion. The function of gear tooth meshing stiffness varies according to the modelled defect type (chipped or broken tooth). The pinion has  $z_1 = 19$  teeth; the gear has  $z_2 = 48$  teeth. The frequency of pinion rotation is  $f_1 = 30$  Hz. The result shows a spectrum changing of gear linear accelerations with various local defects, which corresponds to the “canonical” non-monotonic behaviour described in the literature. However, focusing on the traditional measurement methods, the author considered the behaviour of only the linear acceleration spectrum. On the other hand, analysis of the spectrum of an angular acceleration gear allows for increasing possibilities of a gearbox diagnosis.

The approach of the shaft acceleration measuring from the rotating shaft, including angular acceleration, studied in [20]. Moreover, the mathematical model one of the design versions of the WAS-Technology sensor described in [21]. That design allows measuring angular acceleration, two linear accelerations in the diametrical plane and the turning angle of the shaft.

## 1. Method for processing of angular acceleration

An analysis of the gear angular accelerations changing (dynamic model from Ref. [19]) under the influence of local defects shows that the changes of the spectrum discrete components are associated with harmonics of the gear frequency is close to monotonic (Fig. 1).



**Fig. 1. Frequencies spectrum of the gear angular accelerations with a local defect: a – without defect; b – chipped tooth; c – broken tooth**

At the same time, a modulation index of the angular acceleration spectrum around harmonics of the gear frequency increases in the same way as the linear acceleration spectrum. Moreover, defects detection based on a comprehensive analysis of discrete components, which are associated with harmonics of the gear and rotation frequencies, by the Prism-method was studied in [22, 23]. On the other hand, the first pinion harmonic  $f_1$  of the gear angular spectrum increases by increasing local defect, in other words, the level of harmonics of the frequency meshing defected tooth increases (Fig. 2).

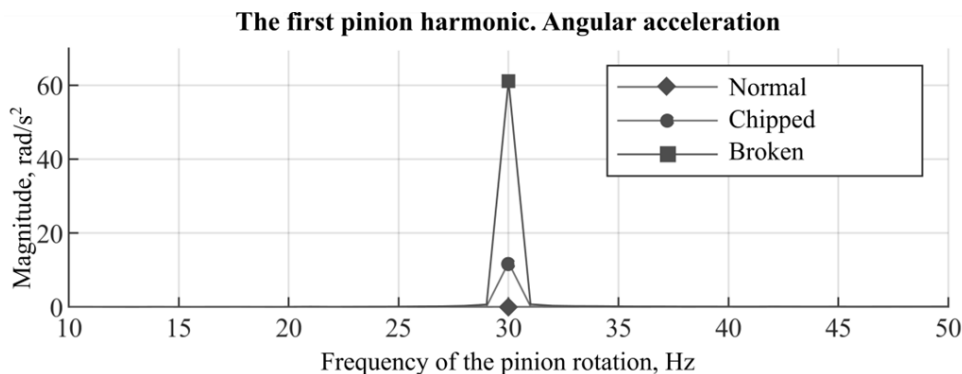


Fig. 2. The first harmonic angular acceleration of defected pinion with various defects

Thus, the level of the first pinion harmonic can operate as a criterion for the detection of local defects, such as a chipped and broken tooth.

## 2. Test equipment

### 2.1. Experimental rig

The applicability of the proposed criterion for the diagnosis of gear transmission is considered on the example of a single-stage gearbox of the experimental rig (MFS-Magnum from SpectraQuest) with bevel gears (Fig. 3).

The motor of the experimental rig is operated by the frequency drive that allows setting any motor rotation frequency in the operating range.

The pinion of the gearbox has  $z_p = 18$  teeth; the gear has  $z_g = 27$  teeth. The design of the studied gearbox allows for the simulation of the pinion defects such as the chipped tooth (Fig. 4) and the broken tooth (Fig. 5).

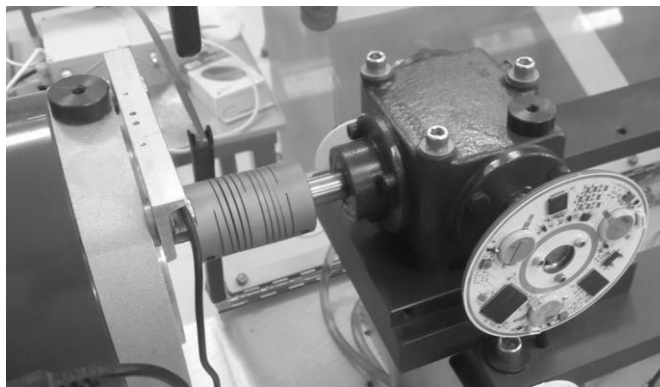


Fig. 3. Gearbox with mounted the WAS-Sensor



Fig. 4. Pinion with the chipped tooth



Fig. 5. Pinion with the broken tooth

Simulating the pinion defects due to pinion experiences more wear than the gear because pinion has fewer teeth and makes more revolutions.

2.2. WAS-Sensor

The applicability of the proposed criterion for the diagnosis of gear transmission designed the prototype of a WAS-Sensor based on WAS-Technology. The WAS-Sensor contains three MEMS-accelerometers (ADXL001-70 from Analog Devices) (Fig. 6).

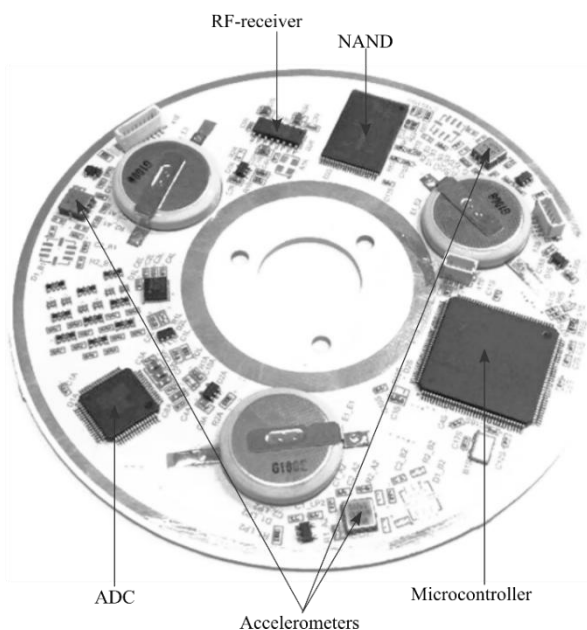


Fig. 6. The prototype of the WAS-Sensor

Each accelerometer has a measurement rate  $\pm 70g$ , resonance frequency 22 kHz, sensitivity 24.2 mV/g at 100 Hz. The mathematical model of the Sensor is described in the study [21]. Also, the WAS-Sensor contains ADC (AD7609 from Analog Devices) which samples of accelerometers signals at 39.4 kHz. Moreover, the WAS-Sensor contains microprocessor (STM32L476 from STMicroelectronics) which controls accelerometers and ADC, makes pre-filtering signals and writes data to NAND. Also, the WAS-Sensor has lithium batteries for power.

3. Experimental results

The WAS-Sensor was fixed on output shaft of their gearbox. The gearbox was diagnosed in a quasi-steady operation. The simulator motor rotation frequency had 12 Hz. Thus, the output shaft was rotated with 8 Hz in accordance with gear-ratio  $k_z = 1.5$ . The measured linear accelerations of the

output shaft by the WAS-Sensor contain periodic high-frequency vibrations for the chipped tooth situation (Fig. 7). The frequency spectra of the accelerations measured by the sensor contain many components, including discrete peaks (Fig. 8).

Comparison of the power spectrum of each acceleration  $\ddot{\varphi}$ ,  $\ddot{x}$  and  $\ddot{y}$  for each gear defect (Fig. 9) clearly shows the change of the vibration signals – the change in the energy ratio of the spectrum components.

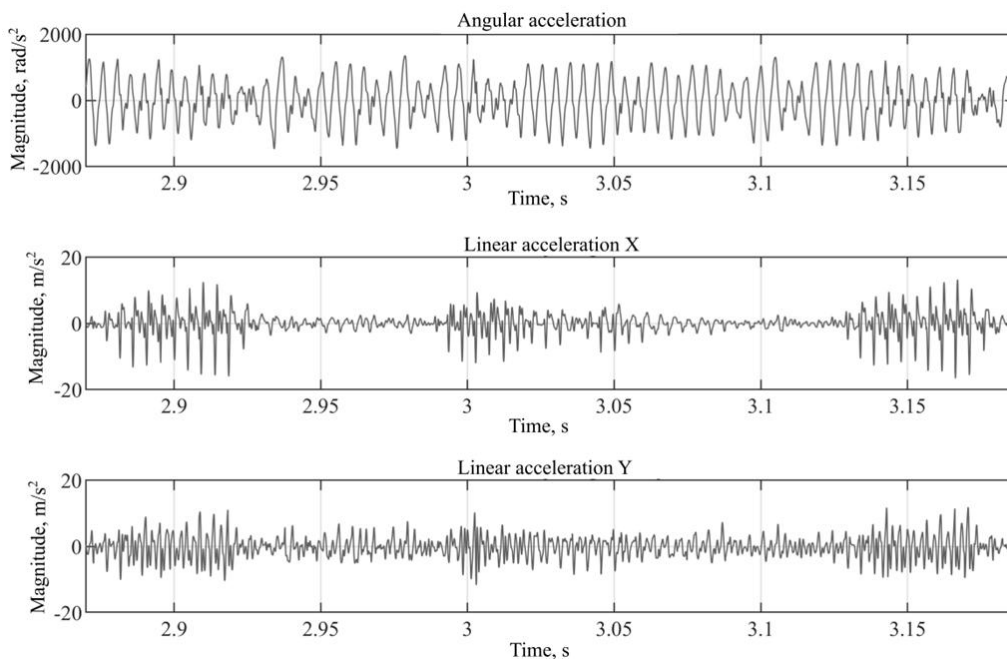


Fig. 7. The measured angular and linear accelerations by the WAS-Sensor. The pinion with the chipped tooth. Time domain

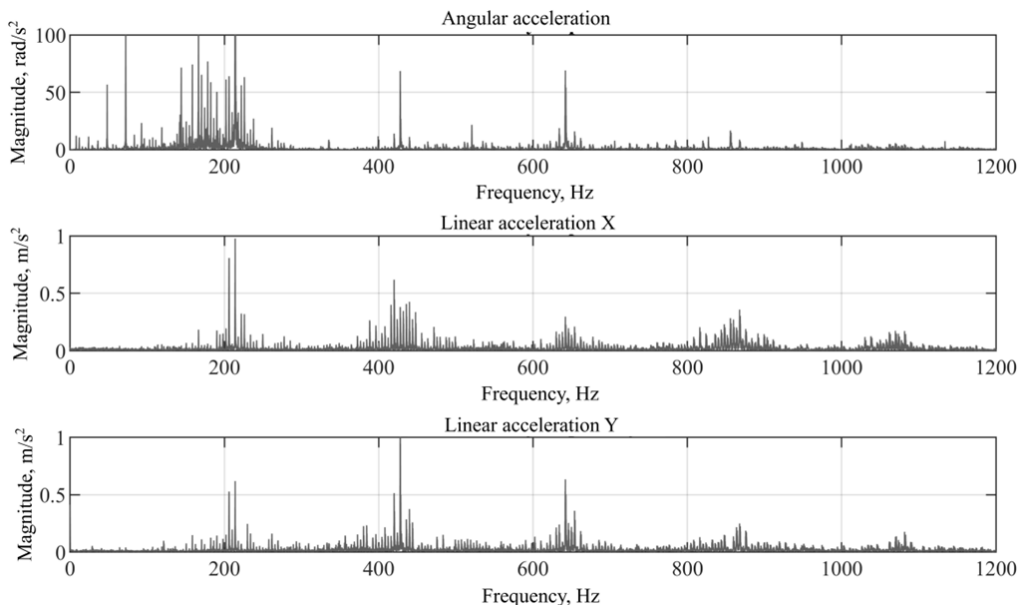


Fig. 8. Separated angular and linear accelerations. Pinion with the chipped tooth. Frequency domain

Moreover, the power spectrum grows around multiple of the tooth ripples  $f_z$  (214 Hz, 428 Hz, 642 Hz, 856 Hz), for the case 'the chipped tooth pinion'. Furthermore, the levels of discrete components of linear acceleration  $x$  are significantly lower in the region of multiple  $f_z$  frequencies for broken tooth case than for the chipped tooth case. On the other hand, the depth of modulation around the multiple of the tooth ripples substantially increased (Fig. 9). Thus, the paradoxical behaviour of the spectral characteristics for the different size of the tooth defect is clearly shown.

As previously mentioned, the presence of local defects affects a change of the stiffness gear-meshing function. A change of stiffness effects on a change of the force in the tooth contact pattern and a change of the angular acceleration of the gears. Moreover, a local defect affects a change of the magnitude of the frequency components which are related to the frequency meshing defected tooth.

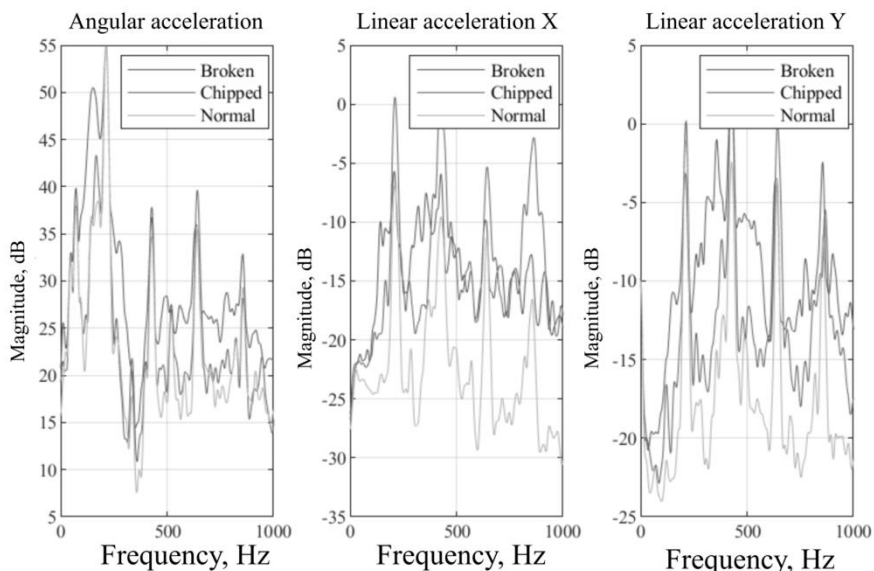


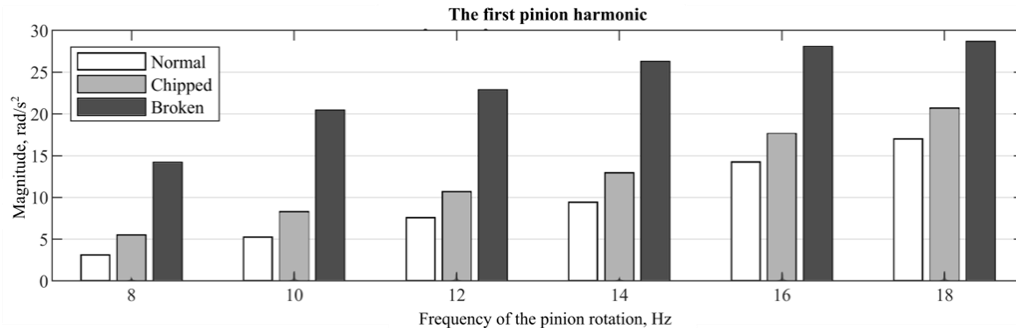
Fig. 9. The power spectrum for defects of the pinion. 'Broken' – broken tooth, 'Chipped' – chipped tooth, 'Normal' – without defect

The growth of a local defect (from chipped to breaking) leads to an increase in the amplitude of the first harmonic of angular acceleration  $A^{\dot{\varphi}}$  due to a reduction of the stiffness gear-meshing. Thus,

$$A_{Normal}^{\dot{\varphi}} = 7,6 \text{ rad/s}^2; A_{Chipped}^{\dot{\varphi}} = 10,7 \text{ rad/s}^2; A_{Broken}^{\dot{\varphi}} = 22,9 \text{ rad/s}^2,$$

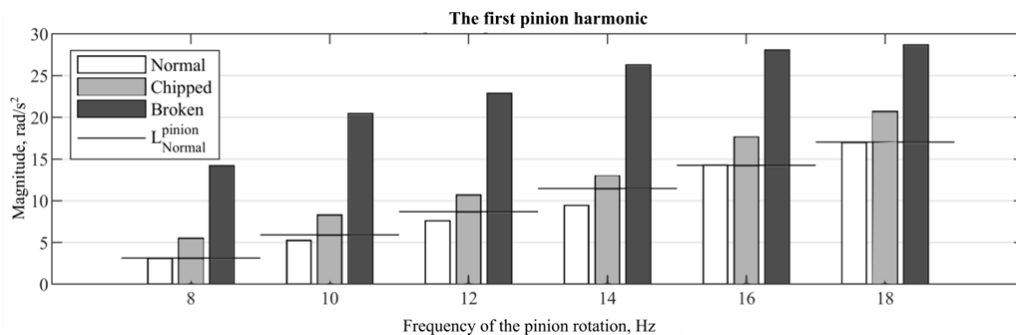
where  $A_{Normal}^{\ddot{\phi}}$  – the pinion without defect,  $A_{Chipped}^{\ddot{\phi}}$  – the pinion with chipped tooth,  $A_{Broken}^{\ddot{\phi}}$  – the pinion with broken tooth.

As a result, the grown of the local defect leads to a monotonic increase magnitude of the  $A^{\ddot{\phi}}$ . Moreover, that trend continues at other rotation frequencies of the pinion (Fig. 10).



**Fig. 10.** The magnitude of the first harmonic of the pinion in angular acceleration for various local defects. 'Broken' – the pinion with broken tooth, 'Chipped' – the pinion with chipped tooth, 'Normal' – the pinion without defects

The amplitude of the first rotation frequency component in angular acceleration is increased with the increasing rotation frequency of the pinion. Moreover, the amplitude of the first rotation frequency component for the faultless case has an almost linear dependence on the rotation frequency from 8 to 18 Hz (Fig. 11).



**Fig. 11.** The magnitude of the first harmonic of the pinion in angular acceleration for various local defects. 'Broken' – the pinion with broken tooth, 'Chipped' – the pinion with chipped tooth, 'Normal' – the pinion without defects,  $L_{Normal}^{pinion}$  – the linear function between the lower and the upper rotation frequency

Moreover, the amplitude of the first rotation frequency component is below the corresponding value of the bounding function  $L_{Normal}^{pinion}(f_{pinion})$ , where  $f_{pinion}$  is frequency of the pinion rotation (Fig. 12).

The function

$$L_{Normal}^{pinion}(f_{pinion}) = k_{normal} \cdot f_{pinion} + b_{normal},$$

where  $k_{normal}$  – slope coefficient of the bounding function,  $b_{normal}$  – constant displacement of the bounding function.

For the experimental case

$$k_{normal} = 1,3898, b_{normal} = -7,9864.$$

In turn, all values of the amplitudes of the first harmonic for each rotation frequency of each defective case are more than the values of the bounding function  $L_{Normal}^{pinion}(f_{pinion})$ . In addition, the values for both defects cases are close to direct dependence on the rotation frequency as well as for the defect-free case. Thus, a diagnostic criterion for detecting a local defect of the gearbox pinion is function  $L_{chipped}^{pinion}$ . The function

$$L_{chipped}^{pinion} = k_{border} \cdot f_{pinion} + b_{border}; \quad k_{border} = k_{normal}, b_{border} = b_{normal} + b_{shift}^{chipped}.$$

where  $k_{border}$  – slope coefficient of the criteria function,  $b_{border}$  – constant displacement of the criteria function  $b_{shift}^{chipped}$  – constant displacement of the criteria function relatively the bounding function

$$L_{Normal}^{pinion} (f_{pinion}).$$

For the experimental case (Fig. 12)  $b_{shift}^{chipped} = 0,5$ .

The difference between the values of the amplitude of the 'chipped pinion' and the value of the criteria function  $L_{chipped}^{pinion}$  vacillates between 1 and 3.2 rad/s<sup>2</sup> for different rotation frequencies. The difference between the values of the amplitude of the 'broken pinion' and the value of the criteria function  $L_{chipped}^{pinion}$  are between 10.6 and 14.3 rad/s<sup>2</sup> for different rotation frequencies.

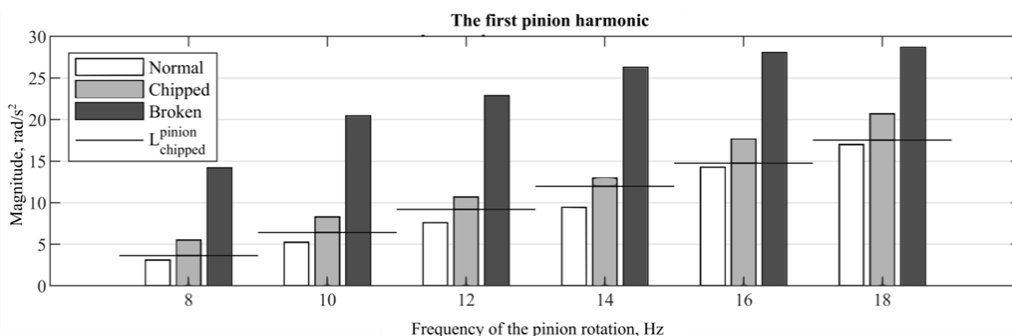


Fig. 12. The magnitude of the first harmonic of the pinion in angular acceleration for various local defects at various rotation frequencies. 'Broken' – the pinion with broken tooth, 'Chipped' – the pinion with chipped tooth, 'Normal' – the pinion without defect,  $L_{chipped}^{pinion}$  – the criteria function detecting of a 'chipped tooth' defect at various rotation frequencies

The ICP-accelerometer (by PCB Piezotronics) was mounted on the gearbox body for comparing the proposed approach with the traditional approach receiving diagnosis information (from a gearbox body). The ICP-accelerometer has a 3-axis with a sensitivity of 100 mV/g. The linear accelerations were measured at the same rotation frequencies and with the same defects such as the proposed approach. However, the results show the magnitude of the first harmonic of the pinion in linear accelerations does not depend on the rotation frequency and the defect (Fig. 13).

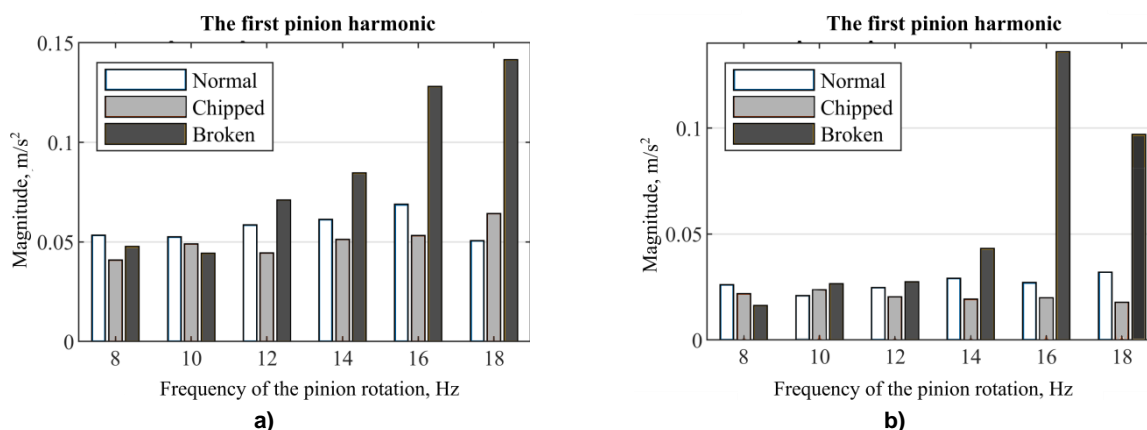


Fig. 13. The magnitude of the first harmonic of the pinion in linear accelerations measured by the ICP-accelerometer (a – horizontal axis, b – vertical axis) for various local defects at various rotation frequencies. 'Broken' – the pinion with broken tooth, 'Chipped' – the pinion with chipped tooth, 'Normal' – the pinion without defect

Moreover, the value of the magnitude for a 'normal' case is more than the values of a 'chipped' and a 'broken' cases at some rotation frequencies.

### Discussion

The proposed approach allows clearly detecting the pinion local defect on the first pinion rotation frequency. On the other hand, the local pinion defect information is hidden in data from the traditional approach (from a gearbox body). Hence, the measurement angular acceleration from a shaft allows receiving extended information about the behaviour of the mechanical system. The application of the proposed approach diagnosis allows detecting a local defect of the pinion, for example, 'chipped tooth' type easily. The approach dispenses without special signal processing methods unlike with the traditional approach. Nevertheless, the proposed approach requires an additional extended experimental investigation for various types of gearbox with various mechanical loads. It will be the topic of the future research.

### Acknowledgments

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract 02.A03.21.0011.

### References

1. Lei Y., Li N., Lin J., He Z. Two New Features for Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Planetary Gearboxes. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 755–764. DOI: 10.1177/1077546313486284
2. Nie M., Wang L. Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies for Wind Turbine Gearbox. *Procedia CIRP Elsevier*, 2013, 11, pp. 287–290. DOI: 10.1016/j.procir.2013.07.018
3. Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaya diagnostika mashin i mexanizmov* [Vibroacoustic Diagnostics of Machines and Images]. Moscow, Engineering Publ., 1987, 288 p.
4. Rincon A.F., Viadero F., Iglesias M., de-Juan A., Garcia P., Sancibrian R. Effect of Cracks and Pitting Defects on Gear Meshing. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers C*, 2012, 226 (11), pp. 2805–2815. DOI: 10.1177/0954406212437104
5. McFadden P.D. Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 1986, 108, pp. 165–170. DOI: 10.1115/1.3269317
6. Li C., Sanchez R., Zurita G., Cerrada M., Cabrera D., Vásquez R.E. Gearbox Fault Diagnosis Based on Deep Random Forest Fusion of Acoustic and Vibratory Signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, vol. 76–77, pp. 283–293. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.02.007
7. Loutridis S.J. Gear Failure Prediction using Multi-scale Local Statistics. *Engineering Structures*, 2008, 30, pp. 1214–1223. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.022
8. Samuel P.D., Pines D.J. A Review of Vibration-based Techniques for Helicopter Transmission Diagnostics. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282, pp. 475–508. DOI: 10.1016/j.jsv.2004.02.058
9. Lei Y.G., Lin J., Zou M.J., He Z.J. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Planetary Gearboxes: a Review. *Measurement*, 2014, 48, pp. 292–305. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.11.012
10. Zakrajsek J.J., Lewicki D.G. Detecting Gear Tooth Fatigue Cracks in Advance of Complete Fracture. *Tribotest*, 1998, vol. 4, iss. 4, pp. 407–422.
11. Antolick L.J., Branning J.S., Wade D.R., and Dempsey P.J. Evaluation of Gear Condition Indicator Performance on Rotorcraft Fleet. *AHS 66th Annual Forum and Technology Display*, Phoenix, United States, NASA, 2010, May, p. 12.
12. Zhang X.H., Kang J.S., Bechhoefer E., Zhao J. A New Feature Extraction Method for Gear Fault Diagnosis and Prognosis. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance Reliability*, 2014, 16 (2), pp. 295–300.
13. Antoni J. The Spectral Kurtosis: a Useful Tool for Characterising Nonstationary Signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, vol. 20, no. 2, pp. 282–307. DOI: 10.1016/j.ymsp.2004.09.001
14. Combet F., Gelman L. Optimal Filtering of Signals for Early Damage Detection Based on the Spectral Kurtosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23, pp. 652–668. DOI: 10.1016/j.ymsp.2008.08.002
15. Barszcz T., Randall R.B. Application of Spectral Kurtosis for Detection of a Tooth Crack in a Planetary Gear of a Wind Turbine. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23, pp. 1352–1365. DOI: 10.1016/j.ymsp.2008.07.019
16. Liu H., Huang W., Wang S., Zhu Z. Adaptive Spectral Kurtosis Filtering Based on Morlet



Wavelet and its Application for Signal Transients Detection. *Signal Processing*, 2014, 96, pp. 118–124. DOI: 10.1016/j.sigpro.2013.05.013

17. Feldman Michael. Hilbert Transform in Vibration Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, vol. 25, no. 3, pp. 735–802. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.018

18. Djebala A., Ouelaa N., Benchaabane C. Application of the Wavelet Multi-resolution Analysis and Hilbert Transform for the Prediction of Gear Tooth Defects. *Meccanica*, 2012, Oct., vol. 47, no. 7, pp. 1601–1612. DOI: 10.1007/s11012-012-9538-1

19. Tian X. Dynamic Simulation for System Response of Gearbox Including Localized Gear Faults. *Dissertation of Master Degree*, Edmonton, Canada, University of Alberta, 2004, p. 194.

20. Sinitsin V.V., Semenov A.S., Shestakov A.L. *Ustrojstvo izmerenija vibrouskorenija podvizhnyh jelementov mashin i mehanizmov* [Acceleration Measuring Device Moving Parts of Machines and Mechanisms]. Patent RU 142934 U1, Bull. no. 19, Publ. 10.07.2014.

21. Sinitsin V.V., Shestakov A.L. Wireless Acceleration Sensor of Moving Elements for Condition Monitoring of Mechanisms. *Measurement Science and Technology*, 2017, Aug., vol. 28, no. 9, p. 094002. DOI: 10.1088/1361-6501/aa7ab6

22. Henry M., Sinitsin V.V. Prism Signal Processing for Machine Condition Monitoring I: Design and Simulation. *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, St. Petersburg, Russia, IEEE, 2018, May, pp. 452–457. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8390747

23. Henry M., Sinitsin V.V. Prism Signal Processing for Machine Condition Monitoring II: Experimental Data and Fault Detection. *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, St. Petersburg, Russia, IEEE, 2018, May, pp. 458–463. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8390748

Received 30 November 2019

УДК 53.083.1

DOI: 10.14529/ctcr200109

## ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ МГНОВЕННОГО УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

**В.В. Синицин, А.Л. Шестаков**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

**Введение.** Зубчатые передачи являются важными частями практически каждого исполнительного механизма во многих отраслях промышленности. В связи с этим мониторинг состояния редуктора является важной частью общего мониторинга состояния механизма в целом. В свою очередь вибрация – наиболее применяемый источник диагностической информации о техническом состоянии исполнительного механизма. Традиционно вибрация измеряется при помощи акселерометров, которые закреплены на корпусе механизма. Однако анализ измеренных сигналов требует применения разнообразных развитых методов обработки информации. С другой стороны, применение новых подходов к месту закрепления акселерометров позволяет получить дополнительную информацию о техническом состоянии, а также упростить процесс обнаружения дефектов в механизмах. **Цель.** Показать возможности применения новых подходов к месту закрепления акселерометров и измеряемой расширенной информации для диагностики коробки передач. **Материалы и методы.** Новое место крепления акселерометров – вращающийся вал механизма. В свою очередь, дополнительный источник информации – угловое ускорение вращающегося вала. В исследовании приведено теоретическое обоснование углового ускорения в качестве источника диагностической информации. **Результаты.** Исследование содержит экспериментальные результаты обнаружения неисправностей, таких как «сколотый зуб» и «сломанный зуб» шестерни. Более того, исследование содержит предложенные критерии для выявления локальной неисправности шестерни. **Заключе-**

чение. Результаты эксперимента и примененные критерии показывают, что предлагаемый подход позволяет четко обнаружить локальный дефект ведущего зубчатого колеса на частоте вращения первого зубчатого колеса на различных частотах вращения.

Ключевые слова: диагностика, акселерометр, беспроводной датчик ускорения, вращающийся вал, роторное оборудование, угловое ускорение.

### Литература

1. Two New Features for Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Planetary Gearboxes / Y. Lei, N. Li, J. Lin, Z. He // *JVC/Journal of Vibration and Control*. – 2015. – Vol. 21, no. 4. – P. 755–764. DOI: 10.1177/1077546313486284
2. Nie, M. Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies for Wind Turbine Gearbox / M. Nie, L. Wang // *Procedia CIRP Elsevier*. – 2013. – 11. – P. 287–290. DOI: 10.1016/j.procir.2013.07.018
3. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
4. Effect of Cracks and Pitting Defects on Gear Meshing / A.F. Rincon, F. Viadero, M. Iglesias et al. // *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers C*. – 2012. – 226 (11). – P. 2805–2815. DOI: 10.1177/0954406212437104
5. McFadden, P.D. Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration / McFadden P.D. // *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*. – 1986. – 108. – P. 165–170. DOI: 10.1115/1.3269317
6. Gearbox Fault Diagnosis Based on Deep Random Forest Fusion of Acoustic and Vibratory Signals / C. Li, R. Sanchez, G. Zurita et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2016. – Vol. 76–77. – P. 283–293. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.02.007
7. Loutridis, S.J. Gear Failure Prediction using Multi-scale Local Statistics / S.J. Loutridis // *Engineering Structures*. – 2008. – 30. – P. 1214–1223. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.022
8. Samuel, P.D. A Review of Vibration-Based Techniques for Helicopter Transmission Diagnostics / P.D. Samuel, D.J. Pines // *Journal of Sound and Vibration*. – 2005. – 282. – P. 475–508. DOI: 10.1016/j.jsv.2004.02.058
9. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Planetary Gearboxes: a Review / Y.G. Lei, J. Lin, M.J. Zou, Z.J. He // *Measurement*. – 2014. – 48. – P. 292–305. DOI: 10.1016/j.measurement.2013.11.012
10. Zakrajsek, J.J. Detecting Gear Tooth Fatigue Cracks in Advance of Complete Fracture / J.J. Zakrajsek, D.G. Lewicki // *Tribotest*. – 1998. – Vol. 4, iss. 4. – P. 407–422.
11. Evaluation of Gear Condition Indicator Performance on Rotorcraft Fleet / L.J. Antolick, J.S. Branning, D.R. Wade, P.J. Dempsey // *AHS 66th Annual Forum and Technology Display*. – Phoenix, United States, NASA, 2010, May. – P. 12.
12. A New Feature Extraction Method for Gear Fault Diagnosis and Prognosis / X.H. Zhang, J.S. Kang, E. Bechhoefer, J. Zhao // *Eksplatacja i Niezawodnosc – Maintenance Reliability*. – 2014. – 16 (2). – P. 295–300.
13. Antoni, J. The Spectral Kurtosis: a Useful Tool for Characterising Nonstationary Signals / J. Antoni // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2006. – Vol. 20, no. 2. – P. 282–307. DOI: 10.1016/j.ymssp.2004.09.001
14. Combet, F. Optimal Filtering of Signals for Early Damage Detection Based on the Spectral Kurtosis / F. Combet, L. Gelman // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – 23. – P. 652–668. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.08.002
15. Barszcz, T. Application of Spectral Kurtosis for Detection of a Tooth Crack in a Planetary Gear of a Wind Turbine / T. Barszcz, R.B. Randall // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2009. – 23. – P. 1352–1365. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.07.019
16. Adaptive Spectral Kurtosis Filtering Based on Morlet Wavelet and its Application for Signal Transients Detection / H. Liu, W. Huang, S. Wang, Z. Zhu // *Signal Processing*. – 2014. – 96. – P. 118–124. DOI: 10.1016/j.sigpro.2013.05.013
17. Feldman, M. Hilbert Transform in Vibration Analysis / M. Feldman // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2011. – Vol. 25, no. 3. – P. 735–802. DOI: 10.1016/j.ymssp.2010.07.018

18. Djebala, A. Application of the Wavelet Multi-resolution Analysis and Hilbert Transform for the Prediction of Gear Tooth Defects / A. Djebala, N. Ouelaa, C. Benchaabane // *Meccanica*. – 2012, Oct. – Vol. 47, no. 7. – P. 1601–1612. DOI: 10.1007/s11012-012-9538-1

19. Tian, X. Dynamic Simulation for System Response of Gearbox Including Localized Gear Faults / X. Tian // *Dissertation of Master Degree, Edmonton, Canada, University of Alberta, 2004*. – P. 194.

20. Патент на полезную модель 142934 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 P 15/02, G 01 H 9/00. Устройство измерения виброускорения подвижных элементов машин и механизмов / В.В. Синицин, А.С. Семенов, А.Л. Шестаков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). – № 2014109714/28; заявл. 12.03.2014; опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.

21. Sinitsin, V.V. Wireless Acceleration Sensor of Moving Elements for Condition Monitoring of Mechanisms / V.V. Sinitsin, A.L. Shestakov // *Measurement Science and Technology*. – 2017, Aug. – Vol. 28, no. 9. – P. 094002. DOI: 10.1088/1361-6501/aa7ab6

22. Henry, M. Prism Signal Processing for Machine Condition Monitoring I: Design and Simulation / M. Henry, V.V. Sinitsin // *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. – St. Petersburg, Russia, IEEE, 2018, May. – P. 452–457. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8390747

23. Henry, M. Prism Signal Processing for Machine Condition Monitoring II: Experimental Data and Fault Detection / M. Henry, V.V. Sinitsin // *IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. – St. Petersburg, Russia, IEEE, 2018, May. – P. 458–463. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8390748

**Синицин Владимир Владимирович**, инженер-исследователь управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sinitsinvv@susu.ru.

**Шестаков Александр Леонидович**, д-р техн. наук, профессор, ректор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; a.l.shestakov@susu.ru.

*Поступила в редакцию 30 ноября 2019 г.*

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Sinitsin, V.V. An Approach to Fault Diagnosis of Gearbox Based on an Instantaneous Angular Acceleration. Experimental Study / V.V. Sinitsin, A.L. Shestakov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 89–99. DOI: 10.14529/ctcr200109

#### FOR CITATION

Sinitsin V.V., Shestakov A.L. An Approach to Fault Diagnosis of Gearbox Based on an Instantaneous Angular Acceleration. Experimental Study. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 89–99. DOI: 10.14529/ctcr200109

# Управление в социально-экономических системах

УДК 519.81

DOI: 10.14529/ctcr200110

## ЭКСПЕРТНО-ТЕСТОВЫЙ МЕХАНИЗМ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАНДИДАТОВ ПРИ ПОДБОРЕ ПЕРСОНАЛА

Ю.В. Бондаренко<sup>1, 2</sup>, И.В. Горошко<sup>3</sup>, Е.В. Васильчикова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия,

<sup>3</sup> Университет прокуратуры Российской Федерации, г. Москва, Россия

**Введение.** В условиях интенсивного перехода к высоко производительным технологиям руководители современных компаний особое внимание уделяют вопросам формирования команды компетентных, грамотных сотрудников. В этой связи актуальной становится задача формирования автоматизированных механизмов комплексной оценки кандидатов на вакантную должность компании, позволяющих оказать реальную поддержку в принятии обоснованных кадровых решений. **Цель исследования.** Разработать механизм комплексной оценки кандидатов на вакантную должность, основанный на синтезе экспертной информации и результатов тестирования по специально подобранному для конкретной должности пакету тестов. **Материалы и методы.** Предлагаемый механизм основывается на использовании математических методов оптимизации и обработки нечеткой экспертной информации. На первом этапе механизма формируется пакет тестов, обеспечивающий покрытие требуемых качеств вакантной должности. Для его реализации предлагается двухкритериальная задача со следующими критериями: минимизация количества включенных в пакет тестов и максимизация суммы степеней соответствия пакета тестов качествам должности. Решение задачи осуществляется методом взвешенных сумм и модифицированным методом ветвей и границ. На основе решения задачи формируется пакет тестов, проведение тестирования по которым позволяет сформировать частные оценки качеств кандидатов в различных лингвистических шкалах. В целях получения количественного значения комплексной оценки экспертами формируется единая лингвистическая шкала, позволяющая перевести результаты тестирования в нечеткие числа. Для формирования комплексной оценки выбрана нечеткая модификация метода TOPSIS. **Результаты.** На основе формализованного описания задачи приводится экспертно-тестовый механизм комплексной оценки кандидатов, для каждого этапа которого описаны особенности и представлены математические методы реализации. Для внедрения механизма в практическую деятельность компаний разработан программный комплекс на языке Python. **Заключение.** Предлагаемый в работе механизм внедрен в деятельность одной из ИТ-компаний города Воронежа и получил хорошую оценку со стороны специалистов. Рассмотрен пример работы программы для должности аналитика данных.

*Ключевые слова:* подбор персонала, комплексная оценка, механизм, тест, математические методы, нечеткая информация.

### Введение

В условиях высокой конкуренции и интенсивного развития цифровой экономики в управлении современными компаниями особое внимание уделяется качеству трудовых ресурсов. Профессионализм сотрудников, грамотность, высокая производительность являются фундаментом успешного развития любого предприятия и основой его способности быстро адаптироваться к меняющимся условиям рынка. В этой связи актуальной становится задача формирования эффективных механизмов оценки кандидатов при подборе персонала, способных оказать реальную поддержку руководству компаний в принятии обоснованных кадровых решений [1–5].

Как правило, к кандидатам на вакантную должность предъявляются определенные требования, а степень соответствия ей кандидата определяется или на основе результатов тестирования,

или же на основе экспертных суждений по результатам собеседования. Считается, что использование обоснованных, проверенных на практике тестов значительно повышает объективность оценки и является экономически целесообразным [6, 7].

Среди тестов, используемых при подборе персонала, выделяются тесты достижений, предназначенные для оценки уровней обладания профессиональными знаниями, навыками и умениями, и психологические тесты (интеллектуальные, тесты способностей, социально-психологические, личностные). Тесты достижений, как показывает практика, в основном разрабатываются внутри организаций и уникальны. Психологические тесты, наоборот, подбирают из уже известных и апробированных, составленных опытными психологами. Среди них наиболее популярными являются [7]:

- тест на мышление и креативность по методу Дж. Брунера;
- методика способности к самоуправлению Н.М. Пейсахова;
- тест «Корректирующая проба» и т. п.

На сегодняшний день разработано достаточно большое количество психологических тестов, многие из которых оценивают кандидатов по пересекающемуся набору качеств или компетенций [7]. Выбор такого набора тестов, с помощью которого возможно с минимальными временными и экономическими затратами получить объективную оценку соответствия качеств кандидатов требуемой должности, является актуальной, но вместе с этим сложной задачей. Ее эффективное решение требует привлечения математических методов, а внедрение в практику управления компанией – разработки программных продуктов. Разработке экспертно-тестового механизма, позволяющего сформировать комплексную оценку кандидата на должность на основе формирования оптимального пакета тестов и последующей математической обработки результатов тестирования, и посвящена настоящая статья.

### 1. Описание подхода

Перейдем к формализованному описанию задачи. Будем предполагать, что для некоторой открытой вакансии в компании сформирован перечень  $n$  качеств, которыми должен обладать сотрудник, где  $i=1, \dots, n$  – порядковый номер качества. Множество качеств обозначим через  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ . Среди качеств множества  $K$  могут значиться такие, как абстрактное мышление, интеллект, устойчивость и т. п.

Пусть на должность претендуют  $S$  кандидатов, где  $s=1, \dots, S$  – порядковый номер кандидата. Заметим, что среди кандидатов могут быть как уже работающие, так и новые сотрудники. Множество кандидатов обозначим через  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_S\}$ .

Известен перечень  $m$  тестов, каждый из которых может быть использован для оценки соответствия качеств кандидата вакантной должности,  $j=1, \dots, m$  – порядковый номер теста. Множество тестов обозначим через  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ .

Каждый тест  $t_j$  может оценивать или не оценивать требуемое качество  $k_i$ . При этом полагаем, что на основе мнения специалистов организации (экспертов) может быть сформирована матрица степеней соответствия тестов качествам должности  $D = (d_{ij})$ , где  $i=1, \dots, n, j=1, \dots, m$ . Элемент матрицы  $0 \leq d_{ij} \leq 1$  показывает, в какой степени тест  $t_j$  позволяет оценить качество  $k_i$ . Так, если тест  $t_j$  не предназначен для оценки качества  $k_i$ , то  $d_{ij} = 0$ , а если предназначен, то  $d_{ij}$  представляет собой количественную оценку степени доверия экспертов результатам теста.

*Требуется* сформировать механизм комплексной оценки кандидатов на вакантную должность, основанный на обработке результатов тестирования по пакету тестов.

Данная задача обладает целым рядом особенностей, среди которых выделим следующие:

- число тестов, позволяющих оценить качества кандидатов, достаточно велико, и разные тесты могут оценивать пересекающиеся множества качеств. При этом каждый тест содержит внушительное число вопросов, ответы на которые требуют временных затрат и усилий кандидатов;
- результатом тестирования являются лингвистические оценки кандидатов, что усложняет формирование количественной интегральной оценки, на основе значений которой осуществляется последующий прием на вакантную должность.

Представленные особенности мы предлагаем учесть в предлагаемом экспертно-тестовом механизме комплексной оценки кандидатов, включающем следующие укрупненные этапы.

**Этап 1.** Формирование пакета тестов, обеспечивающего покрытие качеств вакантной должности. При этом число тестов в пакете должно быть минимальным, а сумма степеней соответствия пакета тестов качествам должности – максимальной.

**Этап 2.** Проведение тестирования по каждому из отобранных в пакет тестов, получение результатов в различных лингвистических шкалах.

**Этап 3.** Формирование обобщенной лингвистической шкалы, переход к нечетким оценкам качеств кандидатов.

**Этап 4.** Расчет комплексной оценки соответствия кандидата вакантной должности, интерпретация результатов.

Практическую реализацию первого этапа алгоритма предлагается осуществлять на основе решения *двухкритериальной задачи формирования пакета тестов*.

Для формального описания задачи введем дискретные переменные

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если тест } j \text{ включается в пакет,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Тогда двухкритериальную задачу формирования пакета тестов можно записать следующим образом:

$$\sum_{j=1}^m x_j \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot x_j \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$x_j \in \{0, 1\}. \quad (4)$$

Ограничение задачи (1)–(4) означает, что каждое качество должно быть покрыто (оценено) хотя бы одним тестом. При этом параметр  $a_{ij} = 1$ , если тест  $t_j$  оценивает качество  $k_i$ , и  $a_{ij} = 0$  иначе.

Решение двухкритериальной задачи (1)–(4) предлагаем искать методом взвешенных сумм [8, 9]. Для этого введем в рассмотрение параметр  $\alpha$  – коэффициент важности первого критерия задачи (1), где  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Соответственно важность второго критерия составляет  $\beta = 1 - \alpha$ .

Тогда решение задачи (1)–(4) сводится к решению следующей однокритериальной задачи:

$$\alpha \cdot \sum_{j=1}^m x_j - (1 - \alpha) \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot x_j \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Задача (5), (6) является взвешенной задачей о минимальном покрытии [10], и для ее решения предлагается алгоритм, представляющий модификацию метода ветвей и границ. Особенности реализации алгоритма заключаются в следующем.

1. Среди столбцов, не имеющих индекса, находится столбец, обладающий максимальной мощностью  $p_j$ . Мощность столбца в данном случае принимает значение

$$p_j = \sum_{i=1}^n d_{ij}.$$

Значение индекса увеличивается на единицу, а также столбцу присваивается метка. Покрываемые им строки заносятся в множество покрытых строк.

2. Находится оценка текущего решения:

$$L_1 = \alpha \cdot \sum_j x_j - (1 - \alpha) \cdot \sum_j \sum_{i=1}^n d_{ij} \cdot x_j,$$

где  $j$  – номера столбцов, имеющих метку, и столбцов, необходимых для покрытия непокрытых строк. Последние выбираются по правилу: минимальное число столбцов, не имеющих индекса, в которых количество элементов  $d_{ij} > 0$  больше или равно числу непокрытых строк.

3. Проверяется, если оценка  $L_1 \geq L_0$ , где  $L_0$  – оценка предыдущего решения, то переходят к пункту 4, иначе, если не все строки покрыты, возвращаются к пункту 1. Первоначально  $L_0 = 0$ . Если же  $L_1 < L_0$  и все строки покрыты, то формирование очередного допустимого решения закончено. В этом случае запоминают номера помеченных столбцов и оценку  $L_1$  и переходят к проверке решения на оптимальность.

4. Проверяется, имеет ли метку столбец, включенный в решение последним. Если да, то метка с него снимается, соответствующие строки считаются непокрытыми, и переходят к пункту 2. Если столбец, включенный в решение последним, не имеет метки, то с него снимается индекс.

5. Проверяется наличие столбцов с индексами. Если таких нет, то исследуемое решение оптимально, иначе – переход к пункту 4.

Результатом решения задачи (5), (6) (соответственно, этапа 1 экспертно-тестового механизма) является оптимальный пакет тестов  $T' = \{t'_1, t'_2, \dots, t'_G\} \subseteq T$ , где  $G$  – число тестов, отобранных на этапе 1,  $G \leq m$ .

Каждый претендент на вакантную должность проходит тестирование по тестам множества  $T'$ . По каждому тесту кандидат набирает определенное количество баллов, которым дается интерпретация в лингвистической шкале. Причем число градаций шкал в различных тестах, как правило, отличается. Например, в тесте Дж. Брунера уровень креативности и базового мышления разбивается на три интервала: низкий уровень (от 0 до 5 баллов); средний уровень (от 6 до 9 баллов); высокий уровень (от 10 до 15 баллов). В методике способности к самоуправлению Н.М. Пейсахова результаты делятся по пяти градациям: низкий, ниже среднего, средний, выше среднего, высокий. Естественно, что для возможности построения количественной интегральной оценки качеств кандидата результаты тестирования в различных шкалах должны быть приведены к единой шкале измерения [11, 12].

Будем полагать, что эксперты могут сопоставить результаты тестирования требованиям, предъявляемым к кандидату на должность, и представить оценку соответствия каждого личного качества  $k_i \in K$  кандидата  $h_s \in H$  в лингвистической шкале Саати с градациями: слишком слабо; слабо; немного слабо; удовлетворительно; не очень хорошо; хорошо; очень хорошо [12].

Дальнейшая обработка результатов тестирования (этап 4 механизма) предполагает преобразование лингвистических переменных в нечеткие трапецевидные числа [13], что представлено на рис. 1.

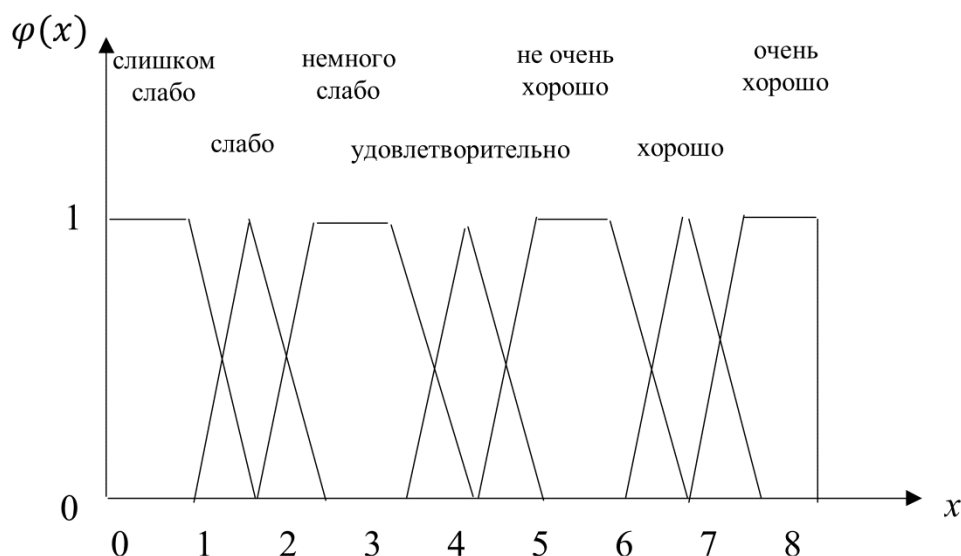


Рис. 1. Преобразование лингвистических переменных в нечёткие числа  
Fig. 1. Converting linguistic variables to indistinct numbers

Таким образом, будем считать, что каждому качеству  $k_i$  кандидата  $h_s$  по результатам теста  $t_g^i$  поставлена в соответствие оценка, выражаемая трапецевидным нечетким числом

$$R_{ig}^s = (a_{ig}^s, b_{ig}^s, c_{ig}^s, d_{ig}^s).$$

Поскольку одно и то же качество может быть оценено по различным тестам и эти оценки в самом общем случае могут различаться, то интегральную оценку  $\bar{R}_i^s$  качества  $k_i$  кандидата  $h_s$  предлагаем рассчитывать по следующей формуле:

$$\bar{R}_i^s = (\bar{a}_i^s, \bar{b}_i^s, \bar{c}_i^s, \bar{d}_i^s),$$

$$\bar{a}_i^s = \sum_{g=1}^G v_{ig} \cdot a_{ig}^s, \quad \bar{b}_i^s = \sum_{g=1}^G v_{ig} \cdot b_{ig}^s, \quad \bar{c}_i^s = \sum_{g=1}^G v_{ig} \cdot c_{ig}^s, \quad \bar{d}_i^s = \sum_{g=1}^G v_{ig} \cdot d_{ig}^s, \quad v_{ig} = d_{ig}^s / \sum_{l=1}^G d_{il}^s.$$

Формирование комплексной оценки кандидатов предлагаем осуществлять методом TOPSIS, модификация которого применительно к проблеме оценки персонала подробно описана в работе [14].

Приведем основные шаги алгоритма нечеткой модификации метода TOPSIS с учетом особенностей решаемой нами задачи.

**Шаг 1.** Формирование экспертной комиссией вектора весов важности критериев (качеств):

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n),$$

где  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ .

**Шаг 2.** Для каждого значения  $i=1, \dots, n$  рассчитывается взвешенная оценка:

$$\hat{R}_i^s = (\hat{a}_i^s, \hat{b}_i^s, \hat{c}_i^s, \hat{d}_i^s),$$

где  $\hat{a}_i^s = \bar{a}_i^s \cdot w_i$ ,  $\hat{b}_i^s = \bar{b}_i^s \cdot w_i$ ,  $\hat{c}_i^s = \bar{c}_i^s \cdot w_i$ ,  $\hat{d}_i^s = \bar{d}_i^s \cdot w_i$ .

**Шаг 3.** Нормализация взвешенных оценок на основе метода Hsu и Cehn [15, 16]:

$$\tilde{R}_i^s = (\tilde{a}_i^s, \tilde{b}_i^s, \tilde{c}_i^s, \tilde{d}_i^s),$$

где  $\tilde{a}_i^s = \hat{a}_i^s / d_i^+$ ,  $\tilde{b}_i^s = \hat{b}_i^s / d_i^+$ ,  $\tilde{c}_i^s = \hat{c}_i^s / d_i^+$ ,  $\tilde{d}_i^s = \hat{d}_i^s / d_i^+$ ,  $d_i^+ = \max_s \{\hat{d}_i^s\}$ .

**Шаг 4.** Рассчитываются:

– идеальное негативное решение  $X_i^- = \min_s \{\tilde{a}_i^s\}$ ,  $i=1, \dots, n$ ;

– идеальное позитивное решение  $X_i^+ = \max_s \{\tilde{d}_i^s\} = 1$ .

**Шаг 5.** Расчет расстояний от оценки каждого кандидата до идеального негативного решения:

$$D_s^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\rho_{is}^-)^2},$$

где  $\rho_{is}^- = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( (\tilde{a}_i^s - X_i^-)^2 + (\tilde{b}_i^s - X_i^-)^2 + (\tilde{c}_i^s - X_i^-)^2 + (\tilde{d}_i^s - X_i^-)^2 \right)}$ .

**Шаг 5.** Расчет расстояний от оценки каждого кандидата до идеального позитивного решения:

$$D_s^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\rho_{is}^+)^2},$$

где  $\rho_{is}^+ = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left( (\tilde{a}_i^s - X_i^+)^2 + (\tilde{b}_i^s - X_i^+)^2 + (\tilde{c}_i^s - X_i^+)^2 + (\tilde{d}_i^s - X_i^+)^2 \right)}$ .

**Шаг 6.** Расчет комплексной оценки соответствия каждого кандидата вакантной должности:

$$\varphi(s) = \frac{D_s^-}{D_s^+ - D_s^-}, \quad s=1, \dots, S.$$

**Шаг 7.** Ранжирование кандидатов по возрастанию комплексной оценки. Выбор наилучшего кандидата, интегральная оценка которого максимальна.



## 2. Практические расчеты

Для практической реализации предлагаемого экспертно-тестового механизма разработан программный комплекс, позволяющий автоматизировать все этапы механизма. Для реализации программного комплекса использован язык Python и интегрированная среда разработки PyCharm 2.3.

Рассмотрим пример работы программы для отбора кандидата на должность аналитика данных одной из ИТ-компаний г. Воронежа.

Отбор кандидата на должность в компании осуществляется на основании оценки следующих групп качеств:

- интеллектуальные (внимательность k11, структурированное мышление k12, аналитические способности k13, интеллект k14);
- деловые (добросовестность k21, находчивость k22, ответственность k23, требовательность k24, организаторские способности k25, настойчивость k26, креативность k27);
- эмоционально-волевые (вдумчивость k31, раздражительность k32, агрессивность k33, стрессоустойчивость k34, ассертивность k35, рассудительность k36);
- коммуникативные (коммуникабельность k41, умение четко формулировать мысли k42, умение убеждать k43, дипломатичность k44);
- личностные (объективность k51, рациональность k52, систематичность k53).

Полный список тестов, позволяющих оценить качества кандидата, приведен на рис. 2.

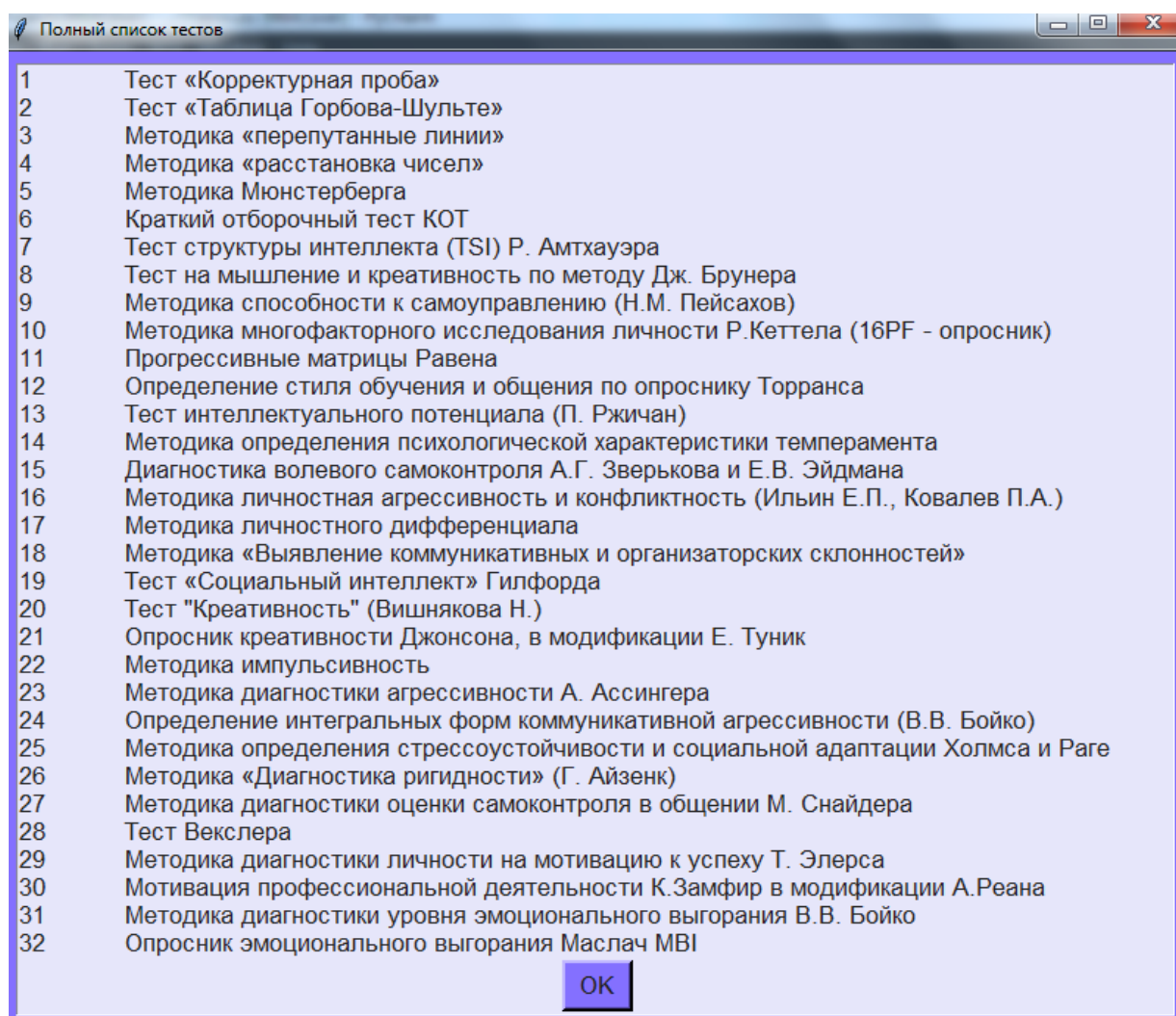


Рис. 2. Полный список тестов  
Fig. 2. Complete list of tests

## Управление в социально-экономических системах

На рис. 3 показаны результаты работы первого этапа механизма и, соответственно, программы. Проведенные расчеты показали, что из 32 тестов для тестирования кандидатов на должность аналитика данных отобрано 6, что существенно меньше исходного количества.

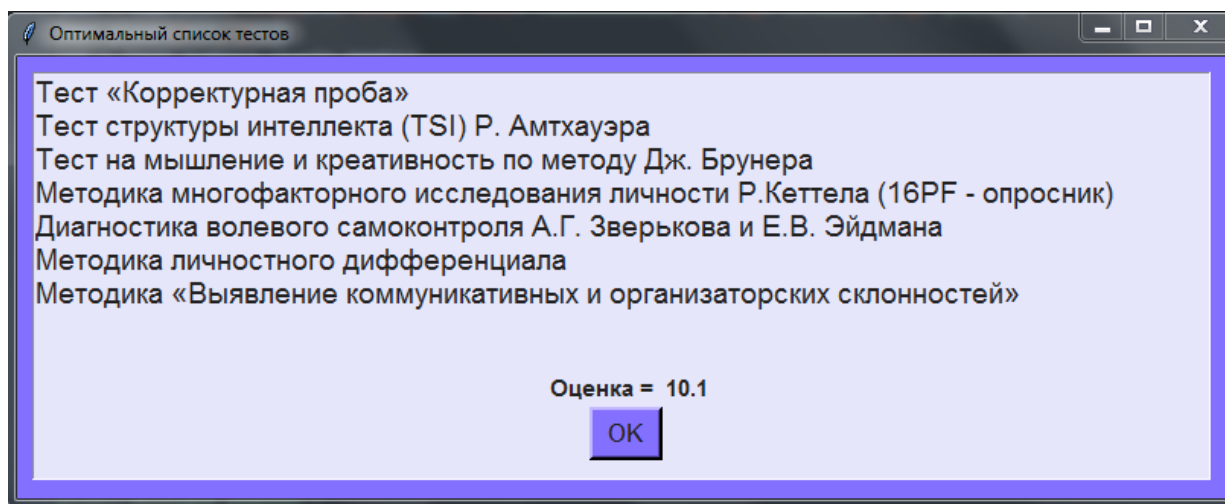


Рис. 3. Результаты выбора пакета тестов  
Fig. 3. Test Package Selection Results

На рис. 4 и 5 приведены результаты тестирования одного из кандидатов по пакету из 6 тестов в форме лингвистических значений и нечетких трапецевидных чисел.

	1	7	8	10	15	17	18
k11	не очень хорошо	хорошо	-	-	-	-	-
k12	-	не очень хорошо	немного слабо	-	-	-	-
k13	-	-	не очень хорошо	очень хорошо	-	-	-
k14	-	-	-	немного слабо	-	-	-
k21	-	-	-	очень хорошо	-	-	-
k22	-	-	-	-	хорошо	-	-
k23	-	-	-	не очень хорошо	-	хорошо	-
k24	-	-	-	-	немного слабо	хорошо	-
k25	-	-	-	-	-	-	хорошо
k26	-	-	-	хорошо	хорошо	-	-
k27	-	-	не очень хорошо	-	-	-	-
k31	-	не очень хорошо	-	-	-	-	-
k32	-	-	-	-	-	хорошо	-
k33	-	-	-	хорошо	-	-	-
k34	-	-	-	-	не очень хорошо	хорошо	-
k35	-	очень хорошо	-	-	очень хорошо	-	-
k36	-	-	-	хорошо	-	-	-
k41	-	-	-	не очень хорошо	-	не очень хорошо	немного слабо
k42	-	хорошо	не очень хорошо	-	-	-	-
k43	-	-	-	-	хорошо	-	-
k44	-	-	-	немного слабо	-	-	-
k51	-	очень хорошо	хорошо	-	-	очень хорошо	-
k52	-	немного слабо	-	-	-	-	-
k53	-	очень хорошо	немного слабо	немного слабо	-	-	-

Рис. 4. Результаты тестирования кандидатов в форме лингвистических значений  
Fig. 4. Results of testing candidates in the form of linguistic values

На финальном этапе работы программы выводятся результаты обработки нечетких результатов прохождения тестов, включённых в оптимальный набор, выбранным кандидатом (см. рис. 5). На основе полученных результатов можно сделать выводы о предпочтительности кандидата на должность.

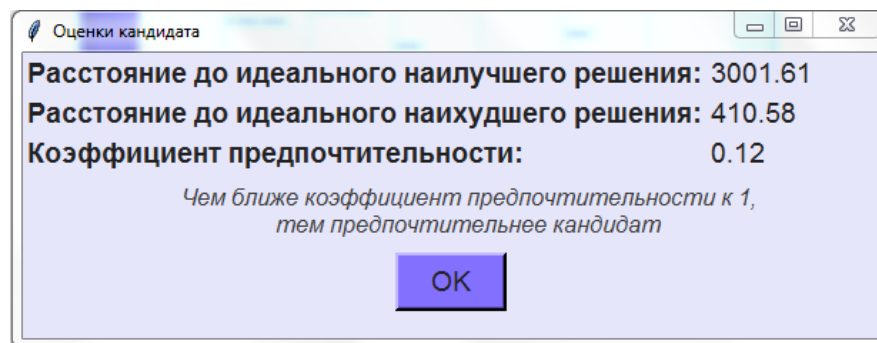


Рис. 5. Выводы о предпочтительности кандидата в числовой форме  
Fig. 5. Conclusions on candidate's preference in numerical form

Таким образом, в результате работы программы получена комплексная оценка кандидата по пакету тестов, значение которой составляет 0,12. Поскольку данное значение является достаточно близким к нулю, то можно сделать выводы о низком соответствии качеств кандидата вакантной должности аналитика данных.

### Заключение

В настоящей статье предлагается экспертно-тестовый механизм формирования комплексной количественной оценки кандидатов на вакантную должность компании. Особенностью предлагаемого подхода является использование пакета тестов, что повышает качество и эффективность оценки. Для выбора оптимального пакета тестов оценки кандидатов сформирована двухкритериальная задача, которая сводится к взвешенной задаче о ранце. Дальнейшая обработка результатов тестирования основана на теории нечетких множеств. Комплексная оценка кандидатов формируется модифицированным методом TOPSIS. Для практической реализации механизма разработан программный комплекс, позволяющий автоматизировать шаги алгоритма. Практическое применение программного продукта в деятельности ИТ-компании г. Воронежа позволило сделать выводы о практической значимости предлагаемого подхода и выявило направления его дальнейшего развития.

### Литература

1. Йеттер, В. Эффективный отбор персонала. Метод структурированного интервью / В. Йеттер. – Харьков: Изд-во «Гуманитарный центр», 2011. – 360 с.
2. Кибанов, А.Я. Управление персоналом организации: стратегия, маркетинг, интернационализация: учеб. пособие / А.Я. Кибанов, И.Б. Дуракова. – М.: Инфра-М, 2009. – 301 с.
3. Фетискин, Н.П. Социально-психологическая диагностика развития личности и малых групп: учеб. пособие / Н.П. Фетискин, В.В. Козлов, Г.М. Мануйлов. – М.: Изд-во Института психотерапии, 2002. – С. 360–362.
4. Бондаренко, Ю.В. Об одном подходе к построению системы стимулирования персонала предприятий и организаций / Ю.В. Бондаренко, А.И. Заволожина, И.Н. Щепина // Экономическое прогнозирование: модели и методы: материалы X науч.-практ. конф. – Воронеж : Изд-во Воронежского государственного университета, 2014. – С. 244–249.
5. Разработка практико-ориентированного алгоритма формирования интегральной оценки компетентности выпускников образовательных направлений / Т.В. Азарнова, Т.Н. Гоголева, А.Г. Гусева, А.С. Демидова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 4. – С. 119–131.
6. Батаршев, А.В. Тестирование. Основной инструментальный практического психолога: учеб. пособие / А.В. Батаршев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2003. – 240 с.
7. Миронова, Е.Е. Сборник психологических тестов / Е.Е. Миронова. – М.: Женский институт ЭНВИЛА, 2006. – 146 с.
8. Ногин, В.Д. Принятие решений при многих критериях / В.Д. Ногин. – СПб.: ЮТАС, 2007. – 104 с.
9. Севастьянов, П.В. Методика многокритериальной иерархической оценки качества в усло-

виях неопределенности / П.В. Севестьянов // Информационные технологии. – 2001. – № 3. – С. 10–13.

10. Чернышова, Г.Д. Дискретные и вероятностные модели: метод. пособие для вузов / Г.Д. Чернышова, И.Н. Булгакова; Воронежский государственный университет. – Воронеж: Издат. дом ВГУ, 2014. – 52 с.

11. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

12. Саати, Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.

13. Карелин, В.П. Модели и методы представления знаний и выработки решений в интеллектуальных информационных системах с нечеткой логикой / В.П. Карелин // Вестник ТИУЭ. – Таганрог, 2014. – С. 75–82.

14. Джабраилова, З.Г. Моделирование процесса выбора кандидатов на вакантные должности с применением нечеткой логики / З.Г. Джабраилова, С.Р. Нобари // Искусственный интеллект: сб. статей. – Баку, 2009. – С. 254–259.

15. Hsu H.M. Fuzzy Credibility Relation Method for Multiple Criteria Decision-Making Problems / H.M. Hsu, C.T. Chen // Information Sciences. – 1997. – Vol. 96, iss. 1–2. – P. 79–91. DOI: 10.1016/S0020-0255(96)00153-3

16. Chen, C.T. A Fuzzy Approach for Supplier Evaluation and Selection in Supply Chain Management / C.T. Chen, C.T. Lin, S.F. Huang // International Journal of Production Economics. – 2006. – Vol. 102, iss. 2. – P. 289–301. DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.03.009

**Бондаренко Юлия Валентиновна**, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет; Воронежский государственный университет; г. Воронеж; bond.julia@mail.ru.

**Горошко Игорь Владимирович**, д-р техн. наук, канд. экон. наук, профессор, заведующий отделом, Университет прокуратуры Российской Федерации, г. Москва; garrygo@mail.ru.

**Васильчикова Екатерина Владимировна**, аспирант, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; evasiltikova@vgasu.vrn.ru.

Поступила в редакцию 29 сентября 2019 г.

---

DOI: 10.14529/ctcr200110

## EXPERT-TEST MECHANISM FOR INTEGRATED ASSESSMENT OF CANDIDATES IN RECRUITMENT OF PERSONNEL

**Yu.V. Bondarenko**<sup>1, 2</sup>, bond.julia@mail.ru,

**I.V. Goroshko**<sup>3</sup>, garrygo@mail.ru,

**E.V. Vasilchikova**<sup>1</sup>, evasiltikova@vgasu.vrn.ru

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,

<sup>2</sup> Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation,

<sup>3</sup> University of the Prosecutor of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

**Introduction.** In the context of an intensive transition to highly productive technologies, the leaders of modern companies pay special attention to the formation of a team of competent, competent employees. In this regard, the task of creating automated mechanisms for the integrated assessment of candidates for the vacant position of a company, which allows providing real support in making informed personnel decisions, becomes urgent. **Aim.** To develop a mechanism for

a comprehensive assessment of candidates for a vacant position, based on a synthesis of expert information and test results for a test suite specially selected for a particular position. **Materials and methods.** The proposed mechanism is based on the use of mathematical methods of optimization and processing of fuzzy expert information. At the first stage of the mechanism, a test package is formed that provides coverage of the required qualities of a vacant position. For its implementation, a two-criteria task is proposed with the following criteria: minimizing the number of tests included in the package and maximizing the sum of the degrees of compliance of the test package with the qualities of the position. The problem is solved by the method of weighted sums and the modified method of branches and boundaries. Based on the solution of the problem, a test package is formed, testing on which allows you to formulate private assessments of the qualities of candidates in various linguistic scales. In order to obtain the quantitative value of a comprehensive assessment, experts form a single linguistic scale that allows you to translate test results into fuzzy numbers. To form a comprehensive assessment, a fuzzy modification of the TOPSIS method was chosen. **Results.** Based on a formalized description of the problem, an expert-test mechanism for a comprehensive assessment of candidates is given, for each stage of which features are described and mathematical methods of implementation are presented. To implement the mechanism in the practical activities of companies, a software package in Python was developed. **Conclusion.** The mechanism proposed in the work was introduced into the activities of one of the IT companies of Voronezh and was well appreciated by specialists. The paper considers an example of the program for the post of data analyst.

*Keywords:* personnel selection, integrated assessment, mechanism, test, mathematical methods, fuzzy information.

### References

1. Jetter V. *Effektivnyy otbor personala. Metod strukturirovannogo interv'yu* [Effective Selection of Personnel. A Method of the Structured Interview]. Kharkiv, Humanitarian Center Publ., 2011, 360 p.
2. Kibanov A.J., Durakova I.V. *Upravlenie personalom organizatsii: Strategiya, marketing, internacionalizatsiya* [Human Resource Management of the Organization: Strategy, Marketing, Internationalization]. Moscow, Infra-M Publ., 2009, 301 p.
3. Fetiskin N.P., Kozlov V.V., Manuylov G.M. *Sotsial'no-psihologicheskaya diagnostika razvitiya lichnosti i malyykh grupp: uchebnoe posobie* [Social and Psychological Diagnostics of Personal Development and Small Groups: Tutorial]. Moscow, Publ. of Institute of Psychotherapy, 2002, 362 p.
4. Bondarenko Yu.V., Zavolozhina A.I., Shchepina I.N. [About one Approach to Creation of a System of Stimulation of Personnel of the Enterprises and the Organizations]. *Ekonomicheskoe prognozirovaniye: Modeli i metody: materialy X nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Economic Forecasting: Models and Methods: Materials of X Scientific and Practical Conference]. Voronezh, 2014, pp. 244–249. (in Russ.)
5. Azarnova T.V., Gogoleva T.N., Guseva A.G., Demidova A.S. *Razrabotka* [Development of the Practice-Focused Algorithm of Formation of Integrated Assessment of Competence of Graduates of the Educational Directions]. *Bulletin of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies*, 2018, no. 4, pp. 119–131. (in Russ.)
6. Batarshhev A.V. *Testirovaniye. Osnovnyy instrumentariy prakticheskogo psihologa* [Testing. The Main Tools of the Practical Psychologist: Tutorial]. Moscow, Delo Publ., 2003, 240 p.
7. Mironova E.E. *Sbornik psihologicheskikh testov* [Collection of Psychological Tests]. Moscow, ENVILA Publ., 2006, 146 p.
8. Nogin V.D. *Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh* [Decision-Making under Many Criteria]. St. Petersburg, YUTAS Publ., 2007, 104 p.
9. Sevest'yanov P.V. *Metodika mnogokriterial'noy ierarkhicheskoy otsenki kachestva v usloviyakh neopredelennosti* [Methodology of Multicriteria Hierarchical Quality Assessment in Conditions of Uncertainty]. *Information Technologies*, 2001, no. 3, pp. 10–13. (in Russ.)
10. Chernyshova G.D., Bulgakova I.N. *Diskretnyye i veroyatnostnyye modeli* [Discrete and Probabilistic Models]. Voronezh, Publ. of VSU, 2014, 52 p.
11. Zade L. *Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy* [A Concept of a Linguistic Variable and its Application to Acceptance of Approximate Solutions]. Moscow, World Publ., 1976, 165 p.
12. Saati T.L. *Prinyatiye resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Decision Making. Hierarchy Analysis Method]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1993, 320 p.

13. Karelin V. P. [Models and Methods of Presentation of Knowledge and Solutions in Intelligent Information Systems with Fuzzy Logic]. *Bulletin of TIUE*, 2014, pp. 75–82. (in Russ.)
14. Dzhabrailova Z.G., Nobari S.R. [Modeling of the Process of Selection of Candidates for Vacant Positions using Fuzzy Logic]. *Artificial Intelligence: St. Articles*, 2009, pp. 254–259. (in Russ.)
15. Hsu H.M., Chen C.T. Fuzzy Credibility Relation Method for Multiple Criteria Decision-Making Problems. *Information Sciences*, 1997, no. 96, pp. 79–91. DOI: 10.1016/S0020-0255(96)00153-3
16. Chen C.T., Lin C.T., Huang S.F. A Fuzzy Approach for Supplier Evaluation and Selection in Supply Chain Management. *International Journal of Production Economics*, 2006, no. 102, pp. 289–301. DOI: 10.1016/j.ijpe.2005.03.009

*Received 29 September 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бондаренко, Ю.В. Экспертно-тестовый механизм комплексной оценки кандидатов при подборе персонала / Ю.В. Бондаренко, И.В. Горошко, Е.В. Васильчикова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 100–110. DOI: 10.14529/ctcr200110

### FOR CITATION

Bondarenko Yu.V., Goroshko I.V., Vasilchikova E.V. Expert-Test Mechanism for Integrated Assessment of Candidates in Recruitment of Personnel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 100–110. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200110

---

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ ПРОЕКТОВ

**С.А. Баркалов, А.Ю. Глушков, С.И. Мусеев**

*Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,*

**Введение.** Управление предприятиями и организациями при помощи проектов – это современный подход в менеджменте, который позволит современным предприятиям эффективно развиваться. В результате проектной деятельности предприятия одним из основных этапов является оценка и отбор лучших проектов из имеющихся. **Цель исследования.** Описание математических моделей и способов их реализации для получения интегральных оценок привлекательности проектов. **Материалы и методы.** В работе описаны методы многокритериального оценивания проектов. Рассмотрен традиционный аддитивный метод, который широко распространен при оценке привлекательности проектов. Альтернативно аддитивному методу представлены два оригинальных метода. Один из них основан на теориях латентных переменных, другой основан на теории нечетких множеств. Метод оценивания привлекательности проектов, основанный на теории нечетких множеств, применяется при невозможности оценить проекты по критериям, использующим натуральные шкалы. Множество проектов с точки зрения привлекательности проектов по каждому критерию рассматривается как нечеткое множество с заданной функцией принадлежности. **Результаты.** Приведена методика получения оценок, проанализированы их свойства. Показано, что метод, основанный на теории латентных переменных, имеет ряд преимуществ перед аддитивным методом: линейность полученных оценок, их независимость от множества проектов и набора критериев. Приведена методика получения численного решения оптимизационной задачи, необходимой при использовании метода, основанного на теории латентных переменных. Проведены вычислительные эксперименты, которые показали, что метод, основанный на теории латентных переменных, дает адекватные оценки привлекательности проектов. Для практической реализации методик приведен пример организации вычислений в MS Excel. **Заключение.** Предложенные методы позволят более объективно оценивать и отбирать проекты, позволяя эффективно развиваться хозяйствующим субъектам.

*Ключевые слова:* проекты, оценивание, латентные переменные, нечеткие множества.

### **Введение**

Управление предприятиями и организациями при помощи проектов – это современный подход в менеджменте, который позволит современным предприятиям эффективно развиваться. На любом предприятии постоянно необходимы инновации: запуск новых изделий в производство, внедрение новых технологий как производственных, так и управленческих. Все это требует разработки и внедрения новых проектов в различных сферах функционирования предприятия.

В результате проектной деятельности предприятия одним из основных этапов является оценка и отбор лучших проектов из имеющихся альтернатив. Целью данной работы является описание математических моделей и способов их реализации для получения интегральных оценок привлекательности проектов, а именно, традиционного метода оценивания и двух оригинальных, основанных на математическом аппарате теории латентных переменных, и теории нечетких множеств. Также задачей данного исследования является анализ полученных оценок и сравнение результатов оценивания с результатами, полученными традиционным методом.

### **Многокритериальное оценивание проектов**

Для оценивания проектов обычно используют многокритериальный подход, когда качество проекта определяется путем сравнения данного проекта с остальными по множеству разработанных критериев.

Выбор критериев обусловлен деятельностью предприятия и типом проекта. Наиболее типичными критериями оценки проектов являются:

- новизна и актуальность проекта;
- техническая и практическая значимость;
- сложность реализации;
- инвестиционная привлекательность;
- наличие квалифицированных исполнителей проекта;
- время реализации проекта;
- уровень коммерциализации;
- социально-экономическое значение результатов проекта;
- потенциал импортозамещения и другие.

Критерии могут быть как количественными, так и качественными. Оценки проектов по количественным критериям выставляются в натуральных шкалах, по качественным критериям оценки получаются на основании экспертного оценивания. По каждому критерию проводится оценивание каждого проекта и на основании частных оценок формируется интегральная оценка каждого проекта.

Рассмотрим некоторые методы получения интегральных оценок привлекательности проектов.

### Математическая модель получения интегральных оценок по аддитивному методу

Рассмотрим сначала классический метод оценивания проектов, а потом опишем метод, основанный на латентных переменных, проведем сравнение полученных оценок.

Пусть имеется  $n$  проектов  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ , которые оцениваются по  $m$  критериям  $K_1, K_2, \dots, K_m$ . Обозначим через  $X_{ij}$  частную оценку  $i$ -го проекта по критерию  $K_j$ . Также, в случае разной важности критериев для итоговой оценки проектов, необходимо задать веса критериев  $w_j$ .

Шкалы измерения проектов по критериям могут быть разного вида: дихотомические, полиномические, непрерывные интервальные и полуинтервальные. Кроме того, критерии могут иметь разную направленность по степени привлекательности проектов: прямую, когда чем больше оценка по критерию, тем более привлекателен проект, и обратную, когда проекты привлекательнее с меньшей оценкой по критерию. Чтобы адекватно получать интегральные оценки проектов, частные оценки по разным шкалам необходимо нормализовать на единую шкалу.

В качестве процедуры нормализации можно использовать приведение частных оценок на прямую единичную шкалу [1]. Для критериев с прямой шкалой нормализованные частные оценки проектов по критериям  $x_{ij}$  можно получить по формуле

$$x_{ij} = \frac{X_{ij} - \min_i(X_{ij})}{\max_i(X_{ij}) - \min_i(X_{ij})}, \quad (1)$$

а для критериев с обратной шкалой – по формуле

$$x_{ij} = \frac{\max_i(X_{ij}) - X_{ij}}{\max_i(X_{ij}) - \min_i(X_{ij})}. \quad (2)$$

В традиционном подходе интегральная оценка качества проекта проводится по аддитивному методу [1], когда интегральная оценка  $AP_i$  проекта  $\Pi_i$  будет определяться как сумма частных оценок, умноженных на веса:

$$AP_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}. \quad (3)$$

Перейдем теперь к описанию модели получения интегральных оценок проектов, которая базируется на теории латентных переменных.

### Математическая модель получения оценок по методу, основанному на латентных переменных (МЛП)

Данный метод основан на математическом аппарате модели Раша оценки латентных переменных, основанных на методе наименьших квадратов [2–4].

Для использования метода допустим, что интегральная оценка  $AP_i$  проекта является некоторой векторной латентной переменной. МЛП предполагает наличие еще одной векторной латентной переменной  $AK_j$ , которая характеризует оценочные критерии. Переменные  $AK_j$  имеют смысл



выполнимости или строгости критерия  $K_j$  на всем множестве оцениваемых проектов. Чем больше оценка  $AK_j$ , тем меньше удовлетворяют все проекты в совокупности указанному критерию.

В соответствии с [4] для получения оценок латентных переменных  $AP_i$  и  $AK_j$  необходимо решать оптимизационную задачу вида

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j \cdot \left( x_{ij} - \frac{e^{AP_i - AK_j}}{1 + e^{AP_i - AK_j}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

которую можно дополнить условием неотрицательности латентных переменных:

$$AP_i \geq 0; \quad AK_j \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Метод, основанный на латентных переменных, имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным аддитивным методом. Перечислим основные преимущества этого метода [5].

1. Интегральные оценки проектов являются их уникальными характеристиками и не зависят от множества проектов и набора критериев.

2. Интегральные оценки проектов измеряются по линейной безразмерной шкале, которую можно легко перевести в любую другую, например, вероятностную оценочную шкалу.

3. Кроме интегральных оценок проектов удастся получить оценки влияния критериев  $AK_j$ , которые также линейны. Эти оценки позволяют проводить анализ критериев по различным группам проектов, выделяя наиболее важные из них.

Основным недостатком оценки по МЛП является невозможность аналитического решения задачи нелинейного программирования (4) и (5). Однако ее можно решить численно, например, в табличном процессоре MS Excel с использованием надстройки «Поиск решений».

Далее приведем методику численного решения оптимизационной задачи (4), (5) в среде Excel на некотором примере.

### Методика получения численных оценок проектов по МЛП

Приведенный ниже пример (данные сгенерированы случайно) позволит описать методику численного решения оптимизационной задачи, необходимой для получения интегральных оценок проектов по МЛП. Кроме этого, проанализируем полученные результаты и сравним их с оценками, полученными по традиционному аддитивному методу.

Предположим, что имеется 10 проектов, которые оцениваются по 8 критериям. В табл. 1 приведены нормализованные по формулам (1) и (2) на единичную шкалу частные оценки проектов по критериям.

Частные оценки проектов по критериям для примера

Таблица 1

Private project evaluations by example criteria

Table 1

Проект	Критерий							
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$
П <sub>1</sub>	0,29	0,19	0,22	0,68	0,14	0,38	0,61	0,04
П <sub>2</sub>	0,01	0,76	0,09	0,05	0,31	0,41	0,10	0,15
П <sub>3</sub>	0,41	0,10	0,55	0,44	0,77	0,31	0,78	0,42
П <sub>4</sub>	0,44	0,79	0,80	0,09	0,73	0,87	0,25	0,06
П <sub>5</sub>	0,71	0,33	0,34	0,07	0,88	0,94	0,04	0,41
П <sub>6</sub>	0,91	0,10	0,52	0,66	0,33	0,45	0,56	0,19
П <sub>7</sub>	0,47	0,48	0,99	0,65	0,85	0,54	0,08	0,61
П <sub>8</sub>	0,68	0,48	0,94	0,41	0,41	0,23	0,82	0,65
П <sub>9</sub>	0,90	0,60	0,16	0,96	0,47	0,38	0,67	0,27
П <sub>10</sub>	0,92	0,33	0,18	0,83	0,47	0,25	0,38	0,96
Вес $W_j$	0,61	0,31	0,34	0,88	0,82	0,47	0,98	0,59

На рабочем листе MS EXCEL вводим данные из табл. 1 в диапазон ячеек A2–I14, как это показано на рис. 1. Под латентные переменные  $AP_i$  выделяем диапазон ячеек A17–A26, а под

## Управление в социально-экономических системах

латентные переменные  $AK_j$  диапазон ячеек B16–I16. В эти ячейки вводим начальное приближение значений переменных, например, в виде нулей. В диапазон B17–I26 вводим формулы, позволяющие рассчитывать слагаемые целевой функции (4). Вводим в B17 формулу  $=B\$14*(B4-EXP(\$A17-B\$16))/(1+EXP(\$A17-B\$16))^2$  и с помощью автоматического заполнения распространяем ее на весь диапазон ячеек. В ячейку E27 вводим сумму (4) в виде формулы  $=СУММ(B17:I26)$ . Результат показан на рис. 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		<b>Интегральная оценка проектов по МЛП</b>							
2		<b>Критерий</b>							
3	<b>Проект</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	<b>K5</b>	<b>K6</b>	<b>K7</b>	<b>K8</b>
4	<b>П1</b>	0,29	0,19	0,22	0,68	0,14	0,38	0,61	0,04
5	<b>П2</b>	0,01	0,76	0,09	0,05	0,31	0,41	0,10	0,15
6	<b>П3</b>	0,41	0,10	0,55	0,44	0,77	0,31	0,78	0,42
7	<b>П4</b>	0,44	0,79	0,80	0,09	0,73	0,87	0,25	0,06
8	<b>П5</b>	0,71	0,33	0,34	0,07	0,88	0,94	0,04	0,41
9	<b>П6</b>	0,91	0,10	0,52	0,66	0,33	0,45	0,56	0,19
10	<b>П7</b>	0,47	0,48	0,99	0,65	0,85	0,54	0,08	0,61
11	<b>П8</b>	0,68	0,48	0,94	0,41	0,41	0,23	0,82	0,65
12	<b>П9</b>	0,90	0,60	0,16	0,96	0,47	0,38	0,67	0,27
13	<b>П10</b>	0,92	0,33	0,18	0,83	0,47	0,25	0,38	0,96
14	<b>Вес W</b>	<b>0,61</b>	<b>0,31</b>	<b>0,34</b>	<b>0,88</b>	<b>0,82</b>	<b>0,47</b>	<b>0,98</b>	<b>0,59</b>
15		<b>Латентные переменные</b>							
16	<b>AP<sub>i</sub>/AK<sub>j</sub></b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
17	<b>0</b>	0,026	0,030	0,027	0,029	0,106	0,006	0,012	0,126
18	<b>0</b>	0,144	0,021	0,055	0,177	0,028	0,003	0,154	0,073
19	<b>0</b>	0,005	0,048	0,001	0,003	0,059	0,018	0,076	0,004
20	<b>0</b>	0,002	0,027	0,030	0,144	0,042	0,063	0,062	0,117
21	<b>0</b>	0,028	0,009	0,009	0,159	0,119	0,092	0,205	0,005
22	<b>0</b>	0,101	0,048	0,000	0,024	0,023	0,001	0,003	0,056
23	<b>0</b>	0,001	0,000	0,079	0,020	0,101	0,001	0,172	0,008
24	<b>0</b>	0,019	0,000	0,065	0,006	0,006	0,033	0,098	0,013
25	<b>0</b>	0,098	0,003	0,038	0,186	0,001	0,007	0,028	0,033
26	<b>0</b>	0,109	0,009	0,034	0,097	0,001	0,028	0,014	0,125
27		<b>Целевая функция (4)</b>			<b>4,032</b>				

Рис. 1. Исходные данные в MS Excel для получения оценок по МЛП  
Fig. 1. Source data in MS Excel for latent variable ratings

Запускаем надстройку «Поиск решений» (Solver), устанавливаем ссылку оптимизации целевой функции на E27, в качестве изменяемых переменных указываем:  $\$A\$17:\$A\$26$ ;  $\$B\$16:\$I\$16$ , дополнительные ограничения не вводим, устанавливаем неотрицательность переменных без ограничений. В диапазоне A17–A26 получаем значения латентных переменных  $AP_i$ , а в диапазоне B16–I16 значения переменных  $AK_j$ .

Результаты оценивания интегральных показателей привлекательности проектов для данных из табл. 1 представлены в табл. 2.

Оценки проектов  $AP_i$ , полученные по данным из табл. 1 разными методами

Таблица 2

$AP_i$  project evaluations obtained from Table 1 using different methods

Table 2

Проект	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10
Аддитивный метод	1,821	0,959	2,632	2,141	2,161	2,484	2,728	2,869	3,006	2,896
МЛП	0,997	0,001	1,692	1,288	1,307	1,566	1,761	1,898	1,989	1,898

Для сравнения интегральных оценок проектов по традиционному аддитивному методу и МЛП нормируем их так, чтобы сумма оценок всех проектов равнялась единице. Графики нормированных оценок, полученных разными методами, приведены на рис. 2.

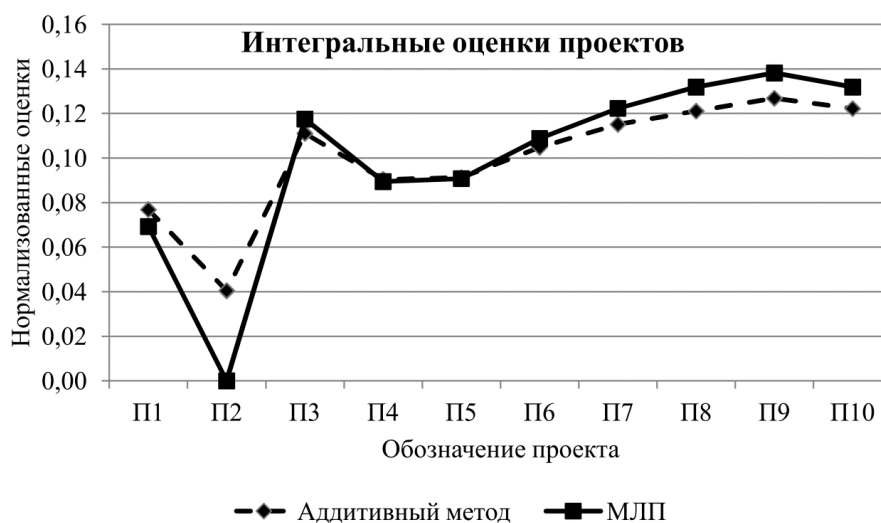


Рис. 2. Нормированные оценки проектов, полученные по данным из табл. 1 разными методами  
Fig. 2. Normalized project estimates obtained from Table 1 using different methods

Из рис. 2 видна высокая согласованность оценок, коэффициент парной корреляции Пирсона для этого примера равен 0,995. Согласованность оценок, полученных по МЛП, с оценками по апробированному аддитивному методу говорит об адекватности оценок, полученных по МЛП.

#### Математическая модель получения оценок по методу, основанному на нечетких множествах (МНМ)

Данный метод основан на несколько ином подходе многокритериального оценивания проектов. Здесь множество проектов рассматривается как нечеткое с точки зрения привлекательности проектов по каждому критерию. Предполагается, что каждому критерию соответствует некоторый показатель  $y$ , индивидуальный для каждого проекта. Каждому показателю критерия  $K_j$  будет соответствовать нечеткое множество с функцией принадлежности  $\mu_j(x)$ . Если для проекта  $\Pi_i$  значение этого показателя равно  $y_i$ , то для частных оценок проектов по критериям можно использовать формулу

$$x_{ij} = \mu_j(y_i). \quad (6)$$

Тогда для оценивания интегральной привлекательности проекта  $AP_i$  можно использовать формулу

$$AP_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_j(y_i). \quad (7)$$

Рассмотрим основные виды функций принадлежности, которые можно использовать при оценивании для разных видов показателя  $y$ . Попробуем рассмотреть основные типы таких критериев и подобрать функции принадлежности для них в общем виде.

*Дихотомический показатель* – представитель четкого множества, когда проект может либо соответствовать критерию, либо не соответствовать. Функция принадлежности при соответствии признака значению  $s$  есть

$$\mu(y) = \begin{cases} 1, & \text{если проект соответствует критерию;} \\ 0, & \text{если проект не соответствует критерию.} \end{cases}$$

*Политомический показатель* отличается от дихотомического тем, что показатель  $y$  может содержать несколько градаций из единичного отрезка, а критерий содержит несколько атрибутов с разными привлекательностями.

Пример такого критерия – «Сложность проекта» (1 – низкая, 0,5 – средняя и 0 – высокая).

*Равномерно распределенный* показатель в некотором интервале. Критерий выполняется, если показатель  $y$  попадает в интервал от  $a$  до  $b$ . Например, если требуется, чтобы время выполнения проекта было не менее  $a$  дней и не более  $b$  дней. Функция принадлежности есть

$$\mu(y) = \begin{cases} 1, & \text{при } y \in [a; b]; \\ 0, & \text{при } y \notin [a; b]. \end{cases}$$

*Линейно возрастающий* на интервале показатель. Используется, если показатель  $y$  был в идеале более  $b$ , но не менее  $a$ . Например, рентабельность проекта должна быть  $b$  рублей и более, если меньше – хуже, но не менее  $a$  рублей. Функция принадлежности будет

$$\mu(y) = \begin{cases} 0, & \text{при } y < a; \\ \frac{y-a}{b-a}, & \text{при } y \in [a; b]; \\ 1, & \text{при } y > b. \end{cases}$$

*Линейно убывающий* на интервале показатель. Аналогичный предыдущему, но для обратных (минимизирующих) критериев с функцией принадлежности вида

$$\mu(y) = \begin{cases} 1, & \text{при } y < a; \\ \frac{b-y}{b-a}, & \text{при } y \in [a; b]; \\ 0, & \text{при } y > b. \end{cases}$$

*Экспоненциально возрастающий* показатель применяется, когда необходимо, чтобы значение  $y$  было максимально большим, не менее  $a$ . Например, инвестиционная привлекательность проекта должна быть не менее  $a$ . Тогда функция принадлежности равна

$$\mu(y) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{y-a}{a}\right), & \text{при } y > a; \\ 0, & \text{при } y \leq a. \end{cases}$$

*Экспоненциально убывающий* показатель аналогичен предыдущему и применяется, когда необходимо, чтобы значение  $y$  было не более  $b$ , например, затраты на проект не должны превышать  $b$ . Тогда функция принадлежности будет

$$\mu(y) = \begin{cases} 1 - \exp\left(\frac{y-b}{\sqrt{b}}\right), & \text{при } y \leq b; \\ 0, & \text{при } y > b. \end{cases}$$

*Треугольный* показатель используется, когда значение  $y$  должно быть из интервала от  $a$  до  $b$ , но наилучшее его значение – в середине интервала. Функция принадлежности равна

$$\mu(y) = \begin{cases} 1 - 2 \frac{|(a+b)/2 - y|}{b-a}, & \text{при } y \in [a; b]; \\ 0, & \text{при } y \notin [a; b]. \end{cases}$$

*Нормально распределенный* показатель аналогичен предыдущему, но используется в случае, когда  $y$  представляет собой случайную величину, распределенную закону Гаусса. Функция принадлежности будет

$$\mu(y) = \exp\left[-8 \frac{(y - (a+b)/2)^2}{(b-a)^2}\right].$$

Следует отметить, что для вычисления интегральных показателей привлекательности проектов вместо аддитивного подхода (7) можно использовать подход, основанный на МЛП (4), (5), но с исходными данными, полученными по (6).

### Заключение

Таким образом, были рассмотрены некоторые методы.

Аддитивный метод является традиционным, его основным достоинством является простота в вычислительном плане.

Метод, основанный на модели Раша оценки латентных переменных, имеет ряд преимуществ перед аддитивным: линейность полученных оценок, их независимость от множества проектов и набора критериев. Его недостаток – невозможность аналитического решения при практическом применении метода. В работе приведено описание методика получения численного решения в среде MS Excel.

Следует также отметить то, что оценивание на основе теории латентных переменных по модели Раша, основанной на МНК, прошло апробацию и в иных сферах научной и практической деятельности. В частности, по этому методу проводилась оценка объектов недвижимости [6], качества программного обеспечения [7] и профпригодности сотрудников организаций [8].

Метод, основанный на теории нечетких множеств, отличается тем, что множество проектов рассматривается как нечеткое с точки зрения привлекательности проектов по каждому критерию и характеризуется некоторой функцией принадлежности.

Какой метод следует применять при оценивании проектов, зависит от специфики проектов, а также вида критериев и типа оценочных шкал.

### **Литература**

1. Баркалов С.А. *Математические методы и модели в управлении и их реализация в MS Excel* / С.А. Баркалов, С.И. Моисеев, В.Л. Порядина. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2015. – 265 с.
2. Маслак А.А. *Модель Раша оценки латентных переменных и ее свойства: моногр.* / А.А. Маслак, С.И. Моисеев. – Воронеж: НПЦ «Научная книга», 2016. – 177 с.
3. Баркалов С.А. *Применение метода наименьших квадратов при оценке латентных переменных методом Раша* / С.А. Баркалов, С.И. Моисеев, Е.В. Соловьева // *Научный вестник Воронежского ГАСУ. Серия «Управление строительством»*. – 2014. – № 1 (6). – С. 112–115.
4. Моисеев С.И. *Модель Раша оценки латентных переменных, основанная на методе наименьших квадратов* / С.И. Моисеев. – *Экономика и менеджмент систем управления. Научно-практический журнал*. – 2015. – № 2.1 (16). – С. 166–172.
5. Маслак А.А. *Сравнительный анализ оценок параметров модели Раша, полученных методами максимального правдоподобия и наименьших квадратов* / А.А. Маслак, С.И. Моисеев, С.А. Осипов // *Проблемы управления*. – 2015. – № 5. – С. 58–66.
6. Смотровая, Т.И. *Маркетинговая модель оценки привлекательности торговых центров* / Т.И. Смотровая, С.И. Моисеев // *Интернет-журнал «Наукоедение»*. – 2015. – Т. 7, № 6. – <http://naukovedenie.ru/PDF/21EVN615.pdf>. DOI: 10.15862/21EVN615
7. Моисеев, С.И. *Модель оценки качества программного обеспечения, основанная на методе Раша оценки латентных переменных* / С.И. Моисеев, Ю.В. Черная, Е.В. Паришина // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. – 2016. – № 1. – С. 102–109.
8. *Модель оценивания профессиональной пригодности работников, основанная на теории латентных переменных* / С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, С.И. Моисеев, Т.В. Насонова // *Экономика и менеджмент систем управления*. – 2017. – № 1.1 (23). – С. 140–150.

**Баркалов Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления строительством, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; barkalov@vgasu.vrn.ru.

**Глушков Александр Юрьевич**, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; alex-maslovra@mail.ru.

**Моисеев Сергей Игоревич**, канд. физ-мат. наук, доцент кафедры управления строительством, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; moiseev@nxt.ru.

*Поступила в редакцию 1 октября 2019 г.*

## MATHEMATICAL METHODS OF MULTICRITERIA EVALUATION OF ATTRACTIVENESS OF PROJECTS

S.A. Barkalov, barkalov@vgasu.vrn.ru,  
A.Yu. Glushkov, alex-maslovra@mail.ru,  
S.I. Moiseev, moiseev@nxt.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

**Introduction.** Management of enterprises and organizations with the help of projects is a modern approach in management, which allows modern enterprises to develop effectively. As a result of the project activity of the enterprise, one of the main stages is the evaluation and selection of the best projects available. **Aim.** Description of mathematical models and methods of their implementation to obtain integral estimates of the attractiveness of projects. **Materials and methods.** The paper describes the methods of projects multi-criteria evaluation. The traditional additive method, which is widely used in assessing the attractiveness of projects, is considered. Two original methods are presented as an alternative to the additive method. One is based on the theories of latent variables, the other is based on the theory of fuzzy sets. The method of evaluating the attractiveness of projects, based on the theory of fuzzy sets, is used when it is impossible to evaluate projects by criteria using natural scales. The set of projects from the point of view of the attractiveness of projects for each criterion is considered as a fuzzy set with a given membership function. **Results.** The technique of obtaining estimates, the analysis of the properties of estimates. It is shown that the method based on the theory of latent variables has a number of advantages over the additive method: the linearity of the estimates obtained, their independence from the set of projects and a set of criteria. A technique for obtaining a numerical solution of the optimization problem required when using a method based on the theory of latent variables is presented. Computational experiments were carried out, which showed that the method based on the theory of latent variables gives adequate estimates of the attractiveness of projects. For the practical implementation of the methods, an example of the organization of calculations in MS Excel. **Conclusion.** The proposed methods will allow for a more objective assessment and selection of projects, allowing economic entities to develop effectively.

*Keywords: projects, estimation, latent variables, fuzzy sets.*

### References

1. Barkalov S.A., Moiseev, V.L., Poryadina S.I. *Matematicheskie metody i modeli v upravlenii i ikh realizatsiya v MS Excel* [Mathematical Methods and Models in Management and Their Implementation in MS Excel]. Voronezh, GASU Publ., 2015, 265 p.
2. Maslak A.A., Moiseev S.I. *Model' Rasha otsenki latentnykh peremennykh i ee svoystva. Monografiya* [The Rush Model Estimates Latent Variables and its Properties. Monograph]. Voronezh, SPC "Scientific Book" Publ., 2016, 177 p.
3. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Solov'yova E.V. [The Use of the Least Squares Method in Assessing Latent Variables by the Rush Method]. *Scientific Bulletin of the Voronezh State Technical University. Ser. "Construction Management"*, 2014, no. 1 (6), pp. 112–115. (in Russ.)
4. Moiseev S.I. [The Rush Model for Estimating Latent Variables Based on the Least Squares Method]. *Economics and Management of Control Systems. Scientific and Practical Journal*, 2015, no. 2.1 (16), pp. 166–172. (in Russ.)
5. Maslak A.A., Moiseev S.I., Osipov S.A. [Comparative Analysis of Estimates of the Parameters of the Rush Model Obtained by the Methods of Maximum Likelihood and Least Squares]. *Problems of Management*, 2015, no. 5, pp. 58–66. (in Russ.)
6. Smotrova T.I., Moiseev S.I. [Marketing Model for Assessing the Attractiveness of Shopping Centers]. *Internet journal "Science"*, 2015, vol. 7, no. 6. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/>

21EVN615.pdf (free access). (in Russ.) DOI: 10.15862/21EVN615

7. Moiseev S.I., Chernaya Yu.V., Parshina E.V. [Software Quality Assessment Model Based on the Rush Method for Evaluating Latent Variables]. *Bulletin of Voronezh State University. Series: System Analysis and Information Technologies*, 2016, no. 1, pp. 102–109. (in Russ.)

8. Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Moiseev S.I., Nasonova T.V. [Model for Assessing the Professional Suitability of Employees Based on the Theory of Latent Variables]. *Economics and Management of Control Systems. Scientific and Practical Journal*, 2017, no. 1.1 (23), pp. 140–150. (in Russ.)

*Received 1 October 2019*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Баркалов, С.А. Математические методы многокритериального оценивания привлекательности проектов / С.А. Баркалов, А.Ю. Глушков, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 111–119. DOI: 10.14529/ctr200111

**FOR CITATION**

Barkalov S.A., Glushkov A.Yu., Moiseev S.I. Mathematical Methods of Multicriteria Evaluation of Attractiveness of Projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 111–119. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctr200111

---

# Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 681.5

DOI: 10.14529/ctcr200112

## СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ УПРАВЛЕНИИ УСТАНОВКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ НЕФТИ

Л.Г. Тугашова<sup>1</sup>, А.В. Затонский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия*

<sup>2</sup> *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Россия*

**Введение.** В настоящее время недостаточно разработаны методы оценки энергетической эффективности малых нефтеперерабатывающих заводов. **Цель исследования:** оптимизация энергетических затрат на разделение нефти. **Материалы и методы.** Представлен алгоритм расчета секционной модели атмосферного блока установки ректификации нефти малой мощности. Полученная модель дополнена расчетом аппарата воздушного охлаждения и кожухотрубного теплообменника. Выбраны факторы, влияющие на энергетические затраты: расход перегретого водяного пара в атмосферную и отпарную колонны, флегмовое число, расход сырья. Для вывода зависимости выбранного критерия от перечисленных факторов применен метод ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента. Составлена матрица планирования четырехфакторного эксперимента с применением секционной модели. Получены результаты проведения эксперимента в программном пакете MATLAB. Выполнена оценка незначимости коэффициентов в полученном уравнении регрессии второго порядка, из модели исключены незначимые коэффициенты. Проведена проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера. Уравнение регрессии, представленное в физических величинах факторов, является целевой функцией. **Результаты.** Построена поверхность выходного параметра в зависимости от управляющих факторов (флегмового числа и расхода перегретого водяного пара в атмосферную колонну) при постоянном расходе сырья и постоянном расходе перегретого пара в отпарную колонну. Показано, что выбранные факторы влияют не только на энергетические затраты, но и на показатели качества нефтепродуктов. Приведены математические модели для определения показателей качества нефтепродуктов (температур начала и конца кипения) на нефтеперерабатывающей установке, использующиеся как ограничения. Предложено применение полученной зависимости для оптимизации энергетических затрат на установке ректификации нефти в условиях меняющегося расхода сырья. **Заключение.** Полученные оптимальные значения факторов могут быть использованы как задания регуляторам на действующей установке.

*Ключевые слова:* энергетические затраты, ректификация нефти, расход перегретого водяного пара, флегмовое число, секционная модель, оптимизация, показатели качества.

### Введение

В деятельности нефтеперерабатывающего предприятия важным фактором является эффективность процессов ректификации установок первичной переработки нефти. Основными показателями эффективности процесса ректификации являются: технико-экономические, технологические, экологические, показатели качества регулирования динамических процессов и др. Степень эффективности оценивается некоторым выбранным критерием, который обычно называют целевой функцией или критерием оптимизации. В настоящее время основными критериями являются отборы светлых нефтепродуктов при ограничениях в виде заданий на их качество или энергетические затраты на разделение при заданных отборах.

Процесс ректификации характеризуется высокими энергетическими затратами. С целью снижения энергетических затрат на фракционирование на установках нефтепереработки применяются сле-



дующие способы: реконструкция или замена контактных устройств для повышения разделительной способности колонны, оптимизация технологических схем [1–3], применение тепловых насосов в составе технологических установок [4], пинч-анализ [5, 6], подбор оптимальных параметров процесса [7, 8] и др. Задача снижения энергозатрат может быть решена не только вышеперечисленными способами, но также путем применения систем управления процессами нефтепереработки и методов математического моделирования.

В работе предложен способ определения зависимости параметров процесса ректификации нефтеперерабатывающей установки (флегмового числа, расходов перегретого пара) от энергетических затрат в условиях переменного расхода сырья.

Разработка данного способа состоит из следующих этапов:

1. Выбор объекта исследования, построение математической модели объекта, разработка имитационной модели в программном пакете.
2. Осуществление метода планирования эксперимента с участием полученной имитационной модели с целью формирования зависимости энергозатрат от выбранных факторов процесса.

### 1. Построение модели объекта

Объектом исследования является атмосферная установка ректификации нефти (мощностью менее 500 тыс. тонн в год). Основным аппаратом установки является атмосферная колонна К-1, к вспомогательным аппаратам относятся аппарат воздушного охлаждения АВО, флегмовая емкость ФЕ, отпарная колонна К-2, кожухотрубный теплообменник Т-1 (рис. 1).

Математическая модель исследуемого объекта основана на уравнениях материального и теплового балансов. Для управления процессом ректификации нефти на атмосферной установке малой мощности используется температура не на всех тарелках, а только на тарелках отбора бензиновой, дизельной фракций, а также мазута. Именно в этих точках измеряется температура на объекте. Поэтому достаточно использовать статическую модель, учитывающую температуру на отборных тарелках и вверху колонны.

Получены уравнения математической модели [9, 10], для чего объект разделен на отдельные секции, для каждой из которых определяется температура. Также необходимо определить фракционный состав сырья (девонской нефти), поступающего на установку. Фракционный состав нефти определен по методике, приведенной в работе [11].

Секционная модель, приведенная в работах [9, 10], частично изменена и дополнена расчетом теплообменных аппаратов. Температуры верхнего и циркуляционных орошений ( $LT$ ,  $LC1$ ,  $LC2$ ) определены из системы уравнений теплового баланса и теплопередачи аппарата АВО и кожухотрубного теплообменника.

Тепловая нагрузка АВО:

$$Q_{\text{АВО}} = LS1 \cdot (h_{T23}^V - h_{TL}^L) + Z \cdot (h_{T23}^z - h_{TL}^z), \quad (1)$$

$$h_{T23}^z = 4,187 \cdot (606,5 + 0,305 \cdot TK + 0,5 \cdot (T23 - TK)),$$

где  $LS1$  – расход бензиновой фракции, кг/с;  $TK$  – температура конденсации водяного пара, °С;  $T23$  – температура на тарелке 23, °С;  $Z$  – расход перегретого водяного пара (сумма  $Z_{\text{AK}}$ ,  $Z_{\text{OK}}$ ,  $Z_{\text{S3}}$ ), кг/с;  $h$  – удельная энтальпия, кДж/кг; верхние индексы:  $V$  – паровая фаза,  $L$  – жидкая фаза,  $Z$  – перегретый водяной пар.

Математическая модель АВО в составе установки ректификации нефти малой мощности учитывает следующие особенности. Жидкая фаза поступает в основную колонну на тарелку питания, паровая фаза – на тарелку выше. По высоте колонны конденсации водяного пара не происходит. Температура конденсации пара меньше, чем температура на верхней тарелке. Следовательно, конденсация происходит только в АВО. Количество отведенного тепла с верха колонны определяется из теплового баланса АВО. Из флегмовой емкости ФЕ отводится водяной конденсат.

Для нахождения температуры конденсации водяного пара  $TK$  сначала нужно найти его парциальное давление. Так как пар отводится с верха колонны, то определим его долю в составе верхнего продукта колонны. Мольная доля водяного пара составила 0,33. Давление верха колонны равно 0,25 МПа. Значит, парциальное давление водяного пара  $P_{\text{вп}} = 0,33 \cdot 0,25 = 0,0825$  МПа (или 627 мм рт. ст.).

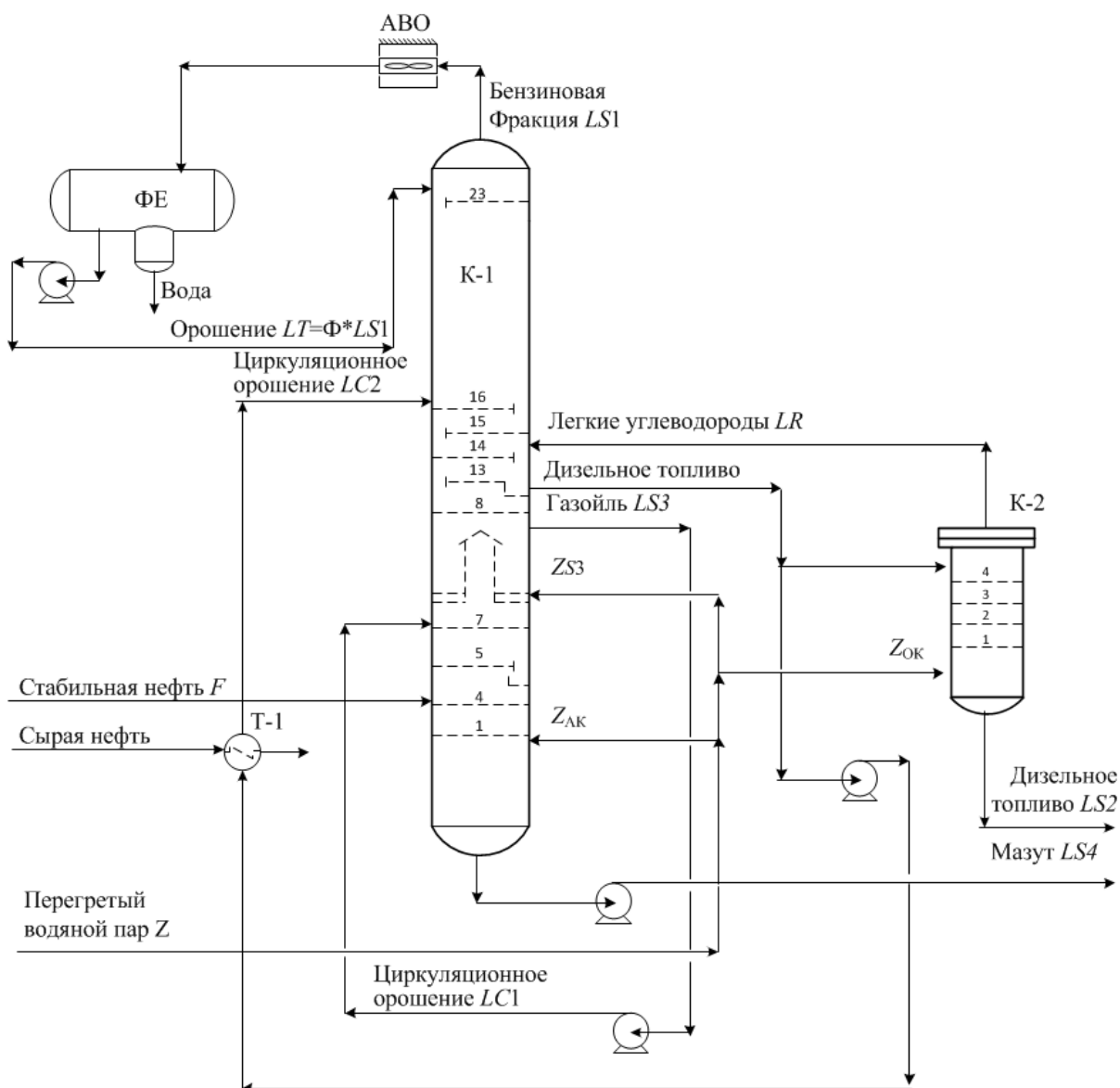


Рис. 1. Схема потоков атмосферной установки ректификации нефти  
Fig. 1. Flow diagram of atmospheric oil rectification plant

Температура конденсации ( $^{\circ}\text{C}$ ) определяется формулой [12]:

$$TK = \frac{1}{0,00397 - 0,0004455 \cdot \lg(P_{\text{вп}})} - 273. \quad (2)$$

Для нахождения температуры бензиновой фракции на выходе АВО и температуры циркуляционного орошения применяется метод последовательных приближений, для чего в начале расчета необходимо задать первое приближение выходной температуры горячего теплоносителя.

Определение температуры конденсации происходит по формуле (2). Затем вычисляются энтальпии паровой фазы бензина при температуре верха, при температуре во флегмовой емкости, энтальпии водяного пара при температуре верха и воды при температуре во флегмовой емкости [12, 13]. Для расчета энтальпий нефтепродуктов применяются уравнения Крэга (для жидкой фазы) и Уэйра – Итона (для паровой фазы) [14]. Из уравнения теплообмена для АВО определяется температура воздуха на выходе. Затем из уравнения теплопередачи необходимо определить расчетную поверхность теплообмена и сравнить ее с заданной. Уравнения теплопередачи, среднего температурного напора, температуры конденсации использовались из источников [12–14].

Заданная поверхность теплообмена принята из технологического регламента действующей установки. Неравенство этих поверхностей означает, что температура нефтепродукта выбрана

неточно. Расчет продолжается до тех пор, пока расхождение расчетной и заданной поверхностей не будет составлять менее 3–5 %. Система нелинейных уравнений теплового баланса и теплопередачи для АВО решалась в MATLAB с применением функции *fsolve*.

В результате выполненного расчета получено, что температура бензиновой фракции на выходе из аппарата составляет 42 °С, температура конденсации – 77 °С, что меньше температуры верха колонны (136 °С), следовательно, конденсации пара вверху колонны не происходит (принято условие, что конденсации водяного пара по высоте колонны не происходит).

На технологической установке для охлаждения сырой нефти циркуляционным орошением LC2 применяется кожухотрубный теплообменник.

Решение системы уравнений АВО и кожухотрубного теплообменника выполняется по схожему алгоритму. На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма расчета секционной модели с учетом выполненных дополнений.

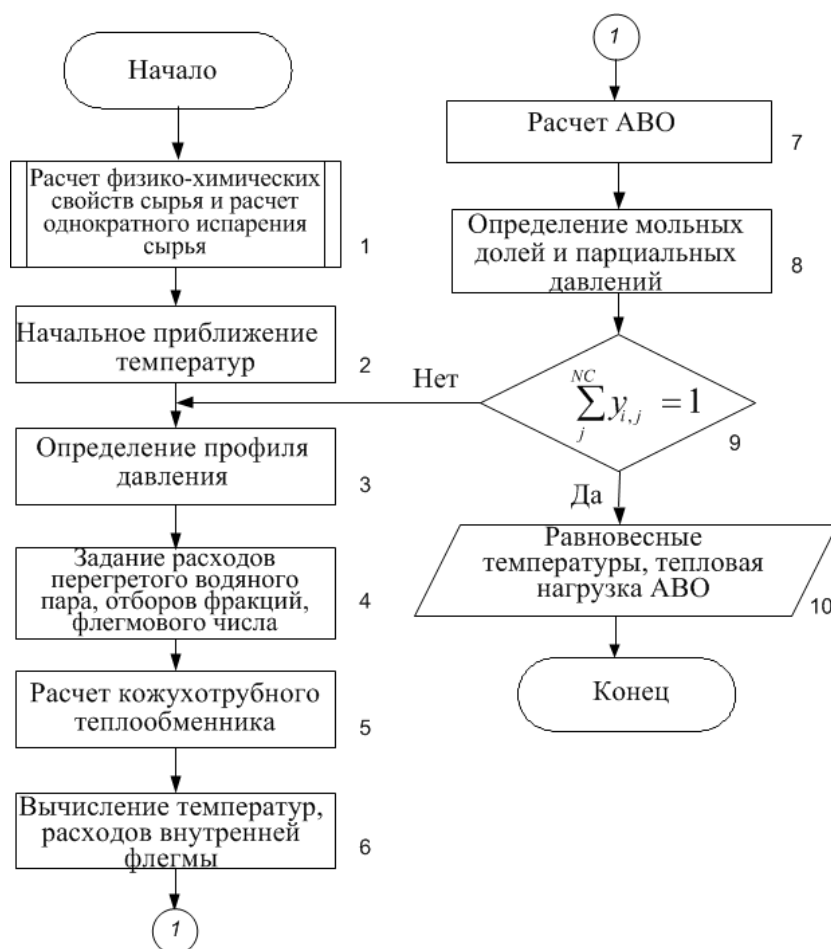


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета секционной модели  
Fig. 2. Flow chart of section model calculation algorithm

В блоке 1 рассчитываются физико-химические свойства фракций [11]. Задаются начальные приближения температур (блок 2). В блоке 3 определяется профиль давления. В блоке 4 задаются расходы перегретого водяного пара, отборы нефтяных фракций, расход сырья, флегмовое число, расходы циркуляционных орошений и острого орошения. Расчет кожухотрубного теплообменника выполняется в блоке 5 аналогично алгоритму расчета АВО.

В блоке 6 из решения системы уравнений балансов для секций бензина, дизельного топлива и газойля [9] определяются температуры на отборных тарелках, верха атмосферной колонны и расходы внутренней флегмы дизельной, газойлевой секций. Затем определяется расход флегмы, поступающей в отпарную секцию.

Температура бензиновой фракции на выходе АВО определяется в блоке 7. Затем в блоке 8

## Автоматизированные системы управления...

определяем мольные доли нефтяных фракций в паровой фазе  $Y_i$  и парциальное давление каждой отбираемой фракции  $P_i$ .

Равновесные температуры находятся из условия, приведенного в блоке 9. Должно выполняться условие: сумма мольных долей всех нефтяных фракций  $NC$  в паровой фазе равна единице. Если условие в блоке 9 не выполняется, то расчет повторяется.

Параметры технологического процесса, определенные по секционной модели в сравнении с номинальным режимом (по проектному решению), приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Параметры технологического режима атмосферной установки  
ректификации нефти малой мощности

Таблица 1

Table 1  
Parameters of the process mode of the atmospheric oil rectification plant

Название технологического параметра	Номинальный статический режим	Секционная модель
Массовый расход сырья, кг/с	12,84	12,84
Температура сырья, °С	354	354
Давление верха колонны, кгс/см <sup>2</sup>	0,6	0,6
Плотность нефти, кг/м <sup>3</sup>	872,2	873,5
Температура флегмы в колонну, °С	43,3	42
Температура верха колонны, °С	134	136
Температура ДТ в отпарную колонну	216	221
Температура газойля, °С	314	312
Температура мазута, °С	331	329

Адекватность модели оценивалась по относительной погрешности при сравнении номинального статического режима и результата моделирования по секционной модели. Определялось расхождение значений температур, полученных на модели, и значений температур по высоте колонны (температуры бензиновой, дизельной фракции, мазута) номинального режима.

Относительная погрешность полученной секционной модели по температурам не превышает 4,3 %.

### 2. Планирование эксперимента

Определим зависимость энергетических затрат от влияющих факторов. Предполагаем, что такая зависимость носит нелинейный характер, поэтому построим квадратичную модель вида [15]:

$$y(\vec{x}) = \sum_{i=0}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (3)$$

где  $b_i$  – коэффициенты влияния одиночных факторов;  $b_{ij}$  – коэффициенты взаимного влияния пар факторов;  $b_{ii}$  – коэффициенты влияния квадратов факторов;  $x_i, x_j$  – кодированные факторы;  $y$  – выходной параметр;  $k$  – число факторов.

Для сокращения числа опытов применяем метод ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента (ОЦКП) второго порядка. Полученная секционная модель объекта необходима для осуществления метода ОЦКП. При построении планов второго порядка используются ортогональные планы первого порядка полного факторного эксперимента (ПФЭ), называемые в этом случае ядром композиционного плана. К ядру плана добавляются дополнительные точки факторного пространства: в центре плана (нулевая точка) и на некотором расстоянии  $d$  от него (звездные точки). Величина  $d$  называется звездным плечом.

Энергетические затраты на разделение состоят из подвода энергии для создания парового потока и затрат на охлаждение и конденсацию потока орошения и нефтепродукта. На атмосферную установку (см. рис. 1) поступает тепло с перегретым водяным паром, а отводится тепло в АВО. Примем в качестве выходного параметра (критерия) тепловую нагрузку АВО  $Q_{\text{АВО}}$  (кДж) (формула (1)). На выходной параметр  $y = Q_{\text{АВО}}$  влияет расход перегретого водяного пара, поступающего в атмосферную ( $Z_{\text{АК}}$ ) и отпарную ( $Z_{\text{ОК}}$ ) колонны, флегмовое число  $\Phi$ . Так как процесс

ректификации нефти идет в условиях изменения расхода сырья, то в качестве четвертого фактора учтем расход нефти, поступающей на установку ( $F$ ).

Таким образом, зависимость энергетических затрат от влияющих факторов принимает следующий вид

$$Q_{ABO} = f(Z_{AK}, Z_{OK}, \Phi, F). \quad (4)$$

Приведем последовательность построения ОЦКП четырехфакторного эксперимента по шагам.

*Шаг 1.* Переход от физических факторов  $\{Z_{AK}, Z_{OK}, \Phi, F\} \in \bar{X}$  к кодированным факторам  $x_i$ .

Необходимо определить центр плана  $X_i^0$ , шаг варьирования  $h_i$ , звездное плечо  $d$ , смещение значений квадратов факторов  $\varphi$ , уровни  $(-d, 1, 0, +1, d)$ .

*Шаг 2.* Построение матрицы планирования.

*Шаг 3.* Определение  $b$ -коэффициентов квадратичного полинома вида (15).

*Шаг 4.* Проверка значимости  $b$ -коэффициентов и исключение из модели незначимых коэффициентов.

*Шаг 5.* Проверка адекватности полученной модели.

*Шаг 6.* Переход к факторам в физических величинах.

Выполним построение зависимости вида (4) методом ОЦКП по вышеперечисленным шагам.

На *шаге 1* определяем связь кодированных и физических факторов [16]:

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{h_i}, \quad (5)$$

где  $x_i$  – значение  $i$ -го кодированного фактора;  $X_i$  – значение  $i$ -го фактора в физических величинах;  $X_i^0$  – среднее значение  $i$ -й физического фактора (центр плана);  $h_i$  – шаг варьирования  $i$ -го физического фактора.

Для каждого фактора  $X_i$  центр плана  $X_i^0$  определяется выражением [16]:

$$X_i^0 = \frac{X_i^{\max} + X_i^{\min}}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (6)$$

Шаг варьирования  $i$ -й физической переменной:

$$h_i = \frac{X_i^{\max} - X_i^{\min}}{2d}. \quad (7)$$

Для случая четырех факторов звездное плечо  $d = 1,414$ ; параметр смещения  $\varphi = 0,8$ ; число точек факторного пространства  $N = 25$  [15]. Следует отметить, что диапазон значений факторов принят для летнего режима установки. Вычисленные параметры ОЦКП приведены в табл. 2.

Параметры ОЦКП

Таблица 2

OCCP parameters

Table 2

Обозначение факторов в физических величинах	$Z_{AK}, \%$	$Z_{OK}, \%$	$\Phi$	$F, \text{кг}/100 \text{кг}$
Границы факторов	[2,1; 2,7]	[4,1; 5,5]	[1,1; 1,5]	[92; 96]
Обозначение кодированных факторов	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Шаг варьирования $h_i$	0,2121	0,495	0,1414	1,414
Уровни:				
$-d$	2,1	4,1	1,1	92
$-1$	2,1879	4,305	1,1586	92,586
$0$	2,4	4,8	1,3	94
$+1$	2,6121	5,295	1,4414	95,414
$d$	2,7	5,5	1,5	96

Согласно *шагу 2* вышеприведенной последовательности с учетом найденных на шаге 1 параметров ОЦКП составляем план проведения эксперимента и матрицу планирования (табл. 3). Значения выходного параметра  $u$  определяются по секционной модели.

Таблица 3

Table 3

Матрица планирования и результаты ОЦКП

Planning matrix and OSCP results

№ точки	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1^2 - \varphi$	$x_2^2 - \varphi$	$x_3^2 - \varphi$	$x_4^2 - \varphi$	$x_1, x_2$	$x_1, x_3$	$x_1, x_4$	$x_2, x_3$	$x_2, x_4$	$x_3, x_4$	$y$
Точки ПФП (2N)	1	+1	+1	+1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	+1	+1	+1	+1	+1	15140
	2	+1	-1	-1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	-1	-1	-1	-1	-1	13739
	3	+1	+1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	14715
	4	+1	-1	+1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	+1	-1	-1	+1	+1	14660
	5	+1	+1	-1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	+1	-1	-1	-1	+1	14975
	6	+1	-1	+1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	+1	+1	+1	-1	14751
	7	+1	+1	+1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	15767
	8	+1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	+1	+1	+1	+1	+1	14462
	9	+1	+1	-1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	14559
	10	+1	-1	+1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	-1	+1	+1	14333
	11	+1	+1	+1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	+1	+1	+1	-1	+1	15296
	12	+1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	14046
	13	+1	+1	+1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	15566
	14	+1	-1	-1	+1	0,2	0,2	0,2	0,2	+1	-1	+1	-1	-1	-1	14145
	15	+1	+1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	-1	+1	+1	15166
	16	+1	-1	+1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	15048
Нулевая точка	+1	0	0	0	0	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	14903
Узловые точки (2N)	18	+1	+1,414	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	15230
	19	+1	-1,414	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	14578
	20	+1	0	+1,414	0	0	-0,8	1,2	-0,8	0	0	0	0	0	0	15318
	21	+1	0	-1,414	0	0	-0,8	1,2	-0,8	0	0	0	0	0	0	14484
	22	+1	0	0	+1,414	0	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0	14795
	23	+1	0	0	-1,414	0	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0	15141
	24	+1	0	0	0	+1,414	-0,8	-0,8	0,8	1,2	0	0	0	0	0	14605
	25	+1	0	0	0	-1,414	-0,8	-0,8	0,8	1,2	0	0	0	0	0	15213

На шаге 3 определяем  $b$ -коэффициенты уравнения регрессии в виде квадратичного полинома, построенного по данным ОЦКП [17]:

$$y(\bar{x}) = b_0^* + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} (x_i^2 - \varphi). \quad (8)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (8) вычисляем по формулам:

$$b_0^* = \frac{\sum_{u=1}^N x_{0u} y_u}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{20}; \quad i = \overline{1, k}; \quad (9)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{16}; \quad i \neq j; \quad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N (x_i^2 - \varphi) y_u}{8}.$$

Рассчитанные значения коэффициентов подставим в уравнение (8):

$$y(\bar{x}) = 12890,33 + 346,09x_1 + 296,66x_2 - \dots - 122,06x_3 + 212,58x_4 - 26,2(x_1^2 - \varphi) - \dots - 26,81(x_2^2 - \varphi) + 2372,04(x_3^2 - \varphi) + \dots + 25,20(x_4^2 - \varphi) - 2,87x_1x_2 + 34,01x_1x_3 + \dots + 8,50x_1x_4 - 0,63x_2x_3 + 0,88x_2x_4 - 3x_3x_4. \quad (10)$$

По известным формулам [18] выполняем проверку незначимости  $b$ -коэффициентов с помощью критерия Стьюдента:

$$t_{bi} = \frac{|b_i|}{s_{bi}} < t_{\text{табл}}, \quad (11)$$

где  $s_{bi}$  – среднее квадратическое отклонение коэффициентов ( $i = 0, 1, \dots, 15$ ).

В случае выполнения неравенства (11)  $b$ -коэффициент считается статистически незначимым. Табличное значение критерия Стьюдента в MATLAB можно определить с помощью функции  $\text{tinv}(\alpha, f_1)$ . Среднее квадратическое отклонение разных  $b$ -коэффициентов различно:

$$s_{b_0^*} = 61,65; \quad s_{b_i} = 76,88; \quad s_{b_{ij}} = 192,21; \quad s_{b_{ii}} = 96,10.$$

На шаге 4 по условию (11) коэффициенты  $b_3, b_{11}, b_{22}, b_{44}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$  оказались незначимыми, поэтому исключаем их одновременно из уравнения (10).

Затем переходим к уравнению регрессии в стандартной форме [17]:

$$y(\bar{x}) = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (12)$$

$$b_0 = b_0^* x_0 - \varphi \sum_{i=1}^k b_{ii},$$

$$y(\bar{x}) = 12890,33 + 346,09x_1 + \dots + 296,66x_2 + 212,58x_4 + 2372,04x_3^2.$$

Так как эксперимент проводился не на объекте или экспериментальной установке, а на компьютерной модели, то проведение параллельных опытов приводит к одинаковым результатам, поэтому принимаем, что параллельных опытов нет.

В этом случае проверку адекватности модели (12) с исключенными незначимыми коэффициентами выполняем по известной формуле [18] с помощью критерия Фишера:

$$\frac{s_{\text{ср}}^2}{s_R^2} > F_{\text{табл}}, \quad (13)$$

где  $s_{\text{ср}}^2$  – дисперсия среднего;  $s_R^2$  – остаточная дисперсия.

Табличное значение критерия Фишера можно определить с помощью функции  $\text{finv}(\alpha, f_1, f_2)$ . Результаты выполнения шага 5 следующие.  $F_{\text{табл}} = \text{finv}(0,95; 3, 20) = 3,0984$ . Расчетное значение отношений дисперсий составляет 63,4124. Условие (13) выполняется, следовательно, модель адекватна.

После определения адекватности модели с учетом формулы (12) переходим к уравнению регрессии в физических факторах [15]:

$$\hat{Y} = B_0 + \sum_{i=1}^k B_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k B_{ii} X_i^2. \quad (14)$$

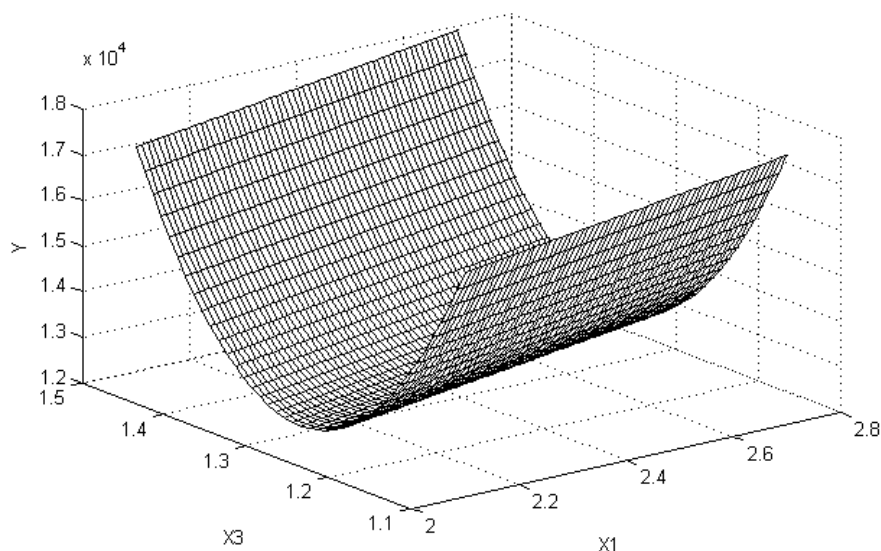
Таким образом, в результате проведенного эксперимента получена зависимость следующего вида (для летнего режима работы):

$$Y(\bar{X}) = 192436,01 + 1631,76X_1 + 599,32X_2 + \dots + 150,341X_4 + 118637,82X_3^2 - 308458,35X_3 \quad (15)$$

или в обозначениях (4):

$$Q_{\text{ЛВО}} = 192436,01 + 1631,76Z_{\text{АК}} + 599,32Z_{\text{ОК}} + \dots + 150,341F + 118637,82\Phi^2 - 308458,35\Phi.$$

Как видим из зависимостей (12), (15), наибольшее влияние на энергетические затраты оказывает флегмовое число. На рис. 3 приведена поверхность выходного параметра  $Y$  при варьировании двух факторов – расхода перегретого водяного пара в атмосферную колонну  $X_1$  и флегмового числа  $X_3$  при постоянном расходе сырья  $X_4 = 94$  кг/100 кг и расходе перегретого водяного пара в отпарную колонну  $X_2 = 4,8$  %.



**Рис. 3. Поверхность выходного параметра при постоянных значениях  $X_4 = 94$  кг/100 кг и  $X_2 = 4,8$  %**  
**Fig. 3. Output parameter surface at Constant values  $X_4 = 94$  kg/100 kg and  $X_2 = 4,8$  %**

Полученная зависимость (15) может применяться для нахождения значений факторов  $X$ , обеспечивающих минимум функции  $Y$ .

От значения флегмового числа, расхода перегретого пара зависят как энергетические затраты, так и качество вырабатываемых нефтепродуктов, поэтому необходимо учитывать ограничения, определяющие зависимость показателей качества от технологических параметров [19]:

$$T_{\text{ккб}} = k_1 + k_2 \cdot F_6 - k_3 \cdot LT + k_4 \cdot T_B; \quad (16a)$$

$$T_{\text{нкдт}} = k_5 + k_6 \cdot Z_{\text{ОК}} - k_7 \cdot T13; \quad (16б)$$

$$T_{\text{ккдт}} = k_8 - k_9 \cdot LC2 - k_{10} \cdot LT + k_{11} \cdot F_{\text{дт}} + k_{12} \cdot T13; \quad (16в)$$

где  $T_{\text{ккб}}$ ,  $T_{\text{нкдт}}$ ,  $T_{\text{ккдт}}$  – температуры начала кипения, конца кипения бензиновой, дизельной фракций, °С;  $F_6$ ,  $F_{\text{дт}}$ ,  $Z_{\text{ОК}}$  – расходы бензиновой, дизельной фракций, перегретого водяного пара в отпарную колонну, кг/с;  $LT$ ,  $LC2$  – расход острого и циркуляционного орошений, кг/с;  $T_B$  – температура верха колонны, °С;  $T13$  – температура выхода дизельной фракции, °С;  $k_1$ – $k_{12}$  – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов (МНК).

Таким образом, минимум энергетических затрат (тепловой нагрузки АВО)  $Y$  (15) можно определить при заданном расходе сырья (нефти)  $F$  при выполнении ограничений (16a)–(16в) на показатели качества нефтепродуктов. Задача оптимизации с ограничениями может быть решена



в MATLAB, например, с помощью функции *fmincon* [20]. Полученные значения факторов могут быть использованы в качестве заданий регуляторам расходов на установке ректификации нефти.

### Выводы

Таким образом, с применением усовершенствованной секционной модели блока установки ректификации нефти малой мощности получена зависимость энергетических затрат от влияющих факторов (флегмового числа, расходов перегретого водяного пара в атмосферную и отпарную колонну, расхода сырья). Для вывода вышеназванной зависимости применен метод ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента второго порядка. Выполнена проверка адекватности полученной модели. Так как выбранные факторы влияют не только на энергетические затраты, но и на показатели качества нефтепродуктов, необходимо использовать выражения для показателей качества нефтепродуктов в качестве ограничений. Полученная зависимость может быть использована для решения оптимизации энергетических затрат на установке ректификации нефти в условиях меняющегося расхода сырья и последующего использования найденных значений факторов в качестве уставок регуляторам.

### Литература

1. Ясавеев, Х.Н., Лантев А.Г., Фарахов М.И. Модернизация установок переработки углеводородных смесей / Х.Н. Ясавеев, А.Г. Лантев, М.И. Фарахов. – Казань: Изд-во «ФЭН», 2004. – 307 с.
2. Панкрушина, А.В. Инициализация параметров расчета и оценка эффективности комплексов с частично и полностью связанными тепловыми и материальными потоками / А.В. Панкрушина, О.В. Перерва, Т.Н. Гартман // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2017. – Т. 4. – С. 66–68.
3. Reyes-Labarta, Juan A. A hybrid simulation-optimization approach for the design of internally heat-integrated distillation columns / Juan A. Reyes-Labarta, Miguel A. Navarro, José A. Caballero // 12 AIChE Annual Meeting. – 2012. DOI: 10.1016/B978-0-444-59520-1.50110-X
4. Хоменков, А.С. Энергосбережение в процессах ректификации с применением тепловых насосов / А.С. Хоменков, С.И. Ильина // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. XXXI, № 5. – С. 17–19.
5. Ганеев, А.Р. Современное состояние установок переработки нефти. Оптимизация теплообменной системы на действующей установке ЭЛОУ-АВТ с использованием пинч-анализа / А.Р. Ганеев, А.Г. Сладовский, О.Ю. Сладовская // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2018. – № 6. – С. 33–37.
6. Тугашова, Л.Г. Способ повышения энергоэффективности технологических установок / Л.Г. Тугашова, Д.Л. Гильманова, Г.Х. Сафиуллина // Управление техносферой. – 2018. – Т.1, № 4. – С. 362–371.
7. Определение оптимальных параметров греющего пара на установках фракционирования нефти / М.А. Самборская, В.П. Гусев, И.А. Грязнова, А.В. Вольф // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (59). – С. 157–168. DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-157-168
8. Gadalla, Mamdouh A. Optimization of Existing Heat-Integrated Refinery Distillation Systems / Mamdouh A. Gadalla, Megan Jobson, Robin Smith // Chemical Engineering Research and Design. – 2003. – Vol. 81. – P. 147–152. DOI: 10.1205/026387603321158302
9. Тугашова, Л.Г. Моделирование системы управления ректификационной колонной в среде Matlab / Л.Г. Тугашова // Новый Университет. – 2016. – № 8–9 (54–55). – С. 18–24.
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017616335 Российская Федерация. Моделирование статических и динамических режимов процесса ректификации нефти / Л.Г. Тугашова. – 17.04.2017.
11. Затонский, А.В. Моделирование статического режима процесса ректификации с идентификацией состава и свойств нефти / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 6. – С. 109–116. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-6-109-116
12. Затонский, А.В. Внешние связи информационной модели системы управления техниче-

ским состоянием оборудования / А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, П.В. Плехов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2009. – № 7. – С. 78–79.

13. Гайле, А.А., Пекаревский Б.В. Расчет ректификационных колонн / А.А. Гайле, Б.В. Пекаревский. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2007. – 86 с.

14. Технология переработки нефти. В 2 ч. Ч. 1: Первичная переработка нефти / под ред. О.Ф. Глаголевой, В.М. Капустина. – М.: Химия: КолосС, 2006. – 400 с.

15. Петков, А.А. Ортогональное центральное композиционное планирование в технике и электрофизике высоких напряжений: учеб.-метод. пособие / А.А. Петков. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 61 с.

16. Макаричев, Ю.А. Методы планирования эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

17. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химической технологии / В.В. Кафаров. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Химия, 1971. – 496 с.

18. Гартман, Т.Н. Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов / Т.Н. Гартман, Д.В. Клушин. – М.: Академкнига, 2008. – 416 с.

19. Тугашова Л.Г. Прогнозирование показателей качества нефтепродуктов на установках первичной переработки нефти // *Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института*. – 2015. – Т. XIV, № 1. – С. 99–103.

20. Затонский, А.В. Моделирование объектов управления в MatLab: учеб. пособие / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова. – СПб.: Лань, 2019. – 144 с.

**Тугашова Лариса Геннадьевна**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск; tugashova@yandex.ru.

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Березниковский филиал Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Березники; zxenon@narod.ru.

*Поступила в редакцию 28 ноября 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr200112

## REDUCTION OF ENERGY COSTS BY OIL RECTIFICATION PLANT CONTROL

L.G. Tugashova<sup>1</sup>, tugashova@yandex.ru,

A.V. Zatonский<sup>2</sup>, zxenon@narod.ru

<sup>1</sup> Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation

**Introduction.** Methods for assessing the energy efficiency of small oil refineries are not sufficiently developed currently. **Aim** is an optimizing the energy costs of oil separation. **Materials and methods.** An algorithm for calculating the sectional model of the atmospheric unit of a low-power oil distillation unit is presented. The resulting model is supplemented by the calculation of an air-cooling apparatus and a shell-and-tube heat exchanger. The factors affecting energy costs were selected: the consumption of superheated water vapor in the atmospheric and stripping columns, reflux ratio, and the consumption of raw materials. To derive the dependence of the selected criterion on the listed factors, the method of orthogonal central compositional planning of the experiment was applied. A planning matrix for a four-factor experiment using the sectional model is compiled. The results of the experiment have been obtained in the MATLAB software package. An estimation

of the insignificance of the coefficients in the obtained second-order regression equation is carried out; insignificant coefficients are excluded from the model. The adequacy of the model was verified using the Fisher criterion. The regression equation represented in the physical quantities of the factors is the objective function. **Results.** The surface of the output parameter is constructed depending on control factors (reflux number and flow rate of superheated water vapor into the atmospheric column) with a constant flow of raw materials and a constant flow of superheated steam into the stripping column. It is shown that the selected factors affect not only energy costs, but also the quality indicators of petroleum products. Mathematical models are given for determining the quality indicators of oil products (temperatures of the beginning and end of boiling) at an oil refinery, which are used as limitations. The application of the obtained dependence is proposed for optimizing energy costs at an oil distillation unit with a changing consumption of raw materials. **Conclusion.** The obtained optimal values of the factors can be used as tasks for the regulators on the current installation.

*Keywords:* energy costs, oil distillation, consumption of superheated water vapor, reflux ratio, sectional model, optimization, quality indicators.

### References

1. Yasaveev Kh.N., Laptev A.G., Farakhov M.I. *Modernizatsiya ustanovok pererabotki uglevodородnykh smesey* [Modernization of Hydrocarbon Mixture Processing Plants]. Kazan, "FEN" Publ, 2004, 307 p.
2. Pankrushina A.V., Pererva O.V., Gartman T.N. [Initialization of Calculation Parameters and Evaluation of Efficiency of Complexes with Partially and Fully Connected Thermal and Material Flows]. *Mathematical Methods in Engineering and Technology*, 2017, vol. 4, pp. 66–68. (in Russ.)
3. Juan A. Reyes-Labarta, Miguel A. Navarro, José A. Caballero. A Hybrid Simulation-Optimization approach for the Design of Internally Heat-Integrated Distillation Columns // 12 AIChE Annual Meeting, 2012. DOI: 10.1016/B978-0-444-59520-1.50110-X
4. Khomenkov A.S., Ilina S.I. [Energy Saving in Rectification Processes Using Heat Pumps]. *Successes in Chemistry and Chemical Technology*, 2017, vol. XXXI, no. 5, pp. 17–19. (in Russ.)
5. Ganeev A.R., Sladovskiy A.G., Sladovskaya O.Y. [Modern State of Oil Refining Plants. Optimization of Heat Exchange System at Operating ELOU-AVT Plant Using Pinch Analysis]. *Oil Refining and Petrochemicals*, 2018, no. 6, pp. 33–37. (in Russ.)
6. Tugashova L.G., Gilmanova D.L., Safiullina G.H. [Method of Improving Energy Efficiency of Process Plants]. *Technosphere Management*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 362–371. (in Russ.)
7. Samborskaya M.A., Gusev V.P., Glodnova I.A., Wolf A.V. [Determination of Optimal Parameters of Heating Steam at Oil Fractionation Plants]. *Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2015, no. 2 (59), pp. 157–168. (in Russ.) DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-157-168
8. Mamdouh A. Gadalla, Megan Jobson, Robin Smith. Optimization of Existing Heat-Integrated Refinery Distillation Systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, vol. 81, pp. 147–152. DOI: 10.1205/026387603321158302
9. Tugashova L.G. [Simulation of Rectification Column Control System in Matlab]. *New University Environment*, 2016, no. 8–9 (54–55), pp. 18–24. (in Russ.)
10. Tugashova L.G. *Modelirovanie staticheskikh i dinamicheskikh rezhimov protsessa rektifikatsii nefiti* [Modeling of Static and Dynamic Modes of Oil Rectification Process]. Certificate of Registration of the Computer Program of RUS 2017616335, 17.04.2017.
11. Zatonsky A.V., Tugashova L.G. [Modeling of Static Mode of Rectification Process with Identification of Oil Composition and Properties]. *News of Higher Educational Institutions. Oil and Gas. Tyumen State Oil and Gas University*, 2015, no. 6, pp. 109–116. (in Russ.) DOI: 10.31660/0445-0108-2015-6-109-116
12. Zatonsky A.V., Becker V.F., Plehov P.V. [External Relations of Information Model of Equipment Technical State Management System]. *Modern Knowledge-Intensive Technologies*, 2009, no. 7, pp. 78–79. (in Russ.)
13. Gayle A.A., Pekarevskiy B.V. *Raschet rektifikatsionnykh kolonn* [Calculation of Rectification Columns]. St. Petersburg, SPbGTI Publ., 2007, 86 p.
14. *Tekhnologiya pererabotki nefiti. V 2 ch. Ch. 1: Pervichnaya pererabotka nefiti* [Technology of Oil Refining. In 2 parts. Part 1: Primary Oil Processing]. Moscow, Chemistry, ColosS Publ., 2006, 400 p.

15. Petkov A.A. *Ortogonal'noe tsentral'noe kompozitsionnoe planirovanie v tekhnike i elektrofizike vysokikh napryazheniy: ucheb.-metod. posobie* [Orthogonal Central Compositional Planning in High Voltage Engineering and Electrophysics: Tutorial]. Kharkov, NTU "HPI" Publ., 2007, 61 p.

16. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. *Metody planirovaniya eksperimenta i obrabotki dannykh: uchebnoe posobie* [Methods of Experiment Planning and Data Processing: Tutorial]. Samara, Samar. State Techn. Univ. Publ., 2016, 131 p.

17. Kafarov V.V. *Metody kibernetiki v khimicheskoy tekhnologii* [Methods of Cybernetics in Chemical Technology]. Moscow, Chemistry Publ., 1971, 496 p.

18. Gartman T.N., Klushin D.V. *Osnovy komp'yuternogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Basics of Computer Modeling of Chemical and Technological Processes: Tutorial for Universities]. Moscow, Akademkniga Publ., 2008, 416 p.

19. Tugashova L.G. [Forecasting of Oil Products Quality Indicators at Crude Oil Processing Plants]. *Scientists of the Note of Almet'yevsk State Oil Institute*, 2015, vol. XIV, no. 1, pp. 99–103. (in Russ.)

20. Zatonский A.V., Tugashova L.G. *Modelirovanie ob"ektov upravleniya v MatLab: uchebnoe posobie* [Modeling of Control Objects in MatLab: Tutorial]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019, 144 p.

*Received 28 November 2019*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тугашова, Л.Г. Снижение энергетических затрат при управлении установкой ректификации нефти / Л.Г. Тугашова, А.В. Затонский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 120–132. DOI: 10.14529/ctcr200112

### FOR CITATION

Tugashova L.G., Zatonский A.V. Reduction of Energy Costs by Oil Rectification Plant Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 120–132. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200112

# ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ ПРОДУКЦИОННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Д.А. Истомин<sup>1</sup>, В.Ю. Столбов<sup>1</sup>, Д.Н. Платон<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup> ООО «Нафта Эксперт», г. Пермь, Россия

**Введение.** Оценка состояния узлов электроцентробежных насосов является одной из множества задач, которые необходимо решить для повышения эффективности бизнес-процессов нефтедобычи. Повышение эффективности процессов мониторинга состояния и прогнозирования отказов электроцентробежных насосов зачастую требует разработки специального математического и информационного обеспечения. **Цель исследования.** Проработка вопросов применения экспертных систем для оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе полученных знаний. **Материалы и методы.** Экспертная система рассматривается в качестве вспомогательного инструмента, минимизирующего ошибки, связанные с ложным срабатыванием предиктивной аналитики. Экспертная система на основе трендов по каждому показателю электроцентробежного насоса (давление, вибрация, сила тока и т. д.) формирует оценку технического состояния, например, диагностируя определенный вид неисправности. Для хранения знаний в экспертной системе рассматриваются фреймы и продукции. Детально рассмотрен продукционный способ представления знаний и предложена возможность применения нечеткого логического вывода. **Результаты.** Исследованы возможности экспертных систем, основанных на знаниях, включая модели представления знаний с учетом нечеткости информации и алгоритмы логического вывода. Обосновано применение продукционной модели представления знаний экспертов, показано применение теории нечетких множеств для обработки знаний экспертов. Предложена концепция интеллектуальной информационной системы, включающей экспертную систему поддержки принятия решений, основанную на знаниях, а также блок предварительной и глубокой обработки данных, включая компонент предиктивной аналитики, основанный на нейросетевых технологиях. Представлен демонстрационный пример применения экспертной системы, а также рассмотрены особенности ее реализации в оболочке FuzzyCLIPS. **Заключение.** Исследуемые методы и модели апробированы на реальных данных, что подтверждает возможность их использования при разработке интеллектуальной информационной системы.

*Ключевые слова:* электроцентробежный насос, техническое состояние, экспертная система, представление знаний, продукционные знания, фреймы, логический вывод, нечеткие множества, CLIPS, FuzzyCLIPS.

## Введение

Автоматизированная оценка состояния узлов электроцентробежных насосов (ЭЦН) является одной из важных задач, которые необходимо решить для повышения эффективности бизнес-процессов нефтедобычи. Повышение эффективности процессов мониторинга состояния [1] и прогнозирования отказов ЭЦН зачастую требует разработки специального математического и информационного обеспечения.

В настоящее время в мире бурно развиваются методы искусственного интеллекта (ИИ), включая предиктивную аналитику [2], основанную на глубокой обработке данных (data mining) с помощью машинного обучения и нейросетевых технологий. Однако количество подобных методов, введенных в промышленную эксплуатацию, достаточно невелико [3, 4].

В создании интеллектуальных информационных систем (ИИС) заинтересованы и многие крупные российские нефтегазовые компании. Кроме того, для выявления возможных аномалий в работе оборудования необходимо с помощью экспертов накопить необходимые знания, на осно-

ве которых можно сформировать критерии наступления различных аномалий по многофакторному анализу данных, поступающих с датчиков за определенный период времени.

Целью настоящего исследования является проработка вопросов применения экспертных систем для оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе полученных знаний [5].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать возможности экспертных систем, основанных на знаниях, включая модели представления знаний с учетом нечеткости информации и алгоритмы логического вывода.
2. Апробировать исследуемые методы и модели на реальных данных.
3. Предложить и апробировать вариант реализации ИИС, включающую экспертную систему поддержки принятия решений, основанную на знаниях, интегрированную с блоком предварительной и глубокой обработки данных.

### 1. Архитектура ИИС

На рис. 1 приводится структурная схема ИИС, позволяющей оценивать техническое состояние оборудования в процессе эксплуатации. Данная система включает несколько модулей (подсистем), связанных между собой информационными потоками. К основным модулям ИИС можно отнести: подсистему мониторинга, подсистему предварительной обработки данных и экспертную систему, основанную на знаниях. Отметим, что на основе современных методов искусственного интеллекта (ИИ) можно разработать модели, способные по информации, поступающей с оборудования в режиме реального времени, определять его техническое состояние и предсказывать возможные поломки узлов и отказы в ближайшем будущем. Однако для построения подобных моделей, основанных, например, на нейросетевых технологиях, необходимы большие массивы данных, полученных с датчиков за длительный период времени эксплуатации, а также сведения о произошедших поломках и проведенных ремонтах оборудования. Из рис. 1 видно, что формирование управленческого решения с помощью ИИС и передача его ЛПР возможны двумя путями: в режиме реального времени с помощью компонента «Подсистема обработки и анализа данных», осуществляющего предиктивную аналитику, и с запаздыванием по времени после анализа поступающих и обработанных данных с помощью экспертной системы, основанной на знаниях.



Рис. 1. Архитектура ИИС  
Fig. 1. Architecture of IIS

Конечно, первый путь является более перспективным, но требует отработки методов ИИ (например, обучения и настройки специальных глубоких нейросетей). Поэтому на первом этапе разработки ИИС целесообразным является использование двух способов выработки управляющих решений, что повысит точность прогноза и снизит вероятность ошибки 1-го рода (ложное срабатывание).

Предполагается, что существует модуль информационной системы, осуществляющий предварительный анализ показателей ЭЦН с помощью статистической обработки данных или нейросетевого моделирования и позволяющий определять тренды поступающих данных на заданном интервале времени работы оборудования. Рассмотрим возможность реализации модуля экспертной системы, которая бы позволяла хранить и использовать знания экспертов для оценки технического состояния. Наличие данного модуля в составе ИИС позволит дополнительно достигнуть следующих положительных следствий:

- 1) сохранность знаний экспертов в рамках предприятия;
- 2) повышенная доступность экспертных знаний;
- 3) повышение доверия к принятому решению;
- 4) возможность получить детальное объяснение принятого решения о неполадке ЭЦН;
- 5) возможность использовать в обучении персонала.

Считается, что в модуль ЭС поступают данные по анализируемым показателям ЭЦН. Например, данные по напряжению, силе тока, вибрации, давлению и т. д. В модуль данные могут поступать в различной форме:

1. Информация по показателям, аппроксимированная прямой на некотором интервале времени, – линейный тренд, т. е. по каждому показателю известно направление изменения (рост, падение, неизменность) и скорость данного изменения (тангенс угла наклона данного тренда).

2. Информация по показателям, аппроксимированная параболой (или другой кривой), – на рассматриваемом интервале времени изменение каждого показателя может происходить нелинейно, например, сначала рост, а потом падение. Данная информация позволит более точно учитывать характер изменения данных для формирования заключения о возможной неполадке ЭЦН.

## 2. Анализ способов представления знаний

На первоначальном этапе на основе данных, полученных от экспертов, нетрудно сформировать таблицу, описывающую каждую неполадку совокупностью изменений каждого из показателей работы оборудования [6]. Примеры возможных неполадок оборудования приведены в таблице, в которой использованы следующие обозначения: Р – растет, П – падает, Н – неизменно.

Изменения показателей, приводящих к неисправностям ЭЦН  
Changes in parameters leading to failures of electric centrifugal pumps

Показатель/Случай	Частота	Напряжение	Сила тока	Давление на приеме насоса	Давление на выкиде насоса	Дебит на устье	Температура двигателя насоса	Давление на устье	Температура на устье
Нормальное увеличение частоты	Р	Р	Р	П	Р	Р	Р	Р	Р
Уменьшение диаметра штуцера	Н	Н	П	Р	Р	П	Р	Р	П
Ограничение выше ЭЦН, но до устьевого манометра – Закрыт клапан отсекагель	Н	Н	П	Р	Р	П	Р	П	П
Негерметичность перепускной пробки	Н	Н	Н	Р	П	П	Р	Н	П
Увеличение обводненности флюида	Н	Н	Р	Р	Р	П	Р	П	Н
Выделение газа	Н	Н	Р/П	Р/П	П	П	П	П	П
Разгерметизация НКТ	Н	Н	П	Р	П	П	Р	П	П
Закрыта задвижка на линейном трубопроводе	Н	Н	П	Р	Р	П	Р	Р	П
Падение частоты ниже минимальной	П	П	П	Р	П	П	Р	П	П
Попадание твердых частиц (песка) или флюида с высокой вязкостью в насос	Н	Н	Р	Р	П	П	Р	П	П
Разрушение вала насоса	Н	Н	П	Р	П	П	Р	П	П
Износ насоса	Н	Н	П	Р	П	П	Р	П	П

Данная таблица без особого труда может быть представлена в виде дерева принятия решений. Но в дальнейшем, по мере накопления знаний о неполадках, может появиться потребность в оперировании более сложными суждениями с применением промежуточных гипотез. Также может потребоваться возможность более сложного описания причин и ситуаций, приводящих к той или иной неисправности ЭЦН.

Рассмотрим возможность использования различных способов представления знаний для решения данной задачи. Как показал предварительный анализ, наиболее перспективными моделями представления знаний в рассматриваемом случае являются продукции и фреймы [7].

1. *Продукции*. Нетрудно преобразовать информацию о неполадках (см. таблицу) в продукционные правила вида «Если – то». На рис. 2 представлен пример правил более сложного вида, содержащий вывод промежуточной гипотезы до непосредственного вывода гипотезы о неполадке.

<p><b>Если</b> «Частота» = «Растет» И «Напряжение = «Растет» И «Сила тока» = «Растет» <b>ТО</b> «Электрические показатели» = «Возможные неполадки с электрикой»</p> <p><b>Если</b> «Давление на приеме насоса» = «Падает» И «Давление на выкиде насоса» = «Растет» И «Дебит на устье = Растет» И «Температура двигателя насоса = Растет» И «Давление на устье = Растет» И «Температура на устье = Растет» <b>ТО</b> «Механические показатели» = «Норма»</p> <p><b>Если</b> «Электрические показатели» = «Возможные неполадки с электрикой» И «Механические показатели» = «Норма» <b>ТО</b> «Случай» = «Нормальное увеличение частоты»</p>
---

**Рис. 2. Пример продукционных правил с промежуточной гипотезой**  
**Fig. 2. Example of production rules with intermediate hypothesis**

Также помимо обычного прямого логического вывода с использованием продукционного способа представления знаний могут быть полезны:

а) обратный логический вывод – при рассмотрении неполадки ЭЦН можно проанализировать, какие еще сходные факты могут к ней привести;

б) нечеткий логический вывод – использование нечеткой логики совместно с коэффициентом уверенности (CF, certainty factor) позволит учитывать больше аспектов предметной области в фактах и правилах. Применимость данного логического вывода будет рассмотрена ниже более подробно.

2. *Фреймы*. Каждую стереотипную ситуацию, описывающую неполадку ЭЦН, можно представить в виде фреймов-ситуаций. Как следствие, данные неполадки могут образовывать иерархии. Также при помощи присоединенных процедур можно в момент работы логического вывода производить дополнительные вычисления, например, вычислять время и стоимость прогнозируемого ремонта, обращаясь к веб-сервисам и БД. Данная логика естественным образом ложится на фреймовый способ представления знаний. Пример фрейма представлен на рис. 3.

На текущий момент исследования количество знаний о неполадках ЭЦН, отражающих причинно-следственные связи, небольшое. Поэтому предлагается описывать знания в виде продукционных высказываний «Если – то», которые являются более понятными для экспертов. Рассмотрим более подробно преимущества нечеткого логического вывода для решаемой задачи.



«Уменьшение диаметра штуцера»	
АКО	«Механическая неполадка»
Частота	Неизменно
Напряжение	Неизменно
Сила тока	Падение
Давление на приеме насоса	Рост
Давление на выкиде насоса	Рост
Дебит на устье	Падение
Температура двигателя насоса	Рост
Давление на устье	Рост
Температура на устье	Падение
Длительность ремонта	IF_NEEDED: Duration()
Стоимость ремонта	IF_NEEDED: Cost()

Рис. 3. Краткий пример фрейма-ситуации, описывающего неполадку ЭЦН  
Fig. 3. Brief example of frame situation describing the problem of electric centrifugal pumps

### 3. Использование нечеткого логического вывода

В нефтегазовой отрасли нечеткие множества [8] рассматриваются, например, для использования в оценке и предсказания количества и качества добываемых ископаемых [9–13]. Также и применительно к предсказанию неполадок насосов [14].

В рамках существующей совокупности НЕ-факторов [15] рассмотрим более детально два из них и опишем возможности их учета при оценке технического состояния ЭЦН:

1. *Нечеткость*. При составлении правил эксперт может оперировать неформализованными понятиями, например, использовать понятие «Сильный рост давления на устье насоса», т. е. использовать лингвистические переменные. Для устранения данного НЕ-фактора определяются функции принадлежности, которые будут рассмотрены ниже.

2. *Неопределенность*. При описании правил эксперт может выражать некоторую неопределенность в высказываниях. Например, «Вероятнее всего сильный рост давления на устье насоса». Для описания данного фактора используется коэффициент уверенности (CF). В рамках решаемой задачи неопределенность может применяться как к самим фактам, так и к правилам.

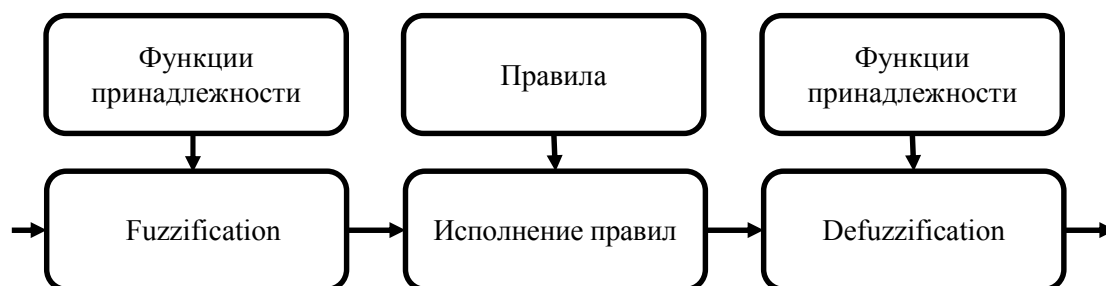


Рис. 4. Схема работы нечеткого логического вывода  
Fig. 4. Fuzzy logic output operation diagram

Тогда прямой нечеткий логический вывод для выявления неполадки ЭЦН будет выглядеть следующим образом (рис. 4):

1. Получение данных по каждому показателю (давление, вибрация и др.) и преобразование их в нечеткие множества (fuzzification) при помощи заранее определенных функций принадлежности.

2. *Работа механизма (машины) логического вывода и получение заключения*. Полученное заключение может содержать коэффициент уверенности (CF). Выведенный результат может быть как «четким», так и представляться лингвистической переменной.

3. *Преобразование значений из нечеткого множества в вещественные (defuzzification)*. Данный шаг может отсутствовать. Например, в рамках решаемой задачи данный шаг может требоваться, если с каждой выводимой неполадкой ЭЦН ассоциирован уровень критичности данной неполадки (низкий, средний, высокий, очень высокий и т. д.). Тогда при наличии функций при-

## Автоматизированные системы управления...

надлежасти данный уровень нетрудно преобразовать в вещественные числа, что может упростить интеграцию с внешними информационными системами.

Рассмотрим возможные виды функций принадлежности для обработки входных данных.

### 1. Использование пороговых значений.

При использовании ступенчатых функций принадлежности нечеткий логический вывод в целом сводится к обычному четкому логическому выводу. На вход по каждому показателю подается число в интервале  $[-1; 1]$ , на выходе – результат функции принадлежности либо 0, либо 1 (рис. 5).

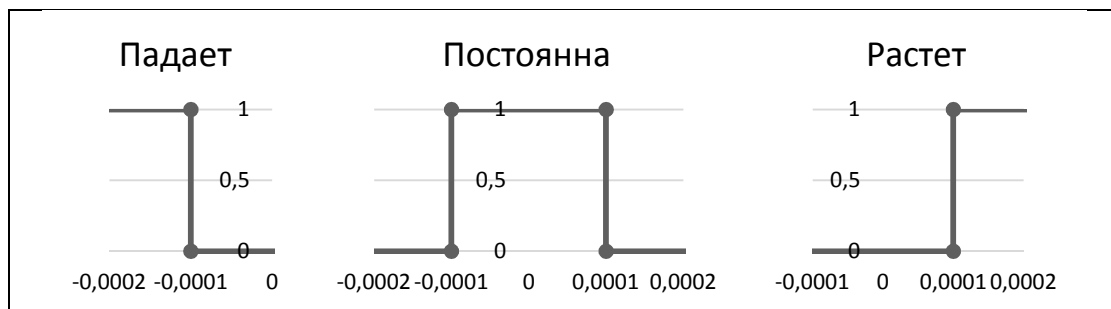


Рис. 5. Пример ступенчатых функций принадлежности  
Fig. 5. Example of Step-by-Step Accessory Functions

### 2. Учет нечеткости в скорости изменения параметров.

Для того чтобы учесть скорость изменения параметров, можно предложить следующие функции принадлежности (рис. 6).

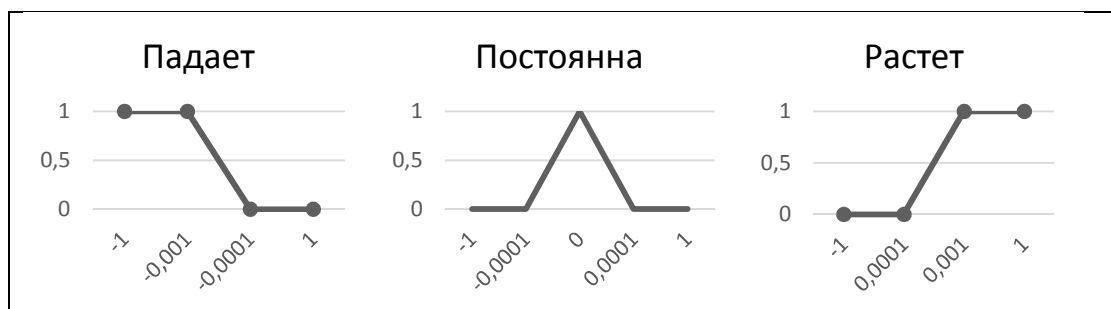


Рис. 6. Пример функций принадлежности для учета скорости изменений  
Fig. 6. Example of Accessory Functions for Account for Change Rates

### 3. Учет смены тренда

Описание смены тренда на исследуемом интервале времени осуществляется аппроксимацией параболой  $a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ . Таким образом, на вход экспертной системы подаются три коэффициента по каждому из рассматриваемых параметров работы ЭЦН. Если коэффициент  $a < 0$ , значит сначала происходит рост параметра, затем падение. И наоборот: если  $a > 0$ , то сначала падение, потом рост. Нетрудно вычисляется и модуль абсолютного изменения значения параметра (рис. 7).



Рис. 7. Пример функций принадлежности для учета смены тренда показателя  
Fig. 7. Example of accessory functions for accounting for trend change of key figure

На рис. 8 представлен пример правила для учета смены тренда. В дальнейшем выведенное значение показателя может быть естественным образом использовано в нечетком логическом выводе.

```
Если «Функция вибрации» = «Выпуклая» И «Изменение» = «Скачок»  
ТО «Вибрация» = «Рост с последующим падением»
```

Рис. 8. Пример правила для учета смены тренда  
Fig. 8. Example of rule for trend change accounting

### 3. Пример реализации ЭС и апробация применения

В качестве демонстрационного примера рассмотрим обработку данных и прогнозирование состояния оборудования на скважине. Для наглядности сократим число рассматриваемых параметров до двух: «Вибрация» и «Давление на устье». Считается, что в базе знаний существует соответствующее правило (рис. 9) с коэффициентом  $CF = 0.9$ .

```
Если «Давление на устье» = «Растет» И «Вибрация» = «Растет»  
ТО «Случай» = «Уменьшение диаметра штуцера» CF=0.9
```

Рис. 9. Пример демонстрационного правила  
Fig. 9. Example of the demonstration rule

На данном шаге для выбранной скважины имеются прогнозные значения показателей, полученные на одни сутки. Каждый из показателей представляет собой число (линейный тренд) – тангенсы угла наклона значения показателя по времени. Рассматриваемые значения в данном случае: «Давление на устье» = 0.0008; «Вибрация» = 0.0015.

Применяя функции принадлежности (см. рис. 6), получаем вывод заключения «Случай» = «Уменьшение диаметра штуцера» с  $CF = 0.7$ .

Рассмотрим детально, как был вычислен коэффициент  $CF$ :

$$CF_{\text{заключение}} = \min(CF_{\text{давления на устье}} \cdot CF_{\text{вибрации}}) \cdot CF_{\text{правила}}$$

$CF$  показателей вычисляется исходя из функций принадлежности. Таким образом, в данном случае  $CF_{\text{давления на устье}} = 1$ , так как при значении 0.015, функция принадлежности имеет значение 1, а  $CF_{\text{вибрации}} = 77/99$ , так как данное значение функция принадлежности достигает при значении 0.0008. Итого оба показателя определяются лингвистической переменной «Растет», но с разной функцией принадлежности. Получаем:

$$CF_{\text{заключение}} = \min\left(1, \frac{77}{99}\right) \cdot 0.9 = \frac{77}{99} \cdot \frac{9}{10} = 0.7.$$

Таким образом, на основе спрогнозированных данных в виде линейных трендов по показателям «Вибрация» и «Давление на устье» было получено заключение о неисправности ЭЦН в виде «Уменьшение диаметра штуцера» с коэффициентом уверенности, равным 0.7.

Описанную выше логику можно реализовать, воспользовавшись готовой оболочкой экспертной системы FuzzyCLIPS [16]. Данная система имеет открытые исходные коды, а также является портированной на многие операционные системы. Обоснование выбора конкретной оболочки (доработка существующей или создание собственной) для промышленного использования необходимо учитывать с использованием специалистов по информационным технологиям и конкретного ИТ-ландшафта предприятия.

Для реализации требуется:

1. Определить все функции принадлежности (рис. 10).

```
(deftemplate frequency  
-1 1  
( (increasing (.0001 0) (.0001 1) (1 1) )  
  (constant (-.0001 0) (-.0001 1) (.0001 1) (.0001 0) )  
  (decreasing (-1 1) (-.0001 1) (-.0001 0) ) ) )
```

Рис. 10. Пример функции принадлежности для частоты тока  
Fig. 10. Example of accessory function for current frequency

2. Описать все правила в БЗ с указанием CF (рис. 11).

```
(defrule choke-well-back "Уменьшение диаметра штуцера"  
  (declare (CF 0.9))  
  (frequency constant)  
  (voltage constant)  
  (amperage decreasing)  
  (pressure_in increasing)  
  (pressure_out increasing)  
  (debit decreasing)  
  (temp_engine increasing)  
  (pressure_source increasing)  
  (temp_source decreasing)  
  =>  
  (assert (failure choke_well_back))  
)
```

Рис. 11. Пример правила с указанием CF  
Fig. 11. Example of rule with indication CF

3. Описать правила вывода результата: при наличии факта с определенным именем в рабочей памяти (рис. 12).

```
(defrule print-result-main  
  (failure ?f)  
  ?cf <- (failure ?)  
  =>  
  (printout log "Failure is: " ?f crlf)  
  (printout log "Certainty Factor is: " (get-cf ?cf) crlf)  
)
```

Рис. 12. Пример финального правила с выводом результата  
Fig. 12. Example of final rule with result output

4. Определить входные показатели (поместить в рабочую память) факты для логического вывода в виде нечетких множеств. На рис. 13 представлено описание фактов приведенного выше демонстрационного примера.

```
(deffacts my_facts  
  (pressure_source (.0008 0) (.0008 1) (.0008 0))  
  (vibration (.0015 0) (.0015 1) (.0015 0))  
)
```

Рис. 13. Пример правила с указанием CF  
Fig. 13. Example of rule with indication CF

5. Запустить логический вывод.

### Заключение

В результате проведенных исследований были решены следующие задачи:

1. Исследованы возможности экспертных систем, основанных на знаниях, включая модели представления знаний с учетом нечеткости информации и алгоритмы логического вывода. Обосновано применение продукционной модели представления знаний экспертов, показано применение теории нечетких множеств для обработки знаний экспертов.

2. Исследуемые методы и модели апробированы на реальных данных, что подтверждает возможность их использования при разработке ИИС.

3. Предложена концепция ИИС, включающей экспертную систему поддержки принятия решений, основанную на знаниях, и блок предварительной и глубокой обработки данных, включая компонент предиктивной аналитики, основанный на нейросетевых технологиях.

### Литература

1. *Application of Remote Real-Time Monitoring to Offshore Oil and Gas Operations / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.* – Washington, DC: The National Academies Press, 2016. DOI: 10.17226/23499
2. Брускин, С.Н. Модели и инструменты предиктивной аналитики для цифровой корпорации / С.Н. Брускин // *Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова.* – 2017. – № 5. – С. 136–139.
3. Лунатов, А. Первый в России комплекс предиктивной аналитики для энергетического и промышленного оборудования / А. Лунатов // *Экспозиция. Нефть. Газ.* – 2016. – № 4. – С. 82–84.
4. Stolbov, V.Yu. Application of intelligent technology in functional materials quality assurance / V.Yu. Stolbov, M.B. Gitman, S.I. Sharybin // *Materials Science Forum.* – 2016. – Vol. 870. – P. 717–724. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.717
5. Giarratano, J. *Expert Systems. Principles and Programming / J. Giarratano, G. Riley.* – 4-th Ed. – 2004. – 842 p.
6. *A Fuzzy Logic Application to Monitor and Predict Unexpected Behavior in Electric Submersible Pumps (Part of KwIDF Project) / F. Bermudez, G.A. Carvajal, G. Moricca et al.* // *SPE Intelligent Energy Conference & Exhibition.* – 2014. DOI: 10.2118/167820-MS
7. Roberts, R.B. *The FRL Primer / R.B. Roberts, I.P. Goldstein.* – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1977. – No. AI-M-408.
8. Zadeh, L.A. *Fuzzy Sets / L.A. Zadeh // Information and Control.* – 1976. – Vol. 8. – P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
9. Vilela, M. *Fuzzy logic applied to value of information assessment in oil and gas projects / M. Vilela, G. Oluyemi, A. Petrovski.* // *Petroleum Science.* – 2019. – P. 1–13. DOI: 10.1007/s12182-019-0348-0
10. Fatai A. Anifowose. *Prediction of Petroleum Reservoir Properties using Different Versions of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Hybrid Models / Fatai A. Anifowose, Jane Labadin, Abdulazeez Abdulraheem // International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications.* – 2013. – Vol. 5 (20132). – P. 413–426.
11. Anifowose, F. *A Functional Networks-Type-2 Fuzzy Logic Hybrid Model for the Prediction of Porosity and Permeability of Oil and Gas Reservoirs / F. Anifowose, A. Abdulraheem // Proceedings of the 2nd International Conference on Computational Intelligence, Modeling and Simulation, IEEEExplore.* – 2010. – P. 193–198. DOI: 10.1109/CIMSiM.2010.43
12. Fang, J.H. *Fuzzy Modeling and the Prediction of Porosity and Permeability from the Compositional and Textural Attributes of Sandstone / J.H. Fang, H.C. Chen // Journal of Petroleum Geology.* – 1997. – 20 (2). – P. 185–204. DOI: 10.1111/j.1747-5457.1997.tb00772.x
13. Shahvar, M.B. *Incorporating Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks for Building Hydraulic Unit-Based Model for Permeability Prediction of a Heterogenous carbonate Reservoir / M.B. Shahvar, R. Kharrat, R. Mahdavi // Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar. 7–9 December 2009.* DOI: 10.2523/IPTC-13732-MS
14. *Application of a Fuzzy Expert System to Analyze and Anticipate ESP Failure Modes / D. Grassian, M. Bahatem, T. Scott, D. Olsen // Society of Petroleum Engineers.* – 2017. DOI: 10.2118/188305-MS
15. Нариньяни, А.С. НЕ-факторы и инженерия знаний: от наивной формализации к естественной прагматике / А.С. Нариньяни // *Сборник трудов IV национальной конференции по искусственному интеллекту.* – Рыбинск, 1994. – Т. 1. – С. 9–18.
16. Orchard, B. *FuzzyCLIPS Version 6.10 d User's Guide / B. Orchard.* – National Research Council of Canada, 2004. – 82 p.

**Истомин Денис Андреевич**, ассистент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; dai@pstu.ru.

**Столбов Валерий Юрьевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; valeriy.stolbov@gmail.com.

**Платон Денис Николаевич**, инженер, ООО «Нафта Эксперт», г. Пермь; dplaton@nafta-e.com.

*Поступила в редакцию 1 ноября 2019 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr200113

## EXPERT SYSTEM FOR ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP ASSEMBLIES BASED ON PRODUCTIVE PRESENTATION OF KNOWLEDGE AND FUZZY LOGIC

**D.A. Istomin**<sup>1</sup>, dai@pstu.ru,  
**V.Yu. Stolbov**<sup>1</sup>, valeriy.stolbov@gmail.com,  
**D.N. Platon**<sup>2</sup>, dplaton@nafta-e.com

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation,

<sup>2</sup> Nafta Expert LLC, Perm, Russian Federation

**Introduction.** Condition assessment of the electric submersible pump units is one of the many tasks that need to be solved to increase the efficiency of oil production business processes. Improving the efficiency of condition monitoring processes and failure prediction of electric submersible pumps often requires the development of special mathematical and software engineering tools.

**Aim.** To research the use of knowledge-based expert systems for technical condition assessment of the electric submersible pumps units. **Materials and methods.** The expert system is considered as an auxiliary tool that minimizes errors associated with the false positive errors of predictive analytics. The expert system, based on trends for each indicator of the electric submersible pump (pressure, vibration, amperage, etc.), makes an assessment of the technical condition, for example, diagnosing a certain type of malfunction. To store knowledge in the expert system, frames and production rules are considered. The production rules knowledge representation is considered in detail and the possibility of using fuzzy inference is proposed. **Results.** The application of knowledge-based expert systems, including fuzzy knowledge representation models and logical inference algorithms, is investigated. The use of a production-based rules for representing expert's knowledge is justified, the application of the fuzzy inference is shown. The concept of an intelligent information system is proposed, which includes an expert knowledge-based decision support system, as well as a preliminary and deep data processing unit, including a component of predictive analytics based on neural network technologies. A demonstration example of the expert system application is presented, and the features of its implementation in the FuzzyCLIPS shell are also considered. **Conclusion.** The methods and models under study were tested on real data, which confirms the possibility of their use in the development of an intelligent information system.

*Keywords:* electric submersible pump, technical condition, expert system, knowledge representation, production knowledge, frames, inference, fuzzy sets, CLIPS, FuzzyCLIPS.

### References

1. *Application of Remote Real-Time Monitoring to Offshore Oil and Gas Operations*. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2016, 139 p. DOI: 10.17226/23499

2. Bruskin S.N. [Models and Instruments of Predictive Analysis for Digital Corporation]. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 2017, no. 5, pp. 136–139. (in Russ.)
3. Lipatov A. [First in Russia Predictive Analytics Suite for Energy and Industrial Equipment]. *Exposition. Oil. Gas*, 2016, no. 4, pp. 82–84. (in Russ.)
4. Stolbov V.Yu., Gitman M.B., Sharybin S.I. Application of Intelligent Technology in Functional Materials Quality Assurance. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 870, pp. 717–724. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.717
5. Giarratano J., Riley G. *Expert Systems. Principles and Programming*. Hardcover, Course Technology, 2004, 842 p.
6. Bermudez F., Carvajal G.A., Moricca G., Dhar J., Md Adam F., Al-Jasmi A., Goel H.K., Nasr H. A Fuzzy Logic Application to Monitor and Predict Unexpected Behavior in Electric Submersible Pumps (Part of KwIDF Project). *SPE Intelligent Energy Conference & Exhibition*, 2014. DOI: 10.2118/167820-MS.
7. Roberts R.B., Goldstein I.P. *The FRL Primer*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1977, no. AI-M-408.
8. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1976, vol. 8, pp. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
9. Martin Vilela, Gbenga Oluyemi, Andrei Petrovski. Fuzzy Logic Applied to Value of Information Assessment in Oil and Gas Projects. *Petroleum Science*, 2019, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s12182-019-0348-0
10. Fatai A. Anifowose, Jane Labadin, Abdulazeez Abdulraheem. Prediction of Petroleum Reservoir Properties using Different Versions of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Hybrid Models. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, 2013, vol. 5 (20132), pp. 413–426.
11. Anifowose F., Abdulraheem A. A Functional Networks-Type-2 Fuzzy Logic Hybrid Model for the Prediction of Porosity and Permeability of Oil and Gas Reservoirs. *Proc. of the 2nd International Conference on Computational Intelligence, Modeling and Simulation, IEEEExplore*, 2010, pp. 193–198. DOI: 10.1109/CIMSIM.2010.43
12. Fang J.H., Chen H.C. Fuzzy Modeling and the Prediction of Porosity and Permeability from the Compositional and Textural Attributes of Sandstone. *Journal of Petroleum Geology*, 1997, 20 (2), pp. 185–204. DOI: 10.1111/j.1747-5457.1997.tb00772.x
13. Shahvar M.B., Kharrat R., Mahdavi R. Incorporating Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks for Building Hydraulic Unit-Based Model for Permeability Prediction of a Heterogenous Carbonate Reservoir. *Proceedings of the International Petroleum Technology Conference*, Doha, Qatar, 7–9 December 2009. DOI: 10.2523/IPTC-13732-MS
14. Grassian D., Bahatem M., Scott T., Olsen D. Application of a Fuzzy Expert System to Analyze and Anticipate ESP Failure Modes. *Society of Petroleum Engineers*, 2017, SPE-188305-MS. DOI: 10.2118/188305-MS.
15. Narinyani A.S. [NOT-Factors and Knowledge Engineering: from Naive Formalization to Natural Pragmatics]. *Sbornik trudov IV nacional'noj konferencii po iskusstvennomu intellektu* [Compilation of Works of the IV National Conference on Artificial Intelligence]. Rybinsk, 1994, vol. 1, pp. 9–18. (in Russ.)
16. Orchard B. *FuzzyCLIPS Version 6.10 d User's Guide*. National Research Council of Canada, 2004, 82 p.

Received 1 November 2019

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Истомин, Д.А. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики / Д.А. Истомин, В.Ю. Столбов, Д.Н. Платон // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 133–143. DOI: 10.14529/ctcr200113

#### FOR CITATION

Istomin D.A., Stolbov V.Yu., Platon D.N. Expert System for Assessment of Technical Condition of Electric Centrifugal Pump Assemblies Based on Productive Presentation of Knowledge and Fuzzy Logic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 133–143. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200113

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА G-652 ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГОРНОГО МАССИВА УГОЛЬНЫХ ШАХТ

А.Д. Мехтеев<sup>1, 2</sup>, А.В. Юрченко<sup>2</sup>, Е.Г. Нешина<sup>2</sup>, А.Д. Алькина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Карагандинский государственный технический университет,  
г. Караганда, Республика Казахстан,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
г. Томск, Россия

**Введение.** Актуальность использования волоконно-оптических датчиков для контроля геомеханического состояния массива горных выработок угольных шахт Карагандинского угольного бассейна крайне высока, потому как они относятся к сверхкатегоричным и опасным по внезапному взрыву угольной пыли и газа метана при проведении горных работ в опасных условиях шахт. Волоконно-оптические датчики обладают рядом достоинств: взрывобезопасностью, высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик. **Цель исследования.** Использование оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D как датчика для контроля геомеханического состояния массива горных выработок угольных шахт, что является весьма перспективным в плане создания распределенной системы мониторинга, способной своевременно сигнализировать персонал об опасности внезапного обрушения выработки. **Материалы и методы.** Для отработки методов контроля и измерения геотехнических параметров выработок был разработан имитационный лабораторный стенд на основе волоконно-оптических датчиков. Авторами использовалось кварцевое одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм (OS2) Corning SMF-28e+®. В статье предложены системы в двух вариантах исполнения в зависимости от поставленных задач и функциональности. В первом варианте используется известный метод оптической рефлектометрии OTDR (Optical time domain reflectometer). Во втором варианте контролируются значения дополнительных потерь, вызванные механическим воздействием на оптическое волокно. **Результаты.** При механическом воздействии на оптическое волокно возникают микротрещины, приводящие к изменению свойств света и увеличению дополнительных потерь световой волны, проходящей по нему. Указанные потери можно измерить и установить значения давления на оптическое волокно, также можно определить величину смещения. **Заключение.** Использование оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D для контроля геомеханического состояния массива горных выработок угольных шахт является весьма перспективным, так как разработанные на его основе волоконно-оптические датчики обладают достаточно высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик.

*Ключевые слова:* затухание, потери, информационно-измерительная система, оптическое волокно, безопасность, горные работы, дефекты массива, волоконно-оптический датчик.

### Введение

Проектирование и планирование подземной шахты нацелено на создание интегрированной системы, в которой добыча и переработка полезных ископаемых осуществляется для определенного рынка при минимальных эксплуатационных расходах и высоких требованиях безопасности. Горная система требует междисциплинарной инженерной структуры и координации его работы [1–9]. Одним из важных аспектов функционирования сложной системы шахты является безопасность проведения горных работ. Несомненно, подземные шахты представляют собой одну из самых сложных и жестких сред для работы людей. Несмотря на то, что безопасность рассматривается как одна из ключевых проблем, ограничения в возможности технологического решения, стоимости и самой природы подземных шахт ограничивают возникновение единого механизма обеспечения полной безопасности для горнорабочих в любой области, что очень важно для высококачественной работы.



## 1. Постановка задачи

С учетом проведенного анализа необходимо тщательное исследование, чтобы лучше понять геомеханическое поведение горных пород и обеспечить более высокую производительность совместно с безопасной рабочей средой для рабочих и механизмов. Одним из важных моментов является контроль горного давления на стенки выработок и прогнозирование их внезапного обрушения. В качестве объекта исследования рассмотрена модель горной выработки шахты Карагандинского угольного бассейна. Актуальность использования волоконно-оптических датчиков (ВОД) для контроля технического состояния горных машин угольных шахт Карагандинского угольного бассейна крайне высока, потому что при проведении горных работ в опасных условиях шахт, относящихся к сверхкатегоричным, опасным по внезапному взрыву угольной пыли и газа метана, требуются надежные системы измерения, контроля и мониторинга состояния горных выработок и оборудования с повышенными требованиями к искро- и взрывоопасности. Пренебрежение этими факторами может привести к возникновению серьезных аварий со значительными человеческими жертвами. Информационно-измерительные системы на основе волоконно-оптических датчиков отвечают всем правилам безопасности и могут быть использованы на шахтах Карагандинского угольного бассейна [10].

## 2. Лабораторные испытания

Первым этапом разработки информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков (ИИС ВОД) является проведение аналитического исследования имеющихся достижений в данной области на основе системного подхода и решения задачи в целом. Результаты анализа литературы позволили использовать накопленный опыт для разработки информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков, способных эффективно работать в условиях шахт, опасных по внезапному выбросу метана и пыли. Для отработки методов контроля и измерения геотехнических параметров выработок была разработана лабораторная модель для проведения исследований, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда для практической апробации теоретических результатов исследования  
Fig. 1. Appearance of laboratory stand for practical testing of theoretical results of research

## Краткие сообщения

В реальных условиях желательно иметь программу интенсивного мониторинга давления поддержки с использованием современных систем непрерывного мониторинга на электронном гаджете, чтобы осуществлять оценивание и хранение данных через требуемые интервалы времени.

Современная система связи для подземных шахт может быть проводной или беспроводной. Оба типа систем могут выйти из строя, когда сталкиваются с пожарами, падением крыши, взрывом и сбоем питания.

Реализация миниатюрных интегральных схем, подходящая конструкция безопасных систем электропитания и микроэлектроники для хранения и передачи данных могут быть полезны при разработке экономически эффективных систем непрерывного мониторинга.

Оптическое волокно является искробезопасным, если световая энергия, передаваемая по волокну, находится на уровне или ниже определенного уровня мощности. Они не подвержены влиянию шума, молнии, помех от ВЧ, ЭДС, электромагнитных помех, распространенных в горной промышленности [11–15]. Использование волоконной оптики для надежной связи при мониторинге, анализе и управлении оборудованием и объектами в ходе горного процесса повысит безопасность и эффективность производства. Волоконно-оптическая связь уникально подходит для подключения данных в режиме реального времени от датчиков окружающей среды и оборудования для обеспечения максимальной производительности при соблюдении самых высоких стандартов безопасности. Волоконно-оптические кабели должны быть соответствующим образом бронированы, чтобы они оставались работоспособными при следующих условиях: движение подземных транспортных средств, обрушение подземной крыши, затопление подземных вод, воздействие волны давления, возникающей в результате подземных взрывов.

Нами разработан имитационный лабораторный стенд для отработки конструкции информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков (см. рис. 1). Использовалось кварцевое одномодовое оптическое волокно 9/125 мкм (OS2) Corning SMF-28e+® с низким «водным пиком» (стандарт ITU-T G.652.D). Не желательно использование волокна серии Ultra, так как оно имеет более низкую чувствительность к изгибу. Оптоволокно имеет первичное покрытие 245 мкм (с внешней оболочкой). Для определения значений мощности оптического излучения и потерь использовался измеритель оптической мощности VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38, работающий в динамическом диапазоне от –50 до +26 дБм, с диапазоном длины волны 780–1650 нм. В качестве источника излучения использовался SmartPocket OLS-34/35/36 со встроенными опциями Auto-λ и Multi-λ, SmartPocket OLP-38 может автоматически измерять уровень мощности и вносимые потери в одномодовом и многомодовом оптическом кабеле. Подключение к оптическому волокну производилось через универсальный UPP 2.5 мм адаптер и оптические коннекторы типа FC. Длина компенсационной катушки составляет 2 км оптического волокна (стандарт ITU-T G.652.D) (рис. 2а).

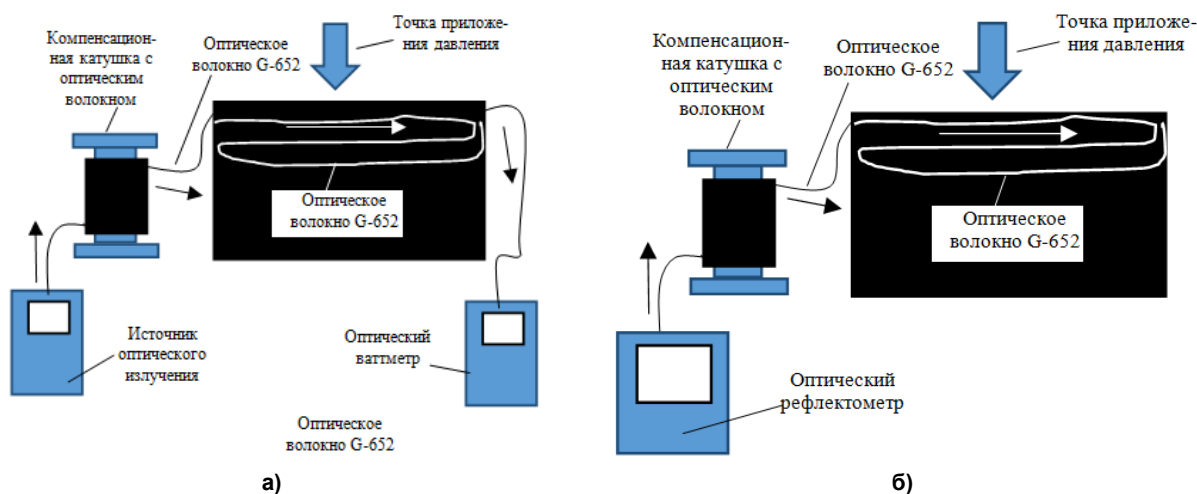


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков: а – с оптическим ваттметром; б – с оптическим рефлектометром  
Fig. 2. Structural diagram of the laboratory stand of the information-measuring system based on fibre-optic sensors: a – with optical wattmeter; b – with optical reflectometer

Второй эксперимент проводился с использованием оптического рефлектометра Yokogawa AQ1200E (рис. 2б).

### 3. Результаты численного моделирования

С помощью разработанного лабораторного стенда был проведен ряд экспериментов по определению потерь оптического волокна при различном значении давления.

Численное исследование модели ВОД системы проведено с помощью программы Wolframalpha, которая является интерактивной системой для выполнения обработки результатов экспериментов и ориентирована на работу с массивами данных.

Граничное условие: энергия давления на волокно от 0 до 15 Н·м, интервал шага 2,4 Н·м, всего 7 шагов, температура в помещении лаборатории 25 °С. Перемещение по осям до приложения давления  $OX = 0$  м;  $OY = 0$  м;  $OZ = 0$  м. В результате автоматизированной аппроксимации данных получены однофакторные математические модели. Каждое измерение проводилось 10 раз.

Исследовались оптические волокна с длиной волны 1310 и 1550 нм. График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении давления представлен на рис. 3.

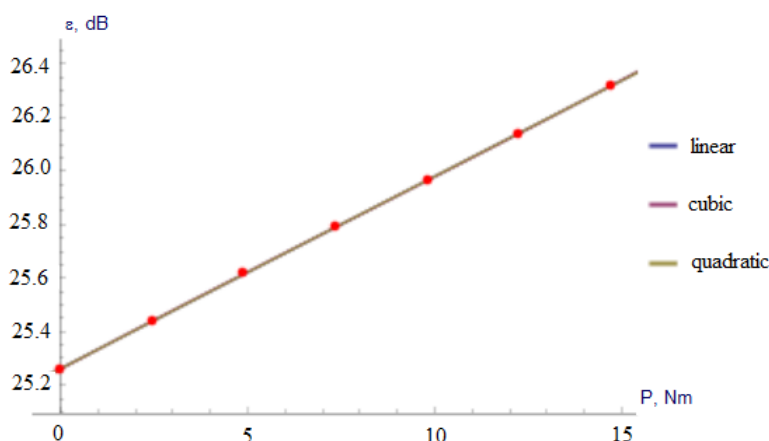


Рис. 3. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1310 нм при пошаговом увеличении давления  
Fig. 3. Value of optical fiber loss with wavelength 1310 nm at step-by-step pressure increase

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

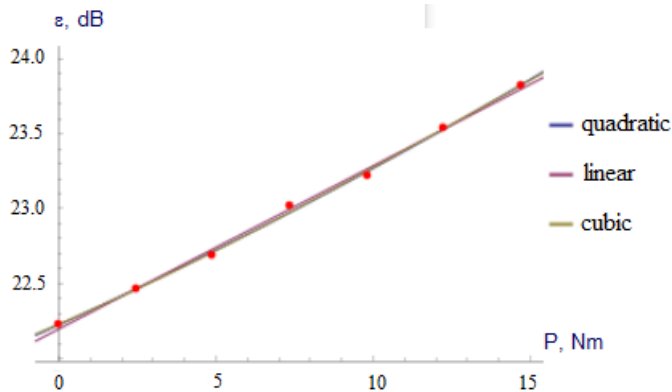
- 1)  $0,0718438P + 25,2616 = \epsilon$  аппроксимация линейная;
- 2)  $0,000022611P^3 - 0,000522694P^2 + 0,0749118P + 25,2589 = \epsilon$  аппроксимация третьей степени (кубическая);
- 3)  $0,0000237653P^2 + 0,0721934P + 25,2609 = \epsilon$  аппроксимация второй степени (квадратичная).

Так как наилучшей математической моделью считается модель с наименьшим значением критерия АИС (Информационный критерий Акаике), зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить квадратичной аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет  $-53,6639$ .

График зависимости значения потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления представлен на рис. 4.

При проведении автоматической аппроксимации были получены следующие результаты:

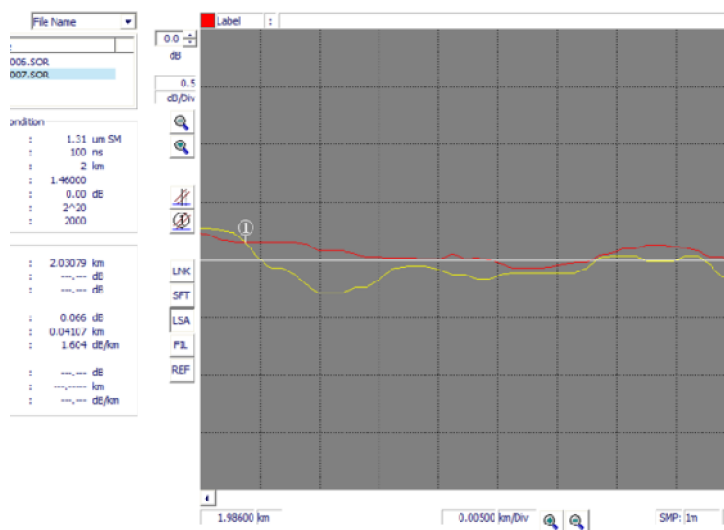
- 1)  $0,109018P + 22,1951 = \epsilon$  аппроксимация линейная;
- 2)  $-0,0000395923P^3 + 0,00181238P^2 + 0,0904493P + 22,2269 = \epsilon$  аппроксимация третьей степени (кубическая);
- 3)  $0,000938742P^2 + 0,0952092P + 22,2234 = \epsilon$  аппроксимация второй степени (квадратичная).



**Рис. 4. Значение потерь оптического волокна с длиной волны 1550 нм при пошаговом увеличении давления**  
**Fig. 4. Value of optical fiber loss with wavelength 1550 nm at step-by-step pressure increase**

Оценивая результаты, можно сделать вывод, что зависимость значений потерь в оптическом волокне лучше представить квадратичной аппроксимацией, при которой информационный критерий Акаике составляет  $-24,11$ .

Для определения расстояния до места нарушения охраны периметра использовался рефлектометр YOKOGAWA AQ1200 OTDR. На рефлектограмме (рис. 5) четко видно, на каком участке оптического волокна происходит изменение потерь.



**Рис. 5. Рефлектограмма**  
**Fig. 5. Reflectogram**

На рефлектограмме показано, что в диапазоне 1,989–2,03079 км возвратные потери оптического волокна составили 0,066 дБ, что свидетельствует о том, что на этом промежутке давление на оптическое волокно выше нормы.

#### 4. Разработка информационно-измерительной системы на основе волоконно-оптических датчиков

При механическом воздействии на оптическое волокно возникают микро- и макроизгибы, приводящие к дополнительным потерям оптического сигнала в волокне. Указанные потери можно измерить и установить значения давления на оптическое волокно, также можно определить величину смещения. Важным преимуществом данной системы измерений будет ее полная искро- и пожаробезопасность. Энергетическая пассивность датчиков позволяет исключить источники питания, непосредственно находящиеся в зоне добычи угля. ИИС ВОД способна круглосуточно

осуществлять мониторинг горной выработки. Система может быть представлена в двух вариантах в зависимости от поставленных задач и функциональности. В первом варианте используется известный метод оптической рефлектометрии OTDR (Optical time domain reflectometer). Во втором варианте контролируются значения дополнительных потерь, вызванные механическим воздействием на оптическое волокно. На основе проведенных лабораторных опытов было предложено две схемы ИИС ВОД (рис. 6).

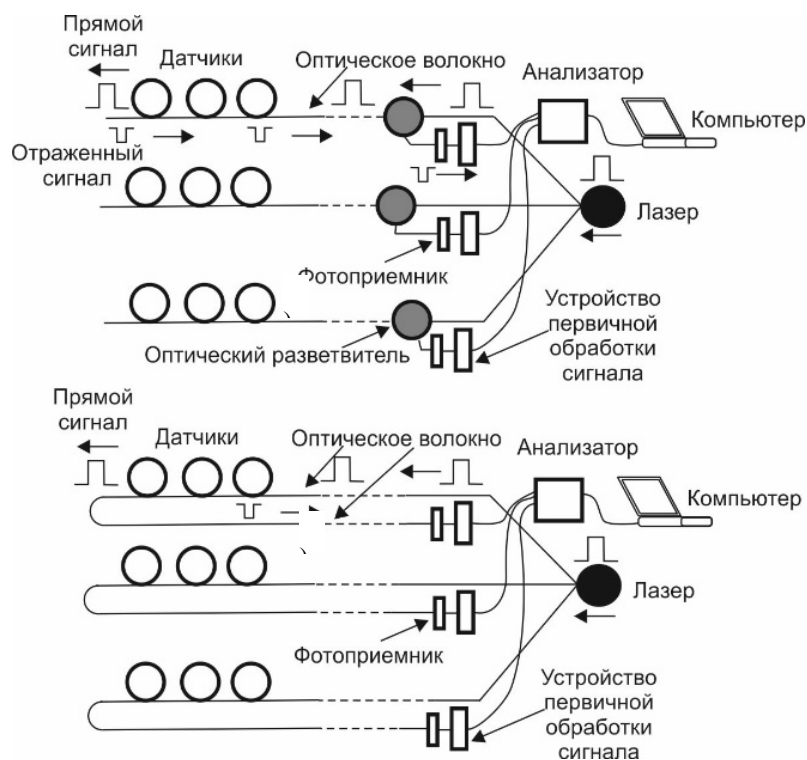


Рис. 6. Структурные схемы информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков  
Fig. 6. Structural diagrams of information-measuring systems based on fibre-optic sensors

Зона действия ИИС ВОД – около 50 км, что вполне достаточно для передачи сигналов в пределах горных выработок и подачи их на поверхность. ИИС ВОД может иметь более ста каналов и точек измерения. ВОД расположены непосредственно в горной выработке. Подключение осуществляется через оптические коннекторы к магистральному оптическому кабелю, а фотоприёмники, лазер и анализатор находятся в безопасной зоне околоствольного двора или на поверхности. ИИС ВОД на рис. 6а работает следующим образом: источник света (полупроводниковый лазер) формирует короткие зондирующие импульсы необходимой длительности (от 5 нс до 20 мкс), длина волны 1310 и 1550 нм. Импульс проходит через разветвитель по оптическому кабелю до ВОД, расположенных в горной выработке. При механическом воздействии на оптическое волокно датчика возникают дополнительные потери, и часть сигнала отражается и по тому же проводнику попадает в фотоприемник. Разветвитель обеспечивает прохождение отражённого в волокне света к приёмнику оптического излучения для его регистрации и измерения. Чувствительный фотоприёмник имеет устройство для первичной обработки сигнала и точно измеряет уровни и задержки по времени всех отражений, появляющихся по мере прохождения зондирующего светового импульса вдоль волокна. Измерение всех отражений от одного зондирующего светового импульса не позволит получить достоверную картину давлений и перемещений пород горной выработки, так как лазер создает импульс малой мощности и при его отражении создается большое количество случайного шума, поэтому необходимо выполнять измерения в течение 10–30 с, отправить в волокно тысячи зондирующих световых импульсов и измерить отражение каждого из них. После чего выполняется усреднение, анализ и отображение результатов при помощи

анализатора и компьютера, на котором будет сохранена вся информация об измерении давления и смещений, происходивших в горной выработке в течение установленного времени (суток, месяцев). Важным моментом является работа анализатора, который рассчитывает время прохождения по оптическому волокну прямого и обратного (отраженного) импульса света, при известной скорости света рассчитывает расстояние до точки приложения давления. По уровню амплитуды отраженного сигнала определяются дополнительные потери и соответственно значения приложения давления к ВОД. ИИС ВОД представлена на рис. 6б, более упрощенная в плане используемого оборудования (фотоприемника, оптического разветвителя) и имеет меньшую стоимость, так как анализатор выполнен более простым с меньшими вычислительными мощностями процессора. Лазерный луч проходит по прямому оптическому волокну до ВОД и возвращается по обратному к фотоприёмнику. При механическом воздействии на ВОД, например, при повышении давления на крепь или смещении пластов, увеличиваются дополнительные потери, которые фиксируются анализатором.

Измерение горного давления и перемещений горных пород – два важнейших параметра, которые могут использоваться для количественной оценки эффективности поддержки кровли горной выработки в заданном состоянии геотехники.

### Обсуждение и заключение

Использование оптического волокна стандарта ITU-T G.652.D для контроля горного массива угольных шахт является весьма перспективным, так как разработанные на его основе ВОД обладают достаточно высокой точностью, скоростью измерения и имеют хорошую линейность характеристик. Нежелательно использование волокна серии ITU-T G.652.D Ultra, так как оно имеет более низкую чувствительность к изгибу. ИИС ВОД позволяет обеспечить высокие требования безопасности при проведении горных работ в опасных условиях шахт, относящихся к сверхкатегоричным по внезапному взрыву угольной пыли и газа метана, требуются надежные системы измерения, контроля и мониторинга состояния горных выработок и оборудования с повышенными требованиями к искро- и взрывобезопасности.

### Литература

1. Чотчаев, Х.О. Контроль напряженно-деформированного состояния горного массива звукометрическими и геофизическими методами / Х.О. Чотчаев // *Геология и геофизика юга России*. – 2016. – № 3. – С. 129–140.
2. Буймистрюк, Г.Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков / Г.Я. Буймистрюк // *Фотон-Экспресс*. – 2011. – № 6 (43). – С. 38–39.
3. Буймистрюк, Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий / Г. Буймистрюк // *Control engineering*. – 2013. – № 3 (45). – С. 34–40.
4. A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces / S.T. Kim, Y.-H. Park, S.Y. Park et al. // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15, no. 1. – P. 1060–1070. DOI: 10.3390/s150101060
5. Advances Of Optical Fiber Sensors For Coal Mine Safety Monitoring Applications / T. Liu, Y. Wei, G. Song et al. // *Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics*. – 2013. – P. 102–111. DOI: 10.1109/ICMAP.2013.6733455
6. Chunde Application Of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in the Anomaly Detection of Shaft Lining in Grouting / Chunde Piao, Jun Yuan, Bin Shi et al. // *Journal of Sensors*. – 2015. – P. 163–169. DOI: 10.1155/2015/678634
7. Fiber Grating Water Pressure Sensor and System for Mine / X. Liu, C. Wang, T. Liu et al. // *ACTA Photonica Sinica*. – 2009. – Vol. 38. – P. 112–114.
8. Optimizing Fibre Optics for Coal Mine Automation / Atul Kumar, Dheeraj Kumar, U.K. Singh et al. // *International Journal of Control and Automation*. – 2011. – Vol. 3. – P. 63–70.
9. Application of a Distributed Fibre Optic Strain Sensing System to Monitoring Changes in the State of an Underground Mine / H. Naruse, H. Uehara, T. Deguchi et al. // *Measurement Science and Technology*. – 2007. – Vol. 18, no. 10. – P. 3202–3210. DOI: 10.1088/0957-0233/18/10/S23

10. Модель волоконно-оптического датчика для мониторинга механического напряжения горных выработок / А.В. Юрченко, А.Д. Мехтиев, Ф.Н. Булатбаев и др. // Дефектоскопия. – 2018. – № 7. – С. 48–56.
11. Бейли, Д. Волоконная оптика. Теория и практика / Д. Бейли, Э. Райт. – М.: Кудлиц-Образ, 2006. – 320 с.
12. Дмитриев, С.А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с.
13. Соколов, А.Н. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы / А.Н. Соколов, В.А. Яцеев // Измерительная техника. – 2006. – № 4. – С. 142–153.
14. Горлов, Н.И. Основные задачи мониторинга современных волоконно-оптических линий передачи / Н.И. Горлов, В.И. Эйрих // Труды Международной научной конференции (Сагиновские чтения № 4). – 2012. – № 2. – С. 68–70.
15. Research of the additional losses occurring in optical fiber at its multiple bends in the range waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm Long / A.V. Yurchenko, N.I. Gorlov, A.D. Mekhtiyev, A.A. Kovtun // IOP Science. Journal of Physics. – 2016. – Vol. 671. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012001

**Мехтиев Али Джаванширович**, канд. техн. наук, ассоциированный профессор, Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; barton.kz@mail.ru.

**Юрченко Алексей Васильевич**, д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; niipp@inbox.ru.

**Нешина Елена Геннадьевна**, магистр технических наук, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; 1\_neg@mail.ru.

**Алькина Алия Даулетхановна**, магистр технических наук, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; alika\_1308@mail.ru.

Поступила в редакцию 19 ноября 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr200114

## USING G-652 OPTICAL FIBER TO CONTROL MOUNTAIN MASSIFES OF COAL MINES

A.D. Mekhtiyev<sup>1, 2</sup>, barton.kz@mail.ru,

A.V. Yurchenko<sup>2</sup>, niipp@inbox.ru,

E.G. Neshina<sup>2</sup>, 1\_neg@mail.ru,

A.D. Alkina<sup>2</sup>, alika\_1308@mail.ru

<sup>1</sup> Karaganda State Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan,

<sup>2</sup> Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**Introduction.** The relevance of using fiber-optic sensors to monitor the geomechanical state of the mine workings of coal mines of the Karaganda coal-mining field is extremely high, because they are super-categorical and dangerous in a sudden explosion of coal dust and methane gas during mining operations in hazardous mines. Fiber optic sensors have several advantages: explosion safety, high accuracy, measurement speed and have good linearity of characteristics. **Aim.** The use of optical fiber of the ITU-T G.652.D standard as a sensor for monitoring the geomechanical state of an ar-

ray of coal mines, which is very promising in terms of creating a distributed monitoring system capable of timely signaling to personnel about the danger of a sudden collapse of a mine. **Materials and methods.** To develop methods for monitoring and measuring the geotechnical parameters of the workings, a simulation laboratory bench based on fiber-optic sensors was developed. The authors used a quartz single-mode optical fiber 9/125  $\mu\text{m}$  (OS2) Corning SMF-28e +  $\text{\textcircled{R}}$ . The article proposes systems in two variants, depending on the tasks and functionality. In the first variant, the well-known method of optical reflectometry OTDR (Optical time domain reflectometer) is used. In the second variant, the values of the additional losses caused by the mechanical action on the optical fiber are controlled. **Results.** During mechanical action on an optical fiber microcracks occur, leading to a change in the properties of light and an increase in additional losses of the light wave passing through it. **Conclusion.** The use of ITU-T G.652.D standard optical fiber for monitoring the geomechanical state of an array of coal mine workings is very promising, since the VODs developed on its basis have sufficiently high accuracy, measurement speed and good linearity of characteristics.

*Keywords: attenuation, loss, information-measuring system, optical fiber, safety, mining, array defects, fiber-optic sensor.*

### References

1. Chotchaev Kh.O. [Monitoring of the Stress-Strain State of the Rock Mass Using Sound and Geophysical Methods]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2016, no. 3, pp. 129–140. (in Russ.)
2. Buymistryuk G.Ya. [Principles of Building Intelligent Fiber Optic Sensors]. *Photon Express*, 2011, no. 6 (43), pp. 38–39. (in Russ.)
3. Buymistryuk G.Ya. [Fiber Optic Sensors for Extreme Conditions]. *Control Engineering*, 2013, no. 3 (45), pp. 34–40. (in Russ.)
4. Kim S.T., Park Y.-H., Park S.Y., Cho K., Cho J.-R. A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 1060–1070. DOI: 10.3390/s150101060
5. Liu T., Wei Y., Song G., Li Y., Wang J., Ning Y., Lu Y. Advances of Optical Fiber Sensors for Coal Mine Safety Monitoring Applications. *Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics*, 2013, pp. 102–111. DOI: 10.1109/ICMAP.2013.6733455
6. Chunde Piao, Jun Yuan, Bin Shi, Haijun Lu, Guangqing Wei, Chunsheng Gu. Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in the Anomaly Detection of Shaft Lining in Grouting. *Journal of Sensors*, 2015, pp. 163–169. DOI: 10.1155/2015/678634
7. Liu X., Wang C., Liu T., Wei Y., Lu J. Fiber Grating Water Pressure Sensor and System for Mine. *ACTA Photonica Sinica*, 2009, vol. 38, pp. 112–114.
8. Kumar Atul, Kumar Dheeraj, Singh U.K., Gupta P.S., Shankar Gauri. Optimizing Fibre Optics for Coal Mine Automation. *International Journal of Control and Automation*, 2011, vol. 3, pp. 63–70.
9. Naruse H., Uehara H., Deguchi T., Fujihashi K., Onishi M., Espinoza R., Pinto M. Application of a Distributed Fibre Optic Strain Sensing System to Monitoring Changes in the State of an Underground Mine. *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, no. 10, pp. 3202–3210. DOI: 10.1088/0957-0233/18/10/S23
10. Yurchenko A.V., Mekhtiev A.D., Bulatbaev F.N., Neshina E.G., Al'kina A.D. [Model of Fiber Optic Sensor for Monitoring the Mechanical Stress of Mine Workings]. *Flaw Detection*, 2018, no. 7, pp. 48–56. (in Russ.)
11. Beyli D., Rayt E. *Volokonnaya optika. Teoriya i praktika* [Fiber Optics. Theory and Practice]. Kudits-Obraz, 2006, 320 p.
12. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskaya tekhnika: sovremennoe sostoyanie i perspektivy* [Fiber Optic Technology: Current Status and Prospects]. Moscow, Volokonno-opticheskaya tekhnika Publ., 2005, 576 p.
13. Sokolov A.N., Yatseev V.A. [Fiber-Optic Sensors and Systems: Principles of Construction, Capabilities and Prospects]. *Measuring Technique*, 2006, no. 4, pp. 142–153. (in Russ.)



14. Gorlov N.I., Eyrikh V.I. [The Main Tasks of Monitoring Modern Fiber-Optic Transmission Lines]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Saginovskie chteniya № 4)* [Proceedings of the International Scientific-practical Conference (Saginov's Readings no. 11)], 2012, no. 2, pp. 68–70. (in Russ.)

15. Yurchenko A.V., Gorlov N.I., Mekhtiyev A.D., Kovtun A.A. [Research of the Additional Losses Occurring in Optical Fiber at its Multiple Bends in the Range Waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm]. *IOP Science. Journal of Physics*, 2016, vol. 671, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/671/1/012001

*Received 19 November 2019*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Использование оптического волокна G-652 для контроля горного массива угольных шахт / А.Д. Мехтиев, А.В. Юрченко, Е.Г. Нешина, А.Д. Алькина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 144–153. DOI: 10.14529/ctcr200114

**FOR CITATION**

Mekhtiyev A.D., Yurchenko A.V., Neshina E.G., Alkina A.D. Using G-652 Optical Fiber to Control Mountain Massifs of Coal Mines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 144–153. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200114

---

## OPTIMIZATION OF A-STAR SEARCH ALGORITHM

*D.S. Piskorskii, piskorskiids@susu.ru,*

*F.K. Abdullin, abdullinfk@susu.ru,*

*A.R. Nikolaeva, komogorovaar@susu.ru*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

**Introduction.** Autonomous mobile robots must be able to plan global and local motion paths. The A-star path planning algorithm allows us to calculate the shortest path between the starting and end points on a map with known static obstacles. In real conditions, when additional information about the area is entered (difficult or dangerous sections, areas with speed limits) and the cost of overcoming them is taken into account, A-star can lead to a non-optimal, for these conditions, solution of the problem. **Aim.** Consider options for optimizing the A-star path planning algorithm for use in various conditions with restrictions on the number of turns, linking to critical points on a map of the area, difficult and dangerous areas and assess the quality of the optimization. **Materials and methods.** Research is carried out by computer simulation of the A-star algorithm and options for its optimization in the MATLAB environment. The criteria for evaluating the quality of optimization are focused primarily on computational time and the path optimality with respect to the selected parameters. **Results.** The results of path calculation performed using the A-star algorithm before and after optimization are presented. In both cases, the following are estimated and compared: calculation time, number of analyzed polygons, number of turns and path length. **Conclusion.** In most cases, the optimization of the algorithm increases the path length and calculation time, but not significantly. Moreover, the new path corresponds to the given conditions, is the shortest in these conditions and, therefore, is optimal. The considered optimization options allow you to calculate the path taking into account additional information, estimate the path length and computational time. On the basis of these evaluations, it is possible to choose path planning method suitable for individual scenario.

*Keywords: path planning, A-star algorithm, motion path optimization, mobile robotic, path cost, model.*

### Introduction

Today, mobile robots are engaged in various tasks related to the delivery of goods, reconnaissance, automated patrol, and search and rescue operations. Autonomous mobile robots must be able to plan global and local motion paths, create a three-dimensional model of the environment, determine its location in space and control actuators to keep motion along the planned path [1].

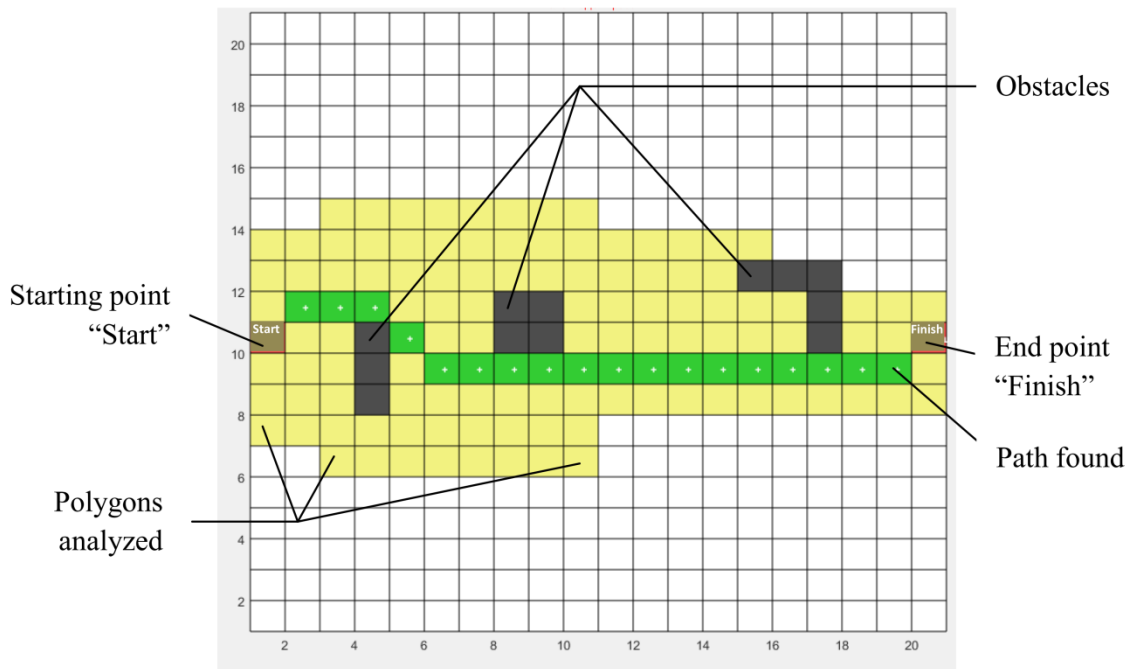
The path planning is an important and non-trivial task. Therefore a lot of studies are currently underway in this area. Various algorithms are being developed for calculating the path both in a static environment with known obstacles and in unknown and dynamic environments where it is impossible to have prior complete information that can be given to the robots before operation [2–8].

One of the most effective path finding algorithms in a static environment, widely used in practice, is the A-star algorithm [9, 10]. It is a modernized version of Dijkstra's algorithm. A-star allows us to calculate the path at the lowest cost from the initial peak to the final in a weighted directed graph. The least path cost in the algorithm means the shortest distance between the selected points.

However, if we are dealing with real objects that have some limitations (kinematic, controls, etc.) or when introducing additional information about the map of the area and taking into account the costs of overcoming them (the cost of maneuvering, overcoming hills, etc.) – the considered algorithm can lead to a non-optimal solution of the problem for given conditions [11, 12]. Therefore, for practical application, the algorithm must be optimized for real conditions including a number of restrictions [13]: kinematic restrictions (maximum speed, minimum turning radius, etc.), control limitations (remote control along the motion path), restrictions on the degree of danger of the chosen path and others.

### 1. Implementation of A-star algorithm in MATLAB

For research, the A-star algorithm was implemented as a computer model in the MATLAB modeling environment [14, 15]. The model's interface is a 20×20 polygon field where the starting point "Start", the end point "Finish" are marked and obstacles are set (Fig. 1).



Computational time, ms	31.3
Polygons analyzed	126
Path length (in polygons)	19
Number of turns	3

Fig. 1. Example of path calculation

The path calculation algorithm works as follows.

1. In the first step, two lists of polygons are created: a) pending analysis, b) analyzed. A starting point is added to the list of pending points.

2. For all neighboring polygons that are no obstacles, the coefficient  $F_n$  is calculated:

$$F_n = G_n + H_n, \tag{1}$$

where  $G_n$  is the cost of transitions from "Start" to the current point,  $H_n$  – the remaining distance from the current point to "Finish", and the number of the parent polygon from which the transition was made is remembered.

3. All enumerated polygons are recorded in the list of pending analysis. Next, from this list, the polygon  $P_{\min F_n}$  with the lowest value of  $F_n$  is selected.

If  $P_{\min F_n}$  is the final polygon, then the route is found and the algorithm is finished. If not,  $P_{\min F_n}$  is moved from the pending analysis list to the analyzed list.

4. Then, for each of the  $P_i$  ranges adjacent to it, with the exception of obstacles, the conditions are checked:

a) if  $P_i$  is included in the list of analyzed polygons, then skip the calculation, if not, go to point b);

b) if  $P_i$  is not included in the list of pending analysis, then we add it there by calculating  $F_{ni}$  and remembering the link to the parental polygon  $P_{\min F_n}$ , if  $P_i$  is included in the list of pending analysis, then compare the current  $F_{ni}$  with the resultant  $F_{nj}$  for this polygon. If  $F_{ni} < F_{nj}$ , then a shorter less expensive, path to the current polygon was found, therefore, replace  $F_{nj}$  with  $F_{ni}$ .

5. Repeat steps 2 to 4 until the end point of the route is reached.

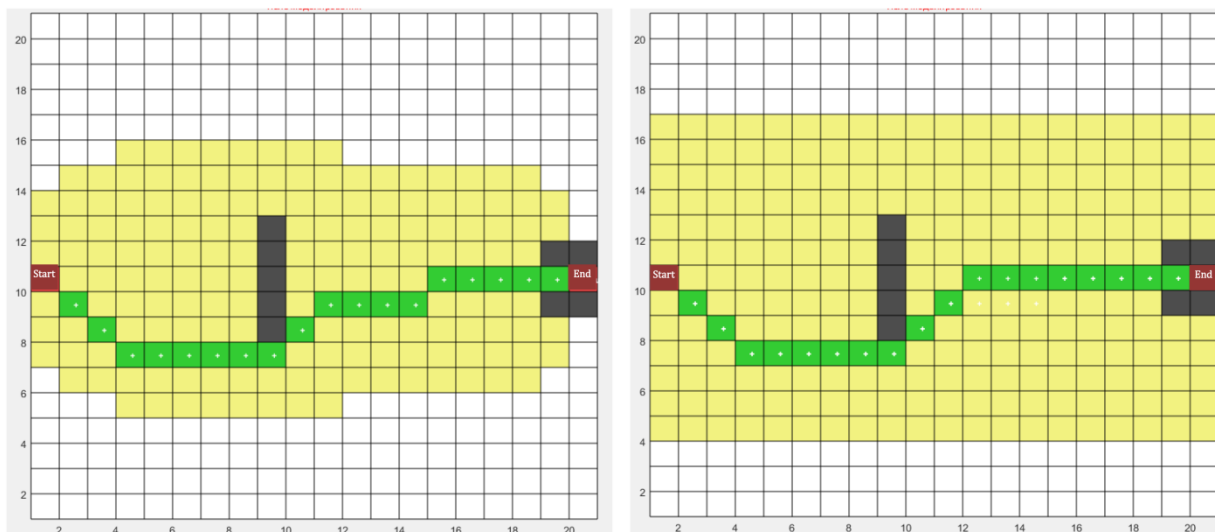
6. If the list of fields awaiting the analysis is empty and the endpoint is not reached, then the route does not exist.

### 2. Optimization of algorithm for the number of turns

A-star is optimal in terms of finding a path with a minimum length. The algorithm is modified by adding optimality to the minimum number of turns in the path. For this purpose additional cost coefficients  $W_n$  that increase the cost of the path when turning are introduced. In this case, the formula for calculating the cost of the path will be:

$$F_n = G_n + H_n + W_n. \quad (2)$$

The simulation results without optimization are shown in Fig. 2a, with optimization in Fig. 2b.



Computational time, ms	46.0
Polygons analyzed	177
Path length (in polygons)	19
Number of turns	5

a) results without optimization

Computational time, ms	62.5
Polygons analyzed	251
Path length (in polygons)	19
Number of turns	3

b) turn-optimized results

Fig. 2. Calculation of the optimal path

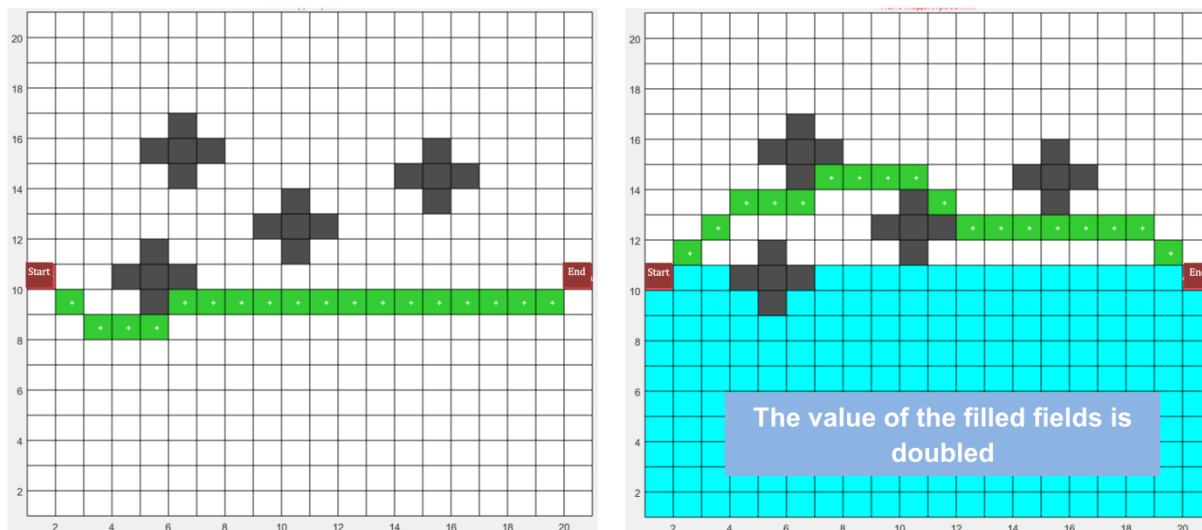
The results obtained show that, after optimization, the number of turns was reduced from five to three, while the path length, measured in the number of passed polygons, did not change. At the same time, the number of analyzed polygons increased and, as a result, so did the computational time, but not critically.

### 3. Optimization by complexity or time of the path

This type of optimization is carried out by introducing weighting factors that increase or decrease the cost of passage of the indicated polygons in the field. In practice, the increase in the cost of crossing the polygon corresponds to the complexity of the path along this route (mountainous or marshy terrain, or dangerous area) or the time taken to overcome the path (busy track). Increasing the cost of passage through such areas will allow us to find another way that these areas will avoid, the more the higher the cost of their passage.

Fig. 3b shows the results of a path search in the case when the cost of passing the polygons located in the lower part of the modeling field is doubled compared to Fig. 3a.

As a result of the simulation, the path along the upper part of the field was calculated for polygons with less cost. At the same time, the number of analyzed polygons decreased and, as a result, the calculation time.



Computational time, ms 15.6  
Polygons analyzed 124  
Path length (in polygons) 19  
Number of turns 3

a) results without optimization

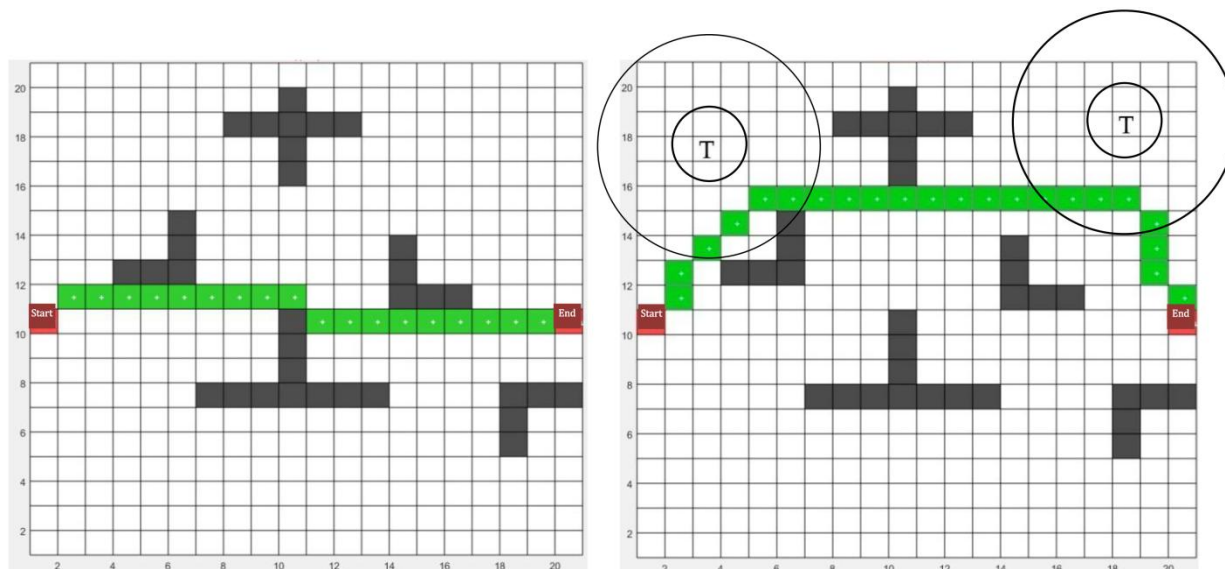
Computational time, ms 14.8  
Polygons analyzed 97  
Path length (in polygons) 19  
Number of turns 7

b) turn-optimized results

Fig. 3. Calculation of the optimal path

#### 4. Algorithm optimization based on critical points

The inverse solution of the previous problem can be used in cases where it is necessary for the path of the mobile robot to pass through certain areas on the map, even if the path increases. This may be suitable if the mobile robot must constantly keep in touch with control centers or collect information through relay stations installed in predetermined positions. In this case, when planning the path, it is necessary for the mobile robot to be in the coverage area of these stations (Fig. 4).



Computational time, ms 10,7  
Polygons analyzed 76  
Path length (in polygons) 19

a) results without optimization

Computational time, ms 16,8  
Polygons analyzed 124  
Path length (in polygons) 23

b) turn-optimized results

Fig. 4. Calculation of the optimal path

This can be achieved by adjusting weights. That is by significant increase in weights in the areas of the map (remote from the station by a distance exceeding the range of radio communications with a mobile robot).

Fig. 4 shows the calculations of the optimal path in the presence of two relay stations indicated on the modeling field by the symbol “T”. As a result of the calculation, we obtained a path (Fig. 4b) that deviates from the calculated shortest path (shown in Fig. 4a), however, this path passes through the polygons which are least distant from those allocated with radio coverage and therefore being more optimal for these conditions.

### Conclusion

As a result of the studies, options for optimizing the A-star path planning algorithm for its application in conditions with a limited number of turns, linking to critical points on a map of the area, as well as difficult or dangerous sections are proposed. In most cases, as a result of optimization, the path length and its computational time increase, but not significantly. Moreover, the new path corresponds to the given conditions, is the shortest for these conditions and, therefore, is optimal. The developed model allows us to estimate the time and necessary computing resources spent on calculating the path. On the basis of these evaluations, it is possible to choose path planning method suitable for individual scenario.

Of further interest is the task of optimizing the algorithm with incomplete reliability of a priori information or its absence in some parts of the analyzed terrain map.

### References

1. Noskov V.P., Rubtsov V.I., Rubtsov I.V. *Matematicheskie modeli dvizheniya i sistemy tekhnicheskogo zreniya mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov. Uchebnoe posobie* [Mathematical Models of Motion and Systems of Technical Vision of Mobile Robotic Complexes]. Moscow, 2015, 94 p.
2. Koenig S., Likhachev M., Furcy D. Lifelong Planning A\*. *Artificial Intelligence*, 2004, vol. 155, no. 1, pp. 93–146. DOI: 10.1016/j.artint.2003.12.001
3. Kilibarda G., Kudryavtsev V.B., Ushchymlich Sh. [The Independent Systems of Automata in the Labyrinth]. *Discrete Mathematics*, 2003, vol. 15, iss. 2, pp. 3–39. (in Russ.)
4. Maksimova E.I. [Comparison of the Quality of the Results of the A-Star Algorithm and its Modifications for the Road Network when Choosing a Route, Taking into Account the Direction of Movement at the Intersection]. *Siberian Science Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 117–123. (in Russ.)
5. Dan B. Marghitu. *Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB*. Springer-Verlag London Limited, 2009, 479 p. DOI 10.1007/978-1-84800-391-0
6. Zeng W., Church R.L. Finding Shortest Paths on Real Road Networks: the Case for A\*. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, vol. 23, no. 4, pp. 531–543. DOI: 10.1080/13658810801949850
7. Lei T., Songyi D., Gangxu G., Kunli Zh. A Novel Potential Field Method for Obstacle Avoidance and Path Planning of Mobile Robot. *3rd IEEE International Conference Computer Science and Information Technology*, 2010, vol. 9, 6 p. DOI: 10.1109/ICCSIT.2010.5565069
8. Choset H., Lynch K., Hutchinson S., Kantor G., Burgard W., Kavraki L., Thrun S. *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. MIT Press, 2005, 603 p.
9. Liu V. Methods of Path Planning in an Environment with Obstacles (Review). *Mathematics and Mathematical Modeling*, 2018, no. 1, pp. 15–58. (in Russ.) DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098
10. Lavrenova P.O., Afanasyeva I.M., Magid E.A. [Route Planning for an Unmanned Ground Robot Taking into Account Many Optimization Criteria]. *Results of Scientific-Practical Seminar “Unmanned Vehicles with Elements of Artificial Intelligence”*, 2015, pp. 10–20. (in Russ.)
11. Alonzo Kelly. *Mobile Robotics. Mathematics, Models and Methods*. Cambridge University, 2013, 716 p. DOI: 10.1017/CBO9781139381284
12. Spyros G. Tzafestas. *Introduction to Mobile Robot Control*. School of Electrical and Computer Engineering National Technical University of Athens, 2014, 691 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-417049-0.00004-3
13. Wallgrun J.O. Voronoi Graph Matching for Robot Localization and Mapping. *Transactions on Computational Science IX*. Springer, 2010, pp. 76–108. DOI: 10.1007/978-3-642-16007-3\_4

14. Gonzalez R., Mahulea C. and Kloetzer M. A Matlab-Based Interactive Simulator for Teaching Mobile Robotics. *IEEE 2015: Int. Conf. on Autom. Science and Engineering*, 2015, pp. 310–315. DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294097

15. Goldshtein A.L. *Optimizatsiya v srede MATLAB: ucheb. posobie* [Optimization in MATLAB: Textbook]. Perm, Publishing Perm National Research Polytechnic University, 2015, 192 p.

Received 10 November 2019

УДК 519.878, 62.519

DOI: 10.14529/ctcr200115

## ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ A-STAR

Д.С. Пискорский, Ф.Х. Абдуллин, А.Р. Николаева

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

**Введение.** Автономные мобильные роботы должны уметь самостоятельно планировать глобальную и локальную траектории своего движения. Алгоритм планирования пути A-star позволяет вычислить кратчайший путь между начальной и конечной точками на карте местности с известными статичными препятствиями. В реальных условиях при введении дополнительной информации о карте местности (труднопроходимые или опасные участки, участки с ограничением скорости) и учете затрат на их преодоление алгоритм может приводить к неоптимальному для данных условий решению задачи. **Цель исследования.** Рассмотреть варианты оптимизации алгоритма планирования пути A-star для применения в различных условиях, имеющих ограничения по количеству поворотов, привязку к критическим точкам на карте местности, труднопроходимые и опасные участки. Оценить качество проведенной оптимизации. **Материалы и методы.** Исследования проводятся путем компьютерного моделирования алгоритма A-star и вариантов его оптимизации в среде MATLAB. Критериями оценки качества оптимизации алгоритма являются скорость расчета пути и его оптимальность относительно выбранных параметров. **Результаты.** Приводятся результаты расчета пути, выполненные с помощью алгоритма A-star до и после оптимизации. В обоих случаях оцениваются и сравниваются: время расчета, количество проанализированных полигонов, число поворотов и длина пути. **Заключение.** В большинстве случаев в результате оптимизации алгоритма увеличивается длина пути и время расчета, но незначительно. При этом новый путь соответствует заданным условиям, является кратчайшим в этих условиях и, следовательно, оптимальным. Предложенные в статье варианты оптимизации позволяют вычислить путь с учетом дополнительной информации, оценить длину пути и скорость расчета. На основе этих оценок можно выбрать метод планирования пути, подходящий для отдельного сценария.

*Ключевые слова:* планирование пути, алгоритм A-star, оптимизация траектории движения, мобильный робот, стоимость пути.

### Литература

1. Носков, В.П. *Математические модели движения и системы технического зрения мобильных робототехнических комплексов: учеб. пособие* / В.П. Носков, В.И. Рубцов, И.В. Рубцов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 94 с.

2. Koenig, S. *Lifelong planning A\** / S. Koenig, M. Likhachev, D. Furcy // *Artificial Intelligence*. – 2004. – Vol. 155, no. 1. – P. 93–146. DOI: 10.1016/j.artint.2003.12.001

3. Килибарда, Г. *Независимые системы автоматов в лабиринте* / Г. Килибарда, В.Б. Кудрявцев, Ш. Ушчюмлич // *Дискретная математика*. – 2003. – Т. 15, вып. 2. – С. 3–39.

4. Максимова, Е.И. *Сравнение качества результатов алгоритма «A-star» и его модификации для дорожной сети при выборе маршрута с учетом направления движения на перекрестке* / Е.И. Максимова // *Вестник науки Сибири*. – 2014. – № 4. – С. 117–123.

5. Dan B. Marghitu. *Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB* / Dan B. Marghitu. – Springer-Verlag London Limited, 2009. DOI 10.1007/978-1-84800-391-0
6. Zeng, W. *Finding shortest paths on real road networks: the case for A\** / W. Zeng, R.L. Church // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2009. – Vol. 23, no. 4. – P. 531–543. DOI: 10.1080/13658810801949850
7. *A novel potential field method for obstacle avoidance and path planning of mobile robot* / T. Lei, D. Songyi, G. Gangxu, Zh. Kunli // *3-rd IEEE International Conference Computer Science and Information Technology*. – 2010. – Vol. 9. – 6 p. DOI: 10.1109/ICCSIT.2010.5565069
8. *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations* / H. Choset, K. Lynch, S. Hutchinson et al. – MIT Press, 2005. – 603 p.
9. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // *Математика и математическое моделирование*. – 2018. – № 1. – С. 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098
10. Лавренова, Р.О. Планирование маршрута для беспилотного наземного робота с учетом множества критериев оптимизации / Р.О. Лавренова, И.М. Афанасьева, Е.А. Магид // *Результаты всероссийского научно-практического семинара «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта»*. – 2015. – С. 10–20.
11. Kelly, Alonzo. *Mobile Robotics. Mathematics, Models and Methods* / Alonzo Kelly. – Cambridge university, 2013. – 716 p. DOI: 10.1017/CBO9781139381284
12. Tzafestas, Spyros G. *Introduction to Mobile Robot Control* / Spyros G. Tzafestas. – School of Electrical and Computer Engineering National Technical University of Athens, 2014. – 691 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-417049-0.00004-3
13. Wallgrun J.O. *Voronoi graph matching for robot localization and mapping* / J.O. Wallgrun // *Transactions on computational science IX*. – Springer, 2010. – P. 76–108. DOI: 10.1007/978-3-642-16007-3\_4
14. Gonzalez, R. *A Matlab-Based Interactive Simulator for Teaching Mobile Robotics* / R. Gonzalez, C. Mahulea, M. Kloetzer // *IEEE CASE'2015: Int. Conf. on Autom. Science and Engineering*. – 2015, pp. 310–315. DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294097
15. Гольдштейн, А.Л. *Оптимизация в среде MATLAB: учеб. пособие* / А.Л. Гольдштейн. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследоват. политехн. ун-та, 2015. – 192 с.

**Пискорский Дмитрий Сергеевич**, аспирант, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; piskorskiids@susu.ru.

**Абдуллин Фаиль Хамидуллович**, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; abdullinfk@susu.ru.

**Николаева Алиса Робертовна**, аспирант, инженер кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; komogorovaar@susu.ru.

*Поступила в редакцию 10 ноября 2019 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Piskorskii, D.S. Optimization of A-Star Search Algorithm / D.S. Piskorskii, F.K. Abdullin, A.R. Nikolaeva // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 154–160. DOI: 10.14529/ctcr200115

### FOR CITATION

Piskorskii D.S., Abdullin F.K., Nikolaeva A.R. Optimization of A-Star Search Algorithm. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 154–160. DOI: 10.14529/ctcr200115



# DIGITAL SPECTRAL ANALYSIS ON THE PLANE OF COMPLEX FREQUENCIES OF TRANSIENTS OF THE HEART RHYTHM AT SCHOOLCHILDREN AT PERFORMING A PROOF TEST

A.N. Ragozin<sup>1</sup>, ragozinan@susu.ru,  
 V.F. Telezhkin<sup>1</sup>, telezhkinvf@susu.ru,  
 A.M. Usynin<sup>2</sup>, dgb1@uzag74.ru,  
 L.Ya. Dotsoev<sup>3</sup>, dozoevl@mail.ru,  
 A.D. Pletenkova<sup>1</sup>, nastya.pletenkova@mail.ru,  
 B.B. Saidov<sup>1,4</sup>, matem.1994@mail.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State Medical University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>3</sup> South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>4</sup> Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

**Introduction.** The method of processing experimental data obtained in the form of a time-varying non-stationary signal is described. In the experimental study of transients associated with changes in the heart rate of schoolchildren during a proof-reading test, it became necessary to develop a new effective method for processing the results of dynamic measurements. **Purpose of the study.** Consider the main points of this methodology, which is based on the Prony method, and the possibility of its use in the field of studies of changes in heart rate variability (HRV) in response to various functional test influences. **Materials and methods.** Traditional approaches related to the calculation of power spectral density (PSD) and based on classical spectral methods are currently very widespread. The model of constant rhythm is not applicable for non-stationary dependencies of HRV. For spectral analysis of time dependences of HRV reflecting transient processes (non-stationary processes) it is proposed to apply spectral analysis on the plane of complex frequencies (PCF). PCF is a generalization of the usual spectrum. The calculation of the PCF is based on the Prony procedure, based on parametric modeling. **Results.** PCF reflects the frequency structure of oscillations of unsteady physiological signals, therefore, can be used to classify them. It is shown that the use of spectral analysis on the plane of complex frequencies for transient processes of the heart rhythm makes it possible (according to the parameters of the PCF) to calculate, for diagnostic purposes, the numerical values of the parameters characterizing the reactions of various regulatory mechanisms of the heart rhythm in response to various functional test influences. **Conclusion.** The best results, as compared with the methods of classical spectral analysis, for the analysis of transients in the form of a HRV signal were given by approaches based on the use of spectral analysis on the plane of complex frequencies.

*Keywords:* heart rate variability, Prony's method, spectrum on the plane of complex frequencies, physiological signals, heart rhythm, parametric model.

## Introduction

Traditional methods for analyzing heart rate variability (HRV) using the spectrum on the plane of complex frequencies (SCF), which can be represented as physically realized signals and time series generated by complex (multimodal) dynamic systems, are mainly based on various spectral correlation methods. Moreover, due to the statistical approach to the analysis of signals, the dynamic nature of the processes that generate them, as a rule, goes by the wayside. Only a dynamic approach to the analysis of changes in heart rate in schoolchildren during a proof-reading test allows to consider signal analysis as a process of identifying dynamic systems based on the results of an analysis of experimental data. In contrast to Fourier spectral analysis, spectral analysis on the plane of complex frequencies allows to: 1) to perform without spectral effects spectral estimation of time series segments in time windows of limited duration; 2) to use a non-stationary time series model; 3) to determine the own frequency spectrum and the spectrum of modal damping of the system modes that are manifested in this segment of the time series. The Prony's method lacks a number of limitations inherent in the fast Fourier transform (FFT).

### Problem statement

The work is devoted to the experimental study of transients of the heart rhythm in three types of state when the heart rate changes in schoolchildren during a proof-reading test. As a research tool, the method of spectral analysis on the plane of complex frequencies is used. The parameters for constructing the spectrum of complex frequencies are:  $f$ ,  $\alpha$ ,  $p$  – harmonic frequency [Hz], coefficient of harmonic amplitude change according to exponential law [ $s^{-1}$ ] and harmonic power [unit of measurement<sup>2</sup>]. The method expands the possibilities of studying the physiological regulation of transients in the body of children and teenagers during the educational process.

Studying the student's functional capabilities when performing stress tests is of great practical importance for determining the level of functional tension of the child's regulatory systems, which is determined by the degree of physiological maturity of the body and environmental conditions. Change in heart rate – a universal operational response of the whole organism to any environmental impact. One of the important links of this mechanism provides a balance between the sympathetic and parasympathetic departments of the autonomic nervous system [1, 2]. Heart rate variability indicators reflect the state of the autonomic nervous system, the degree of tension of regulatory mechanisms, therefore, it is important to study them in children of different ages in conditions of adaptation to school loads, which plays an important role in the prevention of diseases [3, 4]. Transitional states of the physiological system proceed with a pronounced activation of some regulation rhythms and suppression of others, which is manifested by a change in the nature of the structural-temporal organization of vibrational activity [5]. Thus, it is required to show that a deep assessment of the state of the autonomic nervous system is possible through the use of spectral analysis of HRV [6–14].

### Solution

It should be noted that when using spectral analysis, the action of the regulation mechanisms during the registration of the heart rhythm should remain constant (stationary observation conditions). The temporary recording of HRV should be the implementation of a stationary random process, that is, the process on average is uniform in time (the variance and mean are constant over time). The transient processes of HRV caused by the influence of a functional test are non-stationary processes and therefore are excluded during the spectral analysis. To analyze transient processes of heart rhythm, the technology of spectral analysis on the plane of complex frequencies is used [15–23].

The calculation of the SCF implies the representation of the studied HRV dependence as the sum of a certain number of sinusoids (harmonics), characterized by a phase, frequency and amplitude, which changes in time (constant  $\alpha = 0$ ), increasing ( $\alpha > 0$ ), or decaying ( $\alpha < 0$ ), by exponential law ( $e^{\alpha t}$ ). The basis for the algorithm for calculating the SCF is the Prony procedure. The investigated time process of HRV is represented as a set of rhythms with different frequencies, initial phases, but with varying intensities by exponential law. The set of harmonics into which the process under study decomposes must correspond to its nature. The harmonics varying in amplitude reflect the adjustment process and the change in the frequency composition of the process under study. The adjustment process can be observed separately by the generally accepted frequency ranges [16].

The parameters for constructing the SCF HRV are:  $f$  – harmonic frequency [Hz],  $\alpha$  – coefficient of variation of the harmonic amplitude according to the exponential law [ $s^{-1}$ ],  $P$  – harmonic power [ $ms^2$ ]. SCF is displayed in the form of lines with height  $P$ , placed on the plane of the complex frequency ( $f$ ,  $\alpha$ ). If the time dependence of the HRV is strictly stationary, then the harmonics into which the studied dependence of the HRV is decomposed will have constant in time amplitudes ( $\alpha = 0$ ) (intensity) and the SCF takes the form of a usual spectrum [16].

The information content of indicators considered on the basis of the SCF is shown in [16]. The transition process of insertion is based on the activation of the sympathetic and suppression of the parasympathetic departments of the autonomic nervous system, which leads to an increase in the number of heart contractions (HC) and a decrease in heart rate variability (HR). This means that changes in the vibrational activity of the heart rate observed during the transition process of working in should occur in at least three frequency ranges: low-frequency trend (deviation), oscillations at low frequencies (activation and suppression) and at frequencies of respiratory arrhythmia (suppression). In solving the problem of the present work, 71 healthy third-grade students were examined. Heart rate variability was recorded: one minute at rest, running in and exertion while performing a proof test. To study the quantitative and

qualitative characteristics of the transition process, spectral analysis was applied on the plane of complex frequencies [15–23]. The energy (E) of increasing and damping oscillations reflects the overall energy balance of the transition process, and the nature of the transition process is quantified by the instability and periodicity indices [15–23]. The instability of the vibrational process refers to the intensity in time of the easing or increasing fluctuations. The instability index (ANN) is calculated as the ratio of the magnitude of the observation period of the transient to the time interval of the change in vibrational energy (attenuation or amplification of the oscillations)  $e$  times ( $e$  is the Euler number equal to 2.72 ...). The periodicity index (PI) of an unsteady process shows the number of periods that fit into the time interval of a change in vibrational energy by  $e$  times.

The greater the module of the instability index, the more pronounced the aperiodic nature of the transition process. Conversely, the larger the module of the periodicity index, the more the trend of the transition process appears to be oscillations that are stable in amplitude. The sign in front of the indices of instability and periodicity indicates the decaying or increasing character of the dynamics of the transitional oscillatory process.

Thus, these indicators obtained using spectral analysis on the plane of complex frequencies contain important information about the structure of the transient oscillatory process and can serve as indicators of the quality of the regulatory system.

The boundaries of the frequency ranges in the spectrum of complex frequencies, from 0 to 0.05 Hz (VLF), 0.05 to 0.15 Hz (LF), 0.15 to 0.6 Hz (HF), reflect generally accepted ideas about the mechanisms of manifestation of the sympathetic and parasympathetic parts of the autonomic nervous system. Heart rate transient indicators:  $E_{VLF}$  ( $ms^2$ ) – transient integrated energy in the frequency range from 0 to 0.05 Hz;  $E_{LF}$  ( $ms^2$ ) – frequency transient integrated energy from 0.05 to 0.15 Hz;  $E_{HF}$  ( $ms^2$ ) – the integral energy of the transition process in the frequency range from 0 to 0.6 Hz;  $PI_{VLF}$  – periodicity index in the range of frequencies from 0 to 0.05 Hz;  $INS_{VLF}$  – heart rate instability index in the range of frequencies from 0 to 0.05 Hz;  $PI_{LF}$  – heart rate index in the range of frequencies from 0.05 to 0.15 Hz;  $INS_{LF}$  – heart rate instability index in the frequency range from 0.05 to 0.15 Hz;  $PI_{HF}$  – heart rate index in the range of frequencies from 0.15 to 0.6 Hz;  $INS_{HF}$  – heart rate instability index in the frequency range from 0.15 to 0.6 Hz; Depending on the ratio between the values of  $E_{VLF}$ ,  $E_{LF}$  и  $E_{HF}$  we distinguished three variants of heart rate dynamics in children. The first option, in which the integrated transient energy prevails at the lowest frequencies, so that the ratio of  $E_{VLF}$  to the sum of  $E_{LF}$  and  $E_{HF}$  is greater than or equal to 0.5. The basis of the transition process of this option is the oscillation represented by the low-frequency decaying cosine wave. The spectrum on the plane of complex frequencies has a pronounced peak at the corresponding low frequency (Fig. 1).

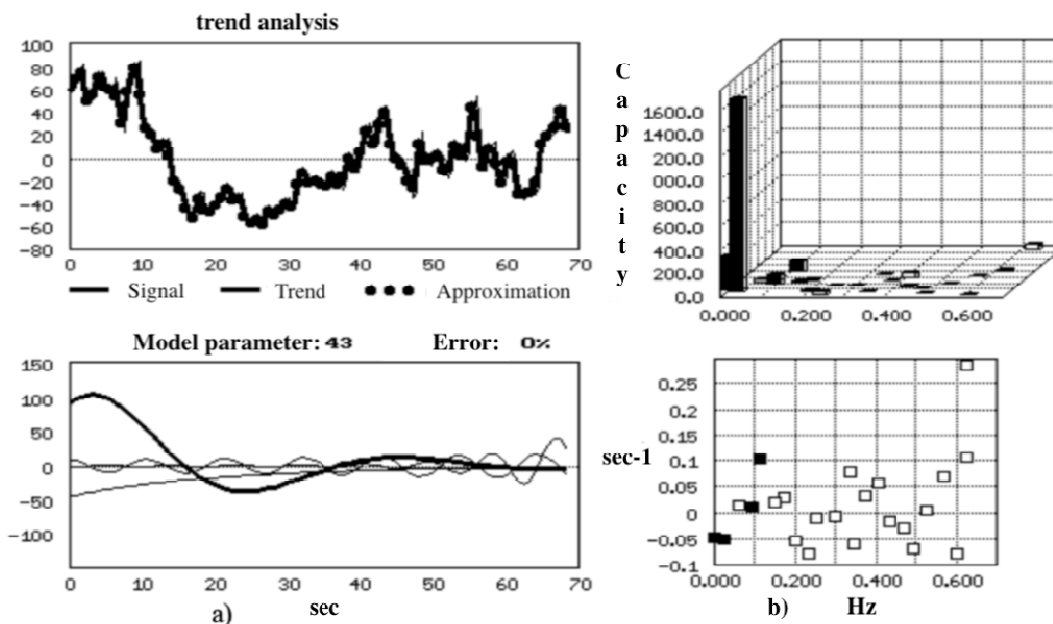


Fig. 1. The first option is the transition process: a) heart rate dynamics, b) the spectrum of heart rate transition on the plane of complex frequencies

## Краткие сообщения

In the second option, the integrated low-frequency LF energy dominates, where the ratio of ELF to the sum of EHF and EVLF is greater than or equal to 0.5. This transient process appears to be several low-frequency cosine waves, both fading and increasing. Their power and character are reflected in the spectrum on the plane of complex frequencies (Fig. 2).

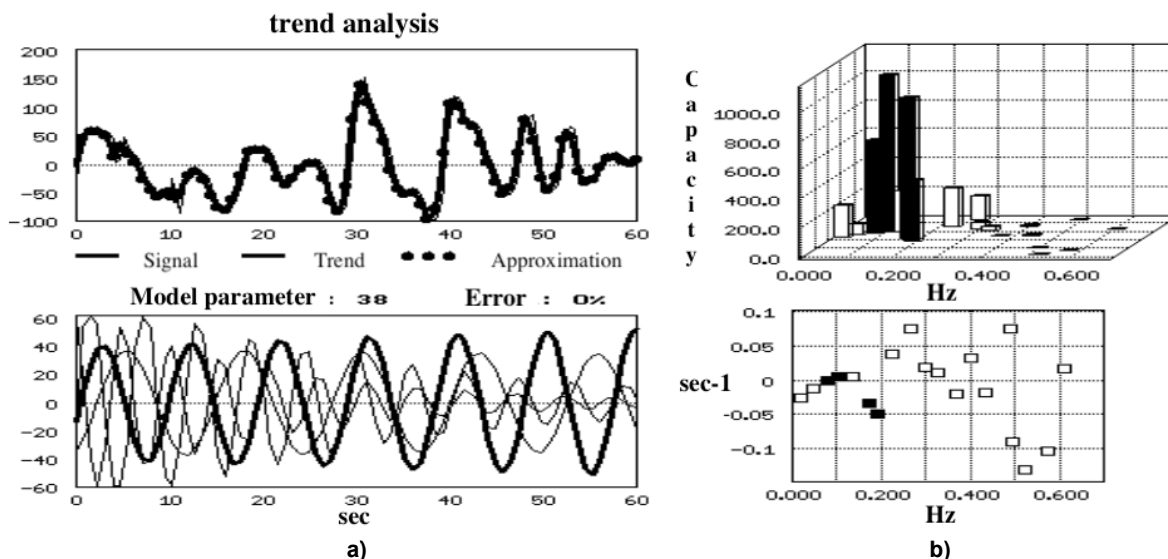


Fig. 2. The second option is the transition process: a) heart rate dynamics, b) the spectrum of heart rate transition on the plane of complex frequencies

In the third option, the ratio  $E_{HF}$  to the sum  $E_{VLF}$  и  $E_{LF}$  is greater or equal to 0.5. This means that most of the transient energy is in the high frequency range HF. As a result of the analysis, this heart rate dynamics is represented in the form of a high-frequency, highly decaying cosine wave, whose power prevails over the low-frequency components of the transition process (Fig. 3).

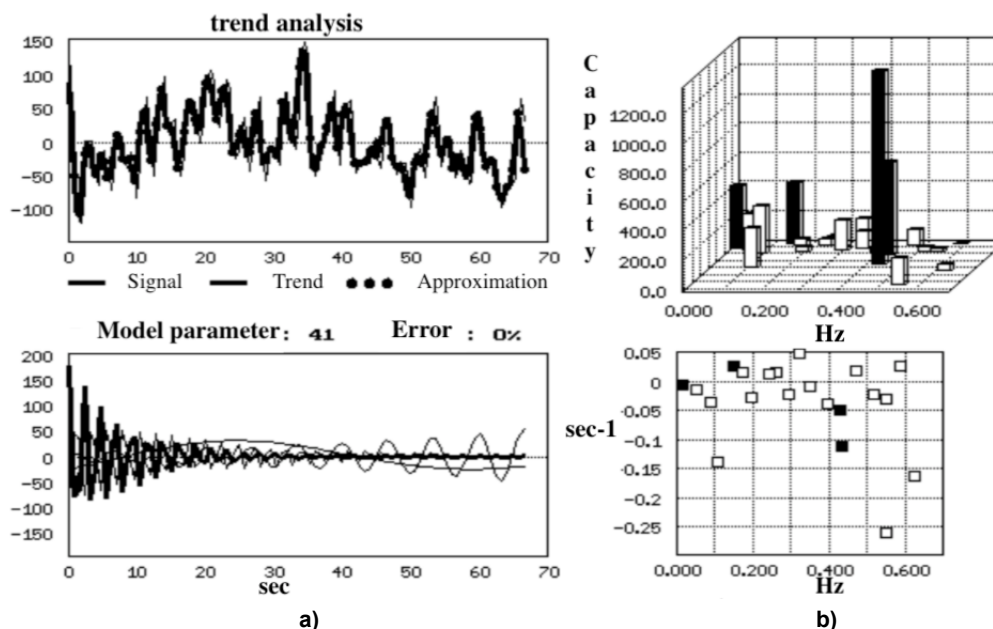


Fig. 3. The third option is the transition process: a) heart rate dynamics, b) spectrum on the plane of complex frequencies

Thus, according to the variants of heart rhythm dynamics, three groups were formed: group 1 was represented by children in whom EVLF – 37 children prevailed, group 2 – 19 children, ELF dominated in them, and group 3 – children in which EHF – dominated by 15 people (Table 1).

Table 1

Distribution of children into groups, depending on the severity  
of the energy transition process (M ± SD)

	Group 1 n = 37	Group 2 n = 19	Group 3 n = 15
E <sub>VLF</sub>	0.54 ± 0.13*	0.22 ± 0.11	0.21 ± 0.11
E <sub>LF</sub>	0.23 ± 0.11	0.52 ± 0.11*	0.24 ± 0.13
E <sub>HF</sub>	0.23 ± 0.12	0.26 ± 0.08	0.55 ± 0.11*

Note \* P < 0,05

In all groups, during exercise, a significant transition to a new, higher level of functioning of the cardiovascular system was noted. It was manifested by a more frequent and less variable heart rate (Table 2).

Table 2

Characteristics of the heart rate of schoolchildren during the transition process (M±SD)

	Group 1	Group 2	Group 3
Concentration of attention (proof test)	91 ± 84	36 ± 17*	52 ± 51*~
E <sub>VLF</sub>	1479 ± 1247	659 ± 991*	631 ± 473*
PI <sub>VLF</sub>	-0.45 ± 0.93	-0.52 ± 2.02	-0.53 ± 1.21
INS <sub>VLF</sub>	-7.65 ± 9.14	-2.21 ± 5.57*	-5.29 ± 9.66
E <sub>LF</sub>	682 ± 787	1276 ± 1166*	625 ± 556~
PI <sub>LF</sub>	0.72 ± 9.49	1.19 ± 9.91	-12.76 ± 40.23
INS <sub>LF</sub>	-1.52 ± 3.8	-2.68 ± 3.2	-0.36 ± 3.84~
E <sub>HF</sub>	570 ± 747	635 ± 633	1676 ± 1419*~
PI <sub>HF</sub>	5.29 ± 23.55	5.74 ± 84.42	-11 ± 33.86
INS <sub>HF</sub>	-4.42 ± 7.51	-1.82 ± 4.09	-4.39 ± 10.65

Note. Differences with P < 0.05.

\*Second and third groups from the first.

~Third group from the second.

When considering the characteristics of the transition process, it turned out that in the first group INSVLF is significantly higher than in the second. This was the only significant difference that we obtained as a result of a statistical analysis of the research results. According to the periodicity index, the groups did not differ from each other. Thus, the first group of children, which turned out to be the largest, showed a transition process with a pronounced aperiodic character at the lowest frequencies, while the energy value (EVLf) was the largest. This corresponds to the concept of a high-quality transition process – deviation and fast stabilization at a new level of functioning, that is, a stable type of physiological regulation (Fig. 1). On the contrary, the second variant of the transition process relative to the first reflects a low level of quality with unstable regulation at the frequencies of the LF band (Fig. 2). The highest transient power of the third option is concentrated in the decaying high-frequency component, and with a significantly lower EVLF in terms of the INSVLF indicator, it does not significantly differ from the first (Fig. 3).

When comparing the results of the proofreading test, significant differences were revealed in terms of attention concentration (AC). In terms of AC, the first group was significantly ahead of the second and third, while the AC in the second group was the smallest among all the studied groups.

### Conclusion

The method of spectral analysis on the plane of complex frequencies is an informative method for assessing the parameters of transient processes of physiological regulation of the human body.

The indicators obtained by spectral analysis on the plane of complex frequencies contain important information about the structure of the transitional oscillatory process and can serve as indicators of the quality of the regulation system of the human body.

The revealed variants of transitional states of the heart rhythm made it possible to identify the relationship between the characteristics of the dynamics of the heart rhythm and the indicator of concentration during the proof test by schoolchildren, which is relevant in assessing the adaptation of children to school loads.

### References

1. Baevskiy R.M. [Scientific and Theoretical Basis of Using Heart Rate Variability Analysis to Assess the Degree of Voltage of the Body's Regulatory Systems]. *Tez. dokl. mezhdunar. simp. "Komp'yuternaya elektrokardiografiya na rubezhe stoletiy XX–XXI"* [Proc. of Int. Simp. "Computer Electrocardiography at the Turn of the XX–XXI Centuries"]. Moscow, 1999, pp. 116–119. (in Russ.)
2. Baevskiy R.M., Berseneva A.P. *Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma i risk razvitiya zabolevaniy* [Assessment of the Adaptive Capabilities of the Body and the Risk of Developing Diseases]. Moscow, Medicine Publ., 1997, 233 p.
3. Dotsoev L.Ya., Usynin A.M., Vagner N.I., Tutatchikov A.T. [Functional State of Students 11–12 Years in Conditions of Intensive Training Loads According to the Analysis of Heart Rate Variability]. *Human Physiology (RAN)*, 2003, vol. 29, no. 4, pp. 62–65 (in Russ.) DOI: 10.1023/A:1024977406829
4. Bezrukikh M.M. [School Risk Factors and Children's Health]. *Manestr*, 1999, no. 3, pp. 30–38. (in Russ.)
5. Veyn A.M., Ayrapetyants M.G., Haspekova N.B., Kuterman E.M., Kamenetskaya B.I. [Types of Heart Rhythm Reactions to Short-Term Loads and Their Connection with Psychophysical Personality Traits (Formalized Approach)]. *Human Physiology*, 1988, vol. 14, no. 26, p. 977. (in Russ.)
6. Marple Jr. S.L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Digital Spectral Analysis and Its Applications]. Moscow, World Publ., 1990, 584 p. (in Russ.)
7. Hayutin V.M., Lukoshkova E.V. [Spectral Analysis of Fluctuations in Heart Rate: Physiological Foundations and Its Complicating Phenomena]. *Russian Physiological Journal I.N. Sechenova*, 1999, vol. 85, no. 7, pp. 893–909. (in Russ.)
8. Svyatosh Y. [Analysis of Biological Signals in the Spectral Region]. *Radio Electronics (News of Universities)*, 1996, vol. 39, no. 12, pp. 44–49. (in Russ.)
9. Ragozin A.N. [Informativeness of Spectral Indicators of Heart Rate Variability]. *Bulletin of Arrhythmology*, 2001, no. 22, pp. 38–40. (in Russ.)
10. Ragozin A.N., Kononov D.Yu., Usynin A.M., Mikhailov M.V. [A Computer Program to Assess the Functional State of High School Students]. *Educational and Information Technology in Education*, 2001, no. 4. Available at: <https://journals.susu.ru/pit-edu/article/view/308/0>. (in Russ.)
11. Ragozin A.N. [Computer Methods of Analyzing the Structure of Fluctuations in Heart Rate Variability]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Education, Health, Physical Culture*, 2003, vol. 2, no. 5, pp. 194–195. (in Russ.)
12. Astakhov A.A., Ragozin A.N. [Compare Method Heart Variability (HRV) for Preanesthesia Control]. *Proc. of 9th European Congress of Anesthesiology*, Jerusalem, Israel, October 2–7, 1994.
13. Dotsoev L.Ya., Ragozin A.N., Usynin A.M., Astakhov A.A., Telezhkin V.F. [Study of Integrative Activity of the Heart and Blood Vessels Using Amplitude-Phase Frequency Characteristics]. *Bulletin of Science and Education of Northwest Russia. Series "Applied Physics"*, 2017, vol. 3, no. 3, pp. 1–15. Available at: <http://vestnik-nauki.ru/2017-t-3-No3-2017-v-3-No3/>. (in Russ.)
14. Astakhov S., Nenasheva A., Astakhov A., Ragozin A. [Heart Rate Variability and Photoplethysmogram Indicators in Assessment of Adaptation Levels in Students Experiencing Examination Loads]. *Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche*, 2018 March; 177 (3 Suppl 1): 1–8. DOI: 10.23736/S0393-3660.17.03722-6
15. Astakhov A.A., Ragozin A.N., Bubnova N.D., Govorov B.M. [Comparison of Absolute Values of the Five Parameters of Circulation, Their Variance, Spectral Analysis Data and Complex Frequencies in Healthy Young Men Alone]. *Sbornik nauchnykh trudov simpoziuma "Medlennye kolebatel'nye protsessy v organizme cheloveka: teoriya, prakticheskoe primenenie v klinicheskoy meditsine i profilaktike"* [Collection of Scientific Works of the Symposium "Slow Vibrational Processes in the Human Body: Theory, Practical Application in Clinical Medicine and Prevention"]. Novokuznetsk, 1999, pp. 23–33. (in Russ.)

16. Ragozin A.N. [Analysis of the Spectral Structure of Non-Stationary Physiological Signals on the Plane of Complex Frequencies]. *Digital Electronic Systems (Electronic Journal)*, 1999–2000, no. 3, pp. 34–44. (in Russ.)

17. Ragozin A.N. [Identification of Low-Frequency Vibration Parameters VLF and ULF Ranges and Analysis of Transitions on 5-minute Heart Rate Recordings Using Spectral Analysis on the Plane of Complex Frequencies] *Sb. nauchnykh trudov simpoziuma. "Kolebatel'nye protsessy gemodinamiki. Pul'satsiya i flyuktuatsiya serdechno-sosudistoy sistemy"* [Scientific Work of the Symposium. "The Vibrational Processes of Hemodynamics. Pulse and Fluctuation of the Cardiovascular System"]. Chelyabinsk, 2002, pp. 300–307. (in Russ.)

18. Ragozin A.N. [Increased Reliability of the Assessment of the State of the Autonomic Nervous System by the Dynamics of the Heart Rate]. *Sb. nauchnykh trudov simpoziuma "Kolebatel'nye protsessy gemodinamiki. Pul'satsiya i flyuktuatsiya serdechno-sosudistoy sistemy"* [Scientific Work of the Symposium "The Vibrational Processes of Hemodynamics. Pulse and Fluctuation of the Cardiovascular System"]. Chelyabinsk, 2002, pp. 307–313. (in Russ.)

19. Ragozin A.N., Astakhov A.I. [Analysis on the Plane of Complex Frequencies and Classical Spectral Analysis in Assessing the Structure of Heart Rate Fluctuations]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Education, Health, Physical Culture*, 2009, vol. 21, no. 39, pp. 75–82. (in Russ.) DOI: 10.14529/ozfk09.39.16

20. Astakhov A.I., Nagornaya A.S., Naumova V.V. [Regulation of Adaptation of Hemodynamics to Aging]. *Modern Technology in Medicine*, 2011, vol. 1, pp. 55–60. (in Russ.)

21. Ragozin A.N. [Spectral Analysis of Heart Rate Variability on the Plane of Complex Frequencies]. *Ural Cardiology Journal*, 2000, no. 2, pp. 16–20. (in Russ.)

22. Shchelokova O.I. [Safety in Anesthesia, Intensive Care and Resuscitation]. *Bulletin of the Council of Young Scientists and Specialists of Chelyabinsk Region*, 2014, no. 3 (Sept.), pp. 57–66. (in Russ.)

23. Astakhov A.A. *Adaptatsionnyye protsessy gemodinamiki pri razlichnykh variantakh anestezii i intensivnoy terapii u patsiyentov otdeleniy reanimatsii. Dis. doktora meditsinskikh nauk* [Adaptation Processes of Hemodynamics with Various Variants of Anesthesia and Intensive Care in Patients of Intensive Care Units. Doct. sci. diss.]. Ekaterinburg, 2012, 264 p.

Received 11 November 2019

УДК 612.17 (075.8)

DOI: 10.14529/ctcr200116

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СЕРДЕЧНОГО РИТМА НА ПЛОСКОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ЧАСТОТ У ДЕТЕЙ ШКОЛЬНОГО ВОЗРАСТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КОРРЕКТУРНОЙ ПРОБЫ

А.Н. Рагозин<sup>1</sup>, В.Ф. Тележкин<sup>1</sup>, А.М. Усынин<sup>2</sup>, Л.Я. Доцоев<sup>3</sup>,  
А.Д. Плетенкова<sup>1</sup>, Б.Б. Саидов<sup>1, 4</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный медицинский университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет,  
г. Челябинск, Россия,

<sup>4</sup> Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими,  
г. Душанбе, Республика Таджикистан

**Введение.** Изложена методика обработки экспериментальных данных, полученных в виде изменяющегося во времени нестационарного сигнала. При экспериментальном изучении переходных процессов, связанных с изменением сердечного ритма у школьников, при прове-

дении корректурной пробы возникла необходимость в разработке новой эффективной методики обработки результатов динамических измерений. **Цель исследования.** Рассмотреть основные положения указанной методики, в основе которой лежит метод Прони, и возможности ее использования в области исследований изменений variability сердечного ритма (ВСР) в ответ на различные функциональные пробные воздействия. **Материалы и методы.** Традиционные подходы, связанные с вычислением спектральной плотности мощности (СПМ) и основанные на классических спектральных методах, получили в настоящее время очень широкое распространение. Для нестационарных зависимостей ВСР модель постоянных ритмов неприменима. Для спектрального анализа временных зависимостей ВСР, отражающих переходные процессы (нестационарные процессы), предлагается применять спектральный анализ на плоскости комплексных частот (СКЧ). СКЧ является обобщением обычного спектра. В основе расчета СКЧ лежит процедура Прони, основанная на параметрическом моделировании. **Результаты.** СКЧ отражает частотную структуру колебаний нестационарных физиологических сигналов, поэтому может использоваться для их классификации. Показано, что применение спектрального анализа на плоскости комплексных частот для переходных процессов сердечного ритма делает возможным (по параметрам СКЧ) расчет в целях диагностики, числовых значений параметров, характеризующих реакции различных регуляторных механизмов ритма сердца в ответ на различные функциональные пробные воздействия. **Заключение.** Лучшие результаты, по сравнению с методами классического спектрального анализа, для анализа переходных процессов в виде сигнала ВСР дали подходы, основанные на использовании спектрального анализа на плоскости комплексных частот.

*Ключевые слова:* изменения сердечного ритма, метод Прони, метод спектрального анализа на плоскости комплексных частот, физиологические сигналы, сердечный ритм, параметрические модели.

### Литература

1. Баевский, Р.М. Научно-теоретические основы использования анализа variability сердечного ритма для оценки степени напряжения регуляторных систем организма / Р.М. Баевский // Тез. докл. междунар. симп. «Компьютерная электрокардиография на рубеже столетий XX–XXI». – М., 1999. – С. 116–119.
2. Баевский, Р.М. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний / Р.М. Баевский, А.П. Берсенева. – М.: Медицина, 1997. – 233 с.
3. Функциональное состояние учащихся 11–12 лет в условиях интенсивных учебных нагрузок по данным анализа variability сердечного ритма / Л.Я. Доцоев, А.М. Усынин, Н.И. Вагнер, А.Т. Тутатчиков // Физиология человека (РАН). – 2003. – Т. 29, № 4. – С. 62–65.
4. Безруких М.М. Школьные факторы риска и здоровья детей // Манестр. – 1999. – № 3. – С. 30–38.
5. Типы реакций ритма сердца на кратковременные нагрузки и их связь с психофизическими особенностями личности (формализованный подход) / А.М. Вейн, М.Г. Айрапетяни, Н.Б. Хаспекова и др. // Физиология человека. – 1988. – Т. 14, № 26. – С. 977.
6. Марпл-мл., С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
7. Хаяутин, В.М. Спектральный анализ колебаний частоты сердцебиений: физиологические основы и осложняющие его явления / В.М. Хаяутин, Е.В. Лукошкова // Российский физиологический журнал им. И.Н. Сеченова. – 1999. – Т. 85, № 7. – С. 893–909.
8. Святош, Й. Анализ биологических сигналов в спектральной области / Й. Святош // Радиоэлектроника (Изв. вузов). – 1996. – Т. 39, № 12. – С. 44–49.
9. Рагозин, А.Н. Информативность спектральных показателей variability сердечного ритма / А.Н. Рагозин // Вестник аритмологии. – 2001. – № 22. – С. 38–40. – <http://vestar.ru/atts/1563/1563ragozin.pdf>.
10. Компьютерная программа для оценки функционального состояния учащихся средних школ / А.Н. Рагозин, Д.Ю. Кононов, А.М. Усынин, М.В. Михайлов // Педагогические и информационные технологии в образовании. – 2001. – № 4. – <https://journals.susu.ru/pit-edu/article/view/308/0>.
11. Рагозин, А.Н. Компьютерные методы анализа структуры колебаний variability



сердечного ритма / А.Н. Рагозин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование, здравоохранение, физическая культура». – 2003. – Вып. 2, № 5. – С. 194–195.

12. Astakhov, A.A. Compare method heart variability (HRV) for preanesthesia control / A.A. Astakhov, A.N. Ragozin // Proc. of 9th European Congress of Anesthesiology, Jerusalem, Israel, October 2–7, 1994.

13. Исследование интегративной деятельности сердца и сосудов с помощью амплитудно-фазовых частотных характеристик / Л.Я. Доцоев, А.Н. Рагозин, А.М. Усынин и др. // Вестник науки и образования Северо-Запада России. Серия «Прикладная физика». – 2017. – Т. 3, № 3. – С. 1–15. – <http://vestnik-nauki.ru/2017-m-3-№3-2017-v-3-№3/>.

14. Heart rate variability and photoplethysmogram indicators in assessment of adaptation levels in students experiencing examination loads / S. Astakhov, A. Nenasheva, A. Astakhov, A. Ragozin // Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche, 2018 March; 177 (3 Suppl 1): 1–8. DOI: 10.23736/S0393-3660.17.03722-6

15. Сопоставление абсолютных значений пяти параметров кровообращения, их дисперсии, данных спектрального анализа и комплексных частот у здоровых молодых мужчин в покое / А.А. Астахов, А.Н. Рагозин, Н.Д. Бубнова, Б.М. Говоров // Сборник научных трудов симпозиума «Медленные колебательные процессы в организме человека: теория, практическое применение в клинической медицине и профилактике». – Новокузнецк, 1999. – С. 23–33.

16. Рагозин, А.Н. Анализ спектральной структуры нестационарных физиологических сигналов на плоскости комплексных частот / А.Н. Рагозин // Цифровые радиоэлектронные системы (электронный журнал). – 1999–2000. – №3. – С. 34–44.

17. Рагозин, А.Н. Идентификация параметров низкочастотных колебаний VLF и ULF диапазонов и анализ переходных процессов по 5-минутным записям сердечного ритма с использованием спектрального анализа на плоскости комплексных частот / А.Н. Рагозин // Сборник научных трудов симпозиума «Колебательные процессы гемодинамики. Пульсация и флюктуация сердечно-сосудистой системы». – Челябинск, 2002. – С. 300–307.

18. Рагозин, А.Н. Повышение достоверности оценки состояния вегетативной нервной системы по динамике сердечного ритма / А.Н. Рагозин // Сборник научных трудов симпозиума «Колебательные процессы гемодинамики. Пульсация и флюктуация сердечно-сосудистой системы». – Челябинск, 2002. – С. 307–313.

19. Рагозин, А.Н. Анализ на плоскости комплексных частот и классический спектральный анализ в оценке структуры колебаний сердечного ритма / А.Н. Рагозин, Ал.А. Астахов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование, здравоохранение, физическая культура». – 2009. – Вып. 21, № 39. – С. 75–82. DOI: 10.14529/ozfk09.39.16

20. Астахов, Ал.А. Регуляция адаптации гемодинамики к старению / Ал.А. Астахов, А.С. Нагорная, В.В. Наумова // Современные технологии в медицине. – 2011 – Вып. 1. – С. 55–60. – <https://cyberleninka.ru/article/n/regulyatsiya-adaptatsii-gemodinamiki-k-stareniyu>.

21. Рагозин, А.Н. Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма на плоскости комплексных частот / А.Н. Рагозин // Уральский кардиологический журнал. – 2000. – № 2. – С. 16–20.

22. Щелокова, О.И. Безопасность при анестезии, интенсивной терапии и реанимации / О.И. Щелокова // Материалы Областной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Экстремальные ситуации в жизни мегаполиса». Вестник Совета молодых учёных и специалистов Челябинской области. – Челябинск, 2014. – № 3 (сентябрь). – С. 57–66.

23. Астахов, А.А. Адаптационные процессы гемодинамики при различных вариантах анестезии и интенсивной терапии у пациентов отделений реанимации: дис. ... д-ра мед. наук: 14.01.20 – анестезиология и реаниматология / А.А. Астахов. – Екатеринбург, 2012. – 264 с.

## Краткие сообщения

---

**Рагозин Андрей Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ragozinan@susu.ru.

**Тележкин Владимир Федорович**, д-р техн. наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; telezhkinvf@susu.ru.

**Усынин Анатолий Михайлович**, врач высшей категории, проблемная научно-исследовательская лаборатория медленных процессов гемодинамики кафедры анестезиологии и реанимации, Южно-Уральский государственный медицинский университет, г. Челябинск; dgb1@uzag74.ru.

**Дочоев Леонид Яковлевич**, канд. мед. наук, доцент, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Челябинск; docoev@csru.ru.

**Плетенкова Анастасия Дмитриевна**, студент кафедры защиты информации, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; nastya.pletenkova@mail.ru.

**Саидов Бехруз Бадридинович**, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан; matem.1994@mail.ru.

*Поступила в редакцию 11 ноября 2019 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Digital Spectral Analysis on the Plane of Complex Frequencies of Transients of the Heart Rhythm at Schoolchildren at Performing a Proof Test / A.N. Ragozin, V.F. Telezhkin, A.M. Usynin et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 161–170. DOI: 10.14529/ctcr200116

### FOR CITATION

Ragozin A.N., Telezhkin V.F., Usynin A.M., Dotsyoev L.Ya., Pletenkova A.D., Saidov B.B. Digital Spectral Analysis on the Plane of Complex Frequencies of Transients of the Heart Rhythm at Schoolchildren at Performing a Proof Test. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 161–170. DOI: 10.14529/ctcr200116

## О ПОНЯТИИ «ВЫРУЧКА ОКУПАЕМОСТИ» ДЛЯ ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

**О.И. Дранко**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,  
г. Москва, Россия*

**Введение.** Понятие «точки безубыточности» часто применяется для анализа текущего функционирования организаций, но недостаточно для анализа развития организаций с проектным подходом. **Цель исследования.** В работе введены новые понятия «выручки окупаемости» и «выручки окупаемости с учетом дисконтирования», актуальные для проектного управления в развивающихся организациях при планировании сложных технических комплексов. Новые понятия дополняют классическое понятие «срок окупаемости». **Материалы и методы.** Рассматриваются аналитические модели рассматриваемых понятий. Для их исследования могут применяться параметрические расчеты и аналитические решения образных задач. **Результаты.** Разработаны новые понятия, ориентированные на анализ развития организаций. Проведены расчеты показателей для примера одного предприятия, а также параметрические расчеты для отдельных параметров. Показано различие предложенных показателей от классического показателя «точка безубыточности», являющегося характеристикой организации в стабильных условиях функционирования. **Заключение.** Новые рассматриваемые понятия позволят более точно определить параметры развития организаций, ориентированных на проектное управление.

*Ключевые слова:* точка безубыточности, выручка окупаемости, управленческий учет, обратная задача.

### **Введение**

Прогнозно-адаптивный подход к управлению промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности [1] показывает, что в условиях глобализации мирового рынка, усложнения хозяйственных кооперационных связей, нарастания скорости финансовых и социальных преобразований задача управления промышленными предприятиями усложняется.

Классические методы управления, основанные на традиционных школах и моделях управления, становятся малоэффективными. Изменяющиеся условия хозяйствования при возросших темпах изменений недостаточно описываются прежними показателями. В частности, к таким «древним» понятиям относится «точка безубыточности». Автор не нашел даже диапазона дат первого применения точки безубыточности.

Традиционный вариант расчета срока окупаемости предполагает определенность в формировании прогноза денежных потоков проекта. Такой вариант (в том числе сценарный) можно сформировать для продаж массовой продукции.

Основное предположение расчета точки безубыточности как показателя достаточности объема продаж для обеспечения деятельности предприятия основано на том, что предприятие функционирует в более или менее стабильных условиях, развитие организации и инвестиции отсутствуют.

Для условий непрерывного развития с проектным подходом требуется учитывать инвестиции и необходимость окупаемости проектов. В условиях неопределенности и сложности планирования объема продаж по периодам будем предполагать, что может быть определена общая потребность (емкость) рынка в соответствующих изделиях, но распределение по периодам может отличаться. К примерам такой продукции можно отнести оснащение сложным медицинским оборудованием всех регионов страны: количество определено, но срок и цена – нет.

В работе вводятся новые понятия: «выручка окупаемости» и «выручка окупаемости с учетом дисконтирования»<sup>1</sup>.

### **1. Модель точки (выручки) безубыточности**

Понятие точки безубыточности описано в различных источниках [2–5].

<sup>1</sup> По аналогии с дисконтированным сроком окупаемости этот показатель удобнее называть «дисконтированной выручкой окупаемости».

## Краткие сообщения

Точка безубыточности – одна из простых моделей, используемых для оценки экономической деятельности предприятия. Данная модель формулируется при некоторых предположениях:

- внешняя среда стабильна;
- инвестирование развития отсутствует;
- выручка линейно зависит от количества продаваемых товаров;
- действия конкурентов не принимаются во внимание;
- цена остается постоянной;
- структура выпуска продукции не меняется;
- затраты можно разделить на постоянные и переменные;
- производственных мощностей достаточно для выпуска продукции.

*Точкой безубыточности* называют объем продаж, при котором прибыль равна нулю. То есть это порог, при продажах ниже которого будут убытки, а выше – прибыль.

Прибыль определяется разностью выручки и полных затрат. Полные затраты включают переменную часть, которая пропорционально зависит от выручки, и постоянную часть.

Математическую модель прибыли можно записать в следующем виде:

$$Pr = N \cdot p - N \cdot v - F,$$

где  $Pr$  – прибыль;  $S$  – выручка (объем продаж);  $N$  – количество;  $p$  – цена;  $v$  – переменные расходы на 1 единицу;  $F$  – постоянные расходы.

Показатель точки безубыточности в стоимостном выражении определяется формулой из условия, что прибыль равна 0:

$$S^{\text{бу}} = p \cdot N^{\text{бу}} = F / (1 - v/p).$$

### 2. Модель выручки окупаемости

По аналогии с точкой безубыточности введем понятия *выручки окупаемости* [6]. Выручка окупаемости – простая модель, которая позволяет менеджерам принимать управленческие решения о реализации инвестиционных проектов.

Выручкой (точкой) окупаемости назовем объем продаж, при котором срок окупаемости равен нормативному. По сути, это минимальный порог при продажах, ниже которого срок окупаемости будет больше нормативного, а выше – меньше нормативного.

При оценке инвестиционных проектов предполагается, что рассчитывается денежный поток проекта, и далее – показатель эффективности (прямая задача). Но разработки проекта имеют дело с неопределенным будущим (в отличие от текущей деятельности, для которой рассчитывается точка безубыточности). Зачастую маркетинговые исследования не проведены или объем возможных будущих продаж определен с невысокой степенью достоверности. В этом случае может помочь обратная задача: если предполагаемый объем продаж выше (или ниже) некоторого порога, то проект будет окупаться (или не окупаться) в заданные сроки.

Так как точка безубыточности и точка окупаемости – некоторые модели, то есть с неким допущением описывают экономический процесс, для модели точки окупаемости будем считать, что инвестиции в проект осуществляются на начальном этапе реализации инвестиционного проекта, а со следующего периода происходит реализация проекта с выходом на проектную мощность. Такой тип проекта назовем «*стационарным*».

Срок окупаемости определим по соотношению, что за начальный (первый) период происходит инвестирование финансовых средств, а со второго – выход на проектную мощность, то есть время «зарабатывания» средств составляет  $(T - 1)$ -периодов.

Денежный поток стационарного проекта опишем формулой

$$CF_t = \begin{cases} -IC, & \text{в начальный период,} \\ S \cdot (1 - v/p) - F + a \cdot IC, & \text{в последующие периоды,} \end{cases}$$

где  $IC$  – величина инвестиций;  $a$  – норма амортизации начальных инвестиций с учетом «налогового» щита;  $t$  – индекс времени.

Тогда основным требованием для окупаемости проекта будет неравенство

$$(S^{\text{co}} \cdot (1 - v/p) - F + a \cdot IC) \cdot (T - 1) \geq IC.$$

Отсюда определим выручку окупаемости  $S^{\text{co}}$ :

$$S^{co} \geq (F + IC \cdot (1/(T-1) - a)) / (1 - v/p).$$

Разница точки безубыточности и выручки (точки) окупаемости определяется необходимой дополнительной выручкой для окупаемости инвестиций и составляет

$$S^{co} - S^{by} = IC \cdot (1/(T-1) - a) / (1 - v/p).$$

При  $T = 1/a + 1$  точка безубыточности и выручка окупаемости совпадают.

### 3. Модель выручки окупаемости с учетом дисконтирования

По аналогии с дисконтированным сроком окупаемости и для упрощения будем называть «выручку окупаемости с учетом дисконтирования» более коротким термином «дисконтированной точкой окупаемости».

Для стационарного проекта используем формулу аннуитетных доходов в случае равномерного поступления доходов для  $(T-1)$ -периодов:

$$CF = IC \cdot \frac{r}{1 - 1/(1+r)^{T-1}}.$$

После подстановки формулы денежного потока получаем

$$S^{диск} \cdot (1 - v/p) - F + a \cdot IC = IC \cdot \frac{r}{1 - 1/(1+r)^{T-1}},$$

где  $S^{диск}$  – выручка окупаемости с учетом дисконтирования.

После преобразований имеем

$$S^{диск} = \frac{F + IC \cdot \left( \frac{r}{1 - 1/(1+r)^{T-1}} - a \right)}{1 - v/p}.$$

Разница точки окупаемости и точки окупаемости с учетом дисконтирования определяется необходимой дополнительной выручкой для окупаемости инвестиций с учетом дисконтирования и составляет

$$S^{диск} - S^{co} = \frac{IC \cdot \left( \frac{r}{1 - 1/(1+r)^{T-1}} - \frac{1}{T-1} \right)}{1 - v/p}.$$

Так как выручка в случае аннуитетных выплат рассчитывается в постоянных ценах и не учитывает инфляцию, необходимо применять значение ставки дисконтирования без инфляции. Для этого в аддитивной формуле ставки дисконтирования вычитается значение инфляции.

### 4. Пример расчета точки безубыточности и выручки окупаемости

Для определения переменных затрат рассмотрим зависимость полных затрат от выручки некоторого предприятия (рис. 1). По оси X отложена выручка за соответствующий квартал, по оси Y – соответствующая статья затрат. Характеристика среднеквадратичного приближения равна  $R^2 = 0,9018$ , что показывает достаточно хорошее приближение полных затрат от выручки линейной зависимостью.

В примере полные затраты могут быть описаны уравнением

$$\text{Затраты} = 0,713 \cdot \text{Выручка} + 6257.$$

Соответственно,

$$\text{Прибыль} = \text{Выручка} - \text{Затраты} = 0,287 \cdot \text{Выручка} - 6257.$$

Точка безубыточности равна для данного примера

$$S^{by} = 6257 / (1 - 0,713) = 21801.$$

**Точка (выручка) окупаемости** для этого примера при инвестициях  $IC = 20\,000$  тыс. руб., норме амортизации  $a = 10\%$ , нормативном сроке окупаемости  $T = 5$  лет равна

$$S^{co} = \frac{6257 + 20\,000 \cdot \left( \frac{1}{5-1} - 0,1 \right)}{0,287} = 32\,254 \text{ тыс. руб.}$$

## Краткие сообщения

**Точка (выручка) окупаемости с учетом дисконтирования** для примера при инвестициях  $IC = 20\,000$  тыс. руб., норме амортизации  $a = 10\%$ , нормативном сроке окупаемости  $T = 5$  лет, ставке дисконтирования  $r = 20\%$ , равна

$$S_{\text{диск}} = \frac{6257 + 20\,000 \cdot \left( \frac{0,1}{1 - 1/(1+0,2)^{5-1}} - 0,1 \right)}{0,287} = 41\,752 \text{ тыс. руб.}$$

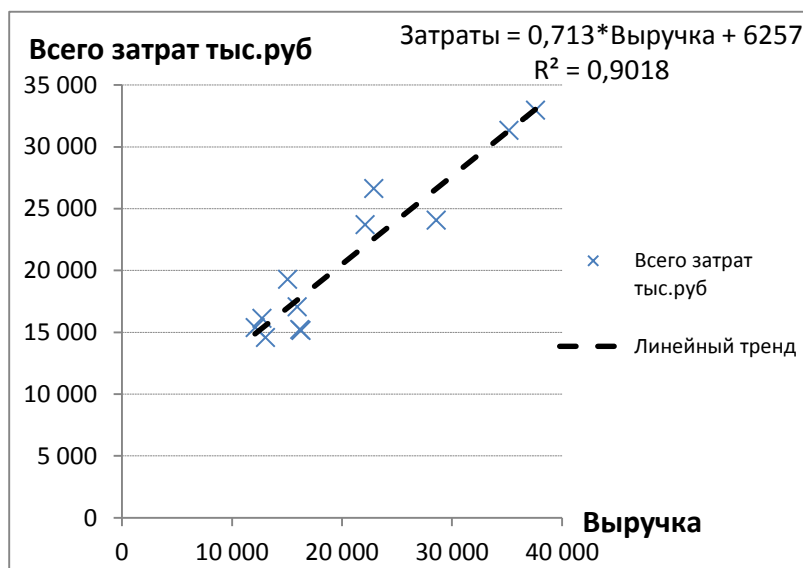


Рис. 1. Зависимость полных затрат от выручки  
Fig. 1. Dependence of total costs on revenue

### 5. Параметрические расчеты

Проведем параметрические расчеты точки окупаемости для иллюстрации поведения выручки окупаемости.

Рассмотрим зависимость выручки окупаемости от доли переменных затрат. Результаты расчетов выручки окупаемости приведены в табл. 1 и на рис. 2 для параметров: постоянные затраты  $F = 6000$  тыс. руб., инвестиции  $IC = 20\,000$  тыс. руб., нормативный срок окупаемости  $T = 5$  лет, норма амортизации  $a = 10\%$ , ставка дисконтирования  $r = 20\%$ .

Зависимость выручки окупаемости от доли переменных затрат

Таблица 1

Return Revenue Dependence on Variable Cost Share

Table 1

Доля переменных затрат, %	Точка безубыточности	Выручка окупаемости	Выручка окупаемости с учетом дисконтирования
50	12 000	18 000	23 452
55	13 333	20 000	26 057
60	15 000	22 500	29 314
65	17 143	25 714	33 502
70	20 000	30 000	39 086
75	24 000	36 000	46 903
80	30 000	45 000	58 629
85	40 000	60 000	78 172
90	60 000	90 000	117 258
95	120 000	180 000	234 516
99	600 000	900 000	1 172 578

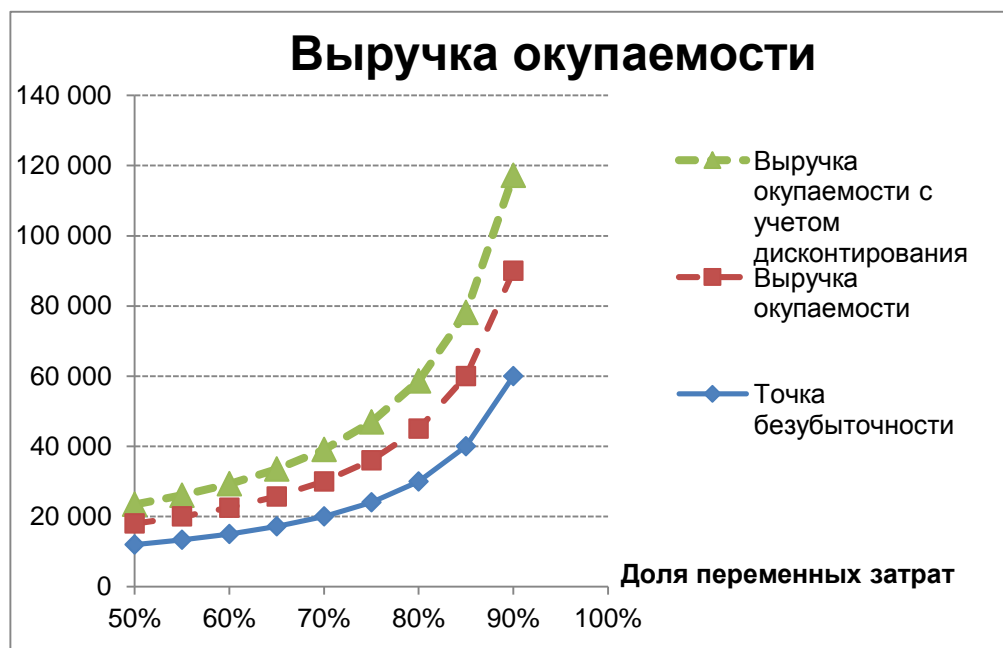


Рис. 2. Зависимость выручки окупаемости от доли переменных затрат  
Fig. 2. The dependence of payback revenue on the share of variable costs

На рис. 2 виден «синхронный» рост выручки окупаемости по сравнению с точкой безубыточности, что определяется фиксированной «инвестиционной нагрузкой» к постоянным затратам и уменьшающейся маржой (разностью цены и переменных затрат).

Результаты расчетов точки окупаемости для доли переменных затрат  $v/p = 70\%$  приведены в табл. 2 и на рис. 3. Видно постепенное приближение выручки окупаемости к точке безубыточности при увеличении нормативного срока окупаемости, и они сравниваются при сроке  $T = 11$  лет. Выручка окупаемости с учетом дисконтирования значительно выше выручки окупаемости и точки безубыточности.

Зависимость точки окупаемости от нормативного срока окупаемости

Таблица 2

Table 2

Point of return dependence on target payback period

Нормативный срок окупаемости	Точка безубыточности	Выручка окупаемости	Выручка окупаемости с учетом дисконтирования
5	20 000	30 000	39 086
6	20 000	26 667	35 625
7	20 000	24 444	33 380
8	20 000	22 857	31 828
9	20 000	21 667	30 707
10	20 000	20 741	29 872
11	20 000	20 000	29 235
12	20 000	19 394	28 740
13	20 000	18 889	28 351
14	20 000	18 462	28 041
15	20 000	18 095	27 793
16	20 000	17 778	27 592

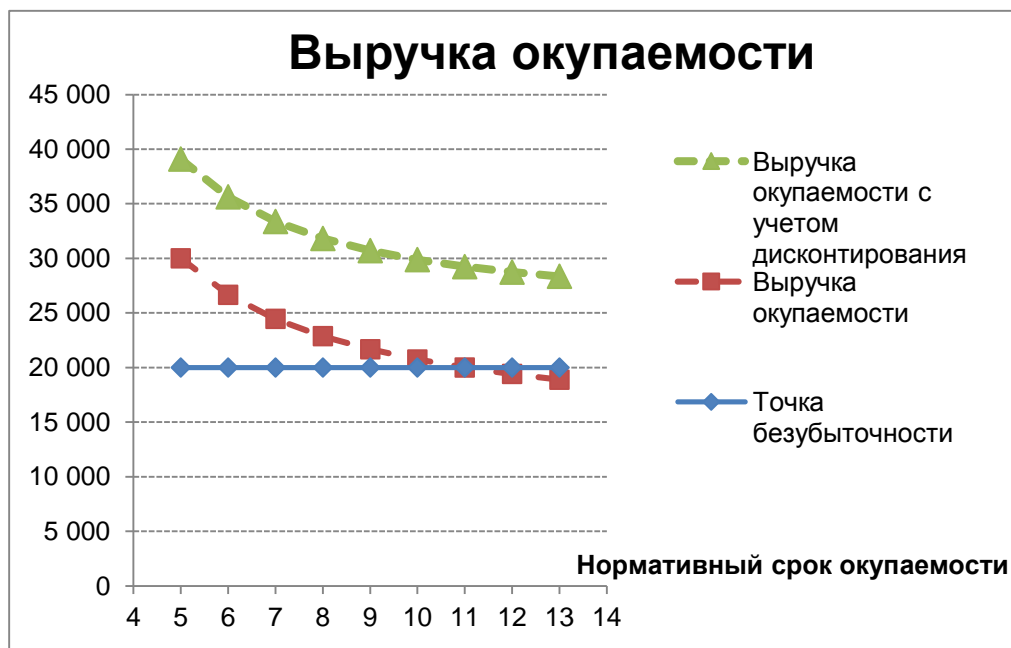


Рис. 3. Зависимость выручки окупаемости от нормативного срока окупаемости  
 Fig. 3. The dependence of the payback revenue on the prescriptive payback period

### Заключение

Быстро изменяющиеся условия экономической деятельности требуют введения новых методов и понятий.

В работе разработаны модели новых понятий «выручки окупаемости» и «выручки окупаемости с учетом дисконтирования». Эти показатели характеризуют предельный объем продаж, необходимый для окупаемости проектов с учетом их разработки и инвестирования, а не только текущего функционирования.

Выведены аналитические формулы для частного случая «стационарных проектов».

Выручку окупаемости целесообразно применять для планирования разработок сложных технических изделий и комплексов с ограниченным объемом рынка.

Параметрические расчеты на данных, типовых для промышленных предприятий, показали, что выручка окупаемости в разы может превышать значение точки безубыточности.

Использование простых понятий и игнорирование фактора инвестиций может привести организацию к неверному решению о его экономических параметрах.

### Литература

1. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, В.Н. Бурков, И.В. Буркова и др.; под ред. О.В. Логиновского. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.
2. Аливанова, С.В. Маржинальный анализ как эффективный метод выбора управленческих решений / А.С. Аливанова, В.В. Куренная // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 80. – С. 497–509.
3. Кабанов, В.Н. Экономические измерения в управлении (на примере использования бухгалтерской модели точки безубыточности) / В.Н. Кабанов // Бизнес. Образование. Право. – 2012. – № 2 (19). – С. 28–38.
4. Чурсин А.А. Закон управления конкурентоспособностью / А.А. Чурсин, Т.В. Кокуйцева // Проблемы современной экономики. – 2011. – № 1 (37). – С. 43–45.
5. Бубновская Т.В. Проблемы оценки безубыточности деятельности или порога рентабельности / Т.В. Бубновская, Н.А. Балаева // Карельский научный журнал. – 2019. – Т. 8, № 1 (26). – С. 63–65.
6. Дранко, О.И. Финансово-экономические вопросы инновационного предприятия: учеб. пособие / О.И. Дранко, Е.Г. Евсеев. – М.: МФТИ, 2018. – 130 с.



Дранко Олег Иванович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, olegdranko@gmail.com.

Поступила в редакцию 21 ноября 2019 г.

DOI: 10.14529/ctcr200117

## ABOUT THE CONCEPT “PAYBACK REVENUE” FOR PROJECT-ORIENTED ORGANIZATIONS

O.I. Dranko, olegdranko@gmail.com

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

**Introduction.** The concept of “break-even point” is often used to analyze the current functioning of organizations, but not enough to analyze the development of organizations with a project approach. **Aim.** The new concepts of “payback revenue” and “payback revenue taking into account discounting”, relevant for project management in developing organizations when planning complex technical complexes are introduced. New concepts complement the classic concept of payback period. **Materials and methods.** Analytical models of the concepts under consideration are proposed. For their study, parametric calculations and analytical solutions of inverse problems can be used. **Results.** New concepts are developed, oriented to the analysis of the development of organizations. Calculations of indicators for an example of one enterprise, as well as parametric calculations for individual parameters, are made. The difference of the proposed indicators from the classical indicator “breakeven point” is shown, which is a characteristic of the organization in stable operating conditions. **Conclusion.** The new concepts under consideration will more accurately determine the development parameters of organizations focused on project management.

*Keywords: break-even point, payback revenue, management accounting, inverse problem.*

### References

1. Loginovskiy O.V., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2018, 410 p.
2. Alivanova S.V., Kurenayaya V.V. [Marginal Analysis as an Effective Method of Choosing Managerial Decisions]. *Political Mathematical Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 80, pp. 497–509. (in Russ.)
3. Kabanov V.N. [Economic Measurements in Management (Using the Accounting Model of the Break-Even Point as an Example)]. *Business. Education. Right*, 2012, no. 2 (19), pp. 28–38. (in Russ.)
4. Chursin A.A., Kokuytseva T.V. [The Law of Competitiveness Management]. *Problems of the Modern Economy*, 2011, no. 1 (37), pp. 43–45. (in Russ.)
5. Bubnovskaya T.V., Balaev N.A. [Problems of Evaluating the Break-Even of the Activity or the Threshold of Profitability]. *Karelian Scientific Journal*, 2019, vol. 8, no. 1 (26), pp. 63–65. (in Russ.)
6. Dranko, O.I., Yevseyev, Ye.G. *Finansovo-ekonomicheskiye voprosy innovatsionnogo predpriyatiya* [Financial and Economic Issues of an Innovative Enterprise]. Moscow, MIPT Publ., 2018, 130 p.

Received 21 November 2019

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дранко, О.И. О понятии «выручка окупаемости» для проектно-ориентированных организаций / О.И. Дранко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 171–177. DOI: 10.14529/ctcr200117

### FOR CITATION

Dranko O.I. About the Concept “Payback Revenue” for Project-Oriented Organizations. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 171–177. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200117

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. **Структура статьи.** Статья содержит УДК, название (не более 12–15 слов), список авторов, аннотацию (200–250 слов), список ключевых слов, введение, основной текст (структурированный по разделам), заключение (обсуждение результатов), литературу (в порядке цитирования, по ГОСТ 7.1–2003). В конце статьи следуют элементы на английском языке: название, аннотация, список ключевых слов, литература (references). Бумажная версия статьи подписывается всеми авторами.

3. **Параметры набора.** Размеры полей: левое – 3 см, правое – 3 см, верхнее и нижнее – по 3 см. Текст статьи набирать шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Выравнивание абзацев – по ширине. Отступ первой строки абзаца – 0,7 см. Междустрочный интервал – полуторный. Включить режим автоматического переноса слов. Все кавычки должны быть угловыми («»). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–»), а не «-»). Ключевые элементы статьи – шапка, заголовки разделов – следует выделять полужирным. Знак деления целой и десятичной части числа – запятая. Между числом и единицей измерения должен стоять неразрывный пробел (Ctrl + Shift + Пробел).

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – дирекция Высшей школы электроники и компьютерных наук, отв. секретарю к.т.н., доц. Плотниковой Н.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: plotnikovanv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

## СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф. Шестаков Александр Леонидович.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки); 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки); 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК  
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия  
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»  
2020. Том 20, № 1

16+

Редактор *С.И. Уварова*  
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.01.2020. Дата выхода в свет 07.02.2020. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 20,92. Тираж 500 экз. Заказ 3/4. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.