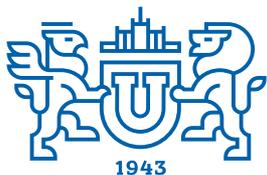


# ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

2021  
Т.21, № 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:

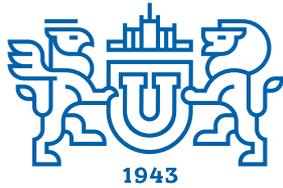
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного 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);  
**Голлай А.В.**, д.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

2021

Vol. 21, 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;  
**Gollai A.V.**, Dr. 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

ШИНКАРЕВ А.А. Об одном подходе к реализации информационной инфраструктуры обновляемого информационного поиска .....	5
КОМАРОВ В.Н., РОЩИН С.М. Моделирование системы мониторинга и анализа информации электронных СМИ методами модельно-ориентированного системного инжиниринга .....	12

## Управление в технических системах

ПОДИВИЛОВА Е.О., ШИРЯЕВ В.И. Гарантированное оценивание состояния динамических систем, возмущений и помех в условиях неполноты информации .....	23
СИМАКОВ Г.М., ТОПОВСКИЙ В.В., ИЛЬЕНКОВ И.А. Алгоритмы векторного управления электромеханического дебалансного вибромодуля без предварительного намагничивания асинхронного двигателя .....	35
VOLKOVA K.M. Conducting a Synthesis of a Digital Automaton for an Automated Firefighting System ....	49

## Инфокоммуникационные технологии и системы

FARIDAI S., JURAEVA R.S., DAROVSKIKH S.N., QODIROV Sh.Sh. Neural Network Model for Predicting Passenger Congestion to Optimize Traffic Management for Urban Public Transport .....	59
TELEZHKIN V.F., SAIDOV B.B., UGAROV P.A., RAGOZIN A.N. Wavelet-Conversion in Electrocardio Signal Processing .....	70

## Управление в социально-экономических системах

ТУГАШОВА Л.Г., ЗАТОНСКИЙ А.В. Разработка интегрального показателя научного развития журналов .....	80
ДРАНКО О.И., ЛОГИНОВСКИЙ О.В., ПРИКАЗЧИКОВ С.А. Модель влияния кризиса на доходы регионального бюджета: анализ Челябинской области .....	90
АНТОНОВ В.В., КОНЕВ К.А., СУВорова В.А., КУЛИКОВ Г.Г. Ситуационно-онтологическая методология принятия решений на примере бизнес-процессов авиаприборостроительного предприятия .....	102
ЛОГИНОВСКИЙ О.В., МАКСИМОВ А.А., ЗОЛОТЫХ С.А., ЛОГИНОВСКАЯ В.О. Развитие организационных и корпоративных систем с использованием современных математических методов и моделей .....	116

## Автоматизированные системы управления технологическими процессами

BARBASOVA T.A. A Multilevel Resource-Saving Blast Furnace Process Control .....	136
ФЕЛЬКЕР М.Н., БАХТЕРЕВА К.Д. Разработка системы автоматического управления флотационным процессом хлористого калия .....	147

## Краткие сообщения

КЛЕСТОВ Р.А., КЛЮЕВ А.В., СТОЛБОВ В.Ю. Алгоритмическая устойчивость нейронных сетей глубокого обучения при распознавании микроструктуры материалов .....	159
--	-----

# CONTENTS

## Informatics and Computer Engineering

- SHINKAREV A.A. On One Approach to Implementation of Information Infrastructure for Renewable Information Search ..... 5
- KOMAROV V.N., ROSHCIN S.M. Modeling of the System of Monitoring and Analysis of Information of Electronic Media by Methods of Model Based System Engineering ..... 12

## Control in Technical Systems

- PODIVILOVA E.O., SHIRYAEV V.I. Dynamic Systems State, Disturbances and Noises Set-Valued Estimation under Conditions of Incomplete Information ..... 23
- SIMAKOV G.M., TOPOVSKIY V.V., ILYENKOV I.A. Vector Control Algorithms for an Electromechanical Unbalance Vibration Module without Preliminary Magnetization of the Asynchronous Motor ..... 35
- VOLKOVA K.M. Conducting a Synthesis of a Digital Automaton for an Automated Firefighting System .... 49

## Infocommunication Technologies and Systems

- FARIDAI S., JURAEVA R.S., DAROVSKIKH S.N., QODIROV Sh.Sh. Neural Network Model for Predicting Passenger Congestion to Optimize Traffic Management for Urban Public Transport ..... 59
- TELEZHKIN V.F., SAIDOV B.B., UGAROV P.A., RAGOZIN A.N. Wavelet-Conversion in Electrocardio Signal Processing ..... 70

## Control in Social and Economic Systems

- TUGASHOVA L.G., ZATONSKIY A.V. Developing an Integral Indicator of Scientific Journals Development ..... 80
- DRANKO O.I., LOGINOVSKIY O.V., PRIKAZCHIKOV S.A. Modeling of Impact of the Crisis on Regional Budget Revenues: Analysis of Chelyabinsk Region ..... 90
- ANTONOV V.V. KONEV K.A. SUVOROVA V.A. KULIKOV G.G. Situation and Ontological Decision-Making Methodology on the Example of Business Processes of an Aircraft Enterprise ..... 102
- LOGINOVSKIY O.V., MAXIMOV A.A., ZOLOTYKH S.A., LOGINOVSKAYA V.O. Development of Organizational and Corporate Systems Using Modern Mathematical Methods and Models ..... 116

## Automated Process Control Systems

- BARBASOVA T.A. A Multilevel Resource-Saving Blast Furnace Process Control ..... 136
- FEL'KER M.N., BAKHTEREVA K.D. Development of an Automatic Control System for the Flotation Process of Potassium Chloride ..... 147

## Brief Reports

- KLESTOV R.A., KLYUEV A.V., STOLBOV V.Yu. Algorithmic Stability of Deep Learning Neural Networks in Recognizing the Microstructure of Materials ..... 159

## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОБНОВЛЯЕМОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА

**А.А. Шинкарев**

ООО «Софтмаст-ИТ», г. Челябинск, Россия

Основные задачи в сфере информационных технологий, стоящие перед бизнесом сегодня, так или иначе касаются обработки информации и поиска новых сведений в ней. Используются статистические методы, модели машинного обучения и более простые методы и модели. Однако всем решениям, направленным на поиск информации, необходима информационная инфраструктура, которая была бы адекватна основным требованиям, предъявляемым к системам такого рода. **Цель исследования:** описание основных функциональных и технических требований, которые предъявляются к современным системам, в задачи которых входит реализация обновляемого информационного поиска; формирование основополагающих архитектурных предложений по дизайну системы в целом и ее ключевых частей в частности; выявление основных составляющих частей информационной системы и подходов к решению ключевых задач для решений, построенных на основе механизма обмена сообщениями. **Материалы и методы.** Рассматривается современная постановка задачи по созданию корпоративных информационных систем обновляемого информационного поиска. Сравниваются наиболее интересные в рамках рассматриваемой постановки задачи брокеры обмена сообщениями. **Результаты.** В статье обосновывается актуальность задачи создания информационных систем обновляемого поиска информации. Делается постановка задачи по созданию систем такого рода. Дается обзор дизайна архитектуры решения на высоком уровне абстракции. Раскрывается модульный состав рассматриваемой информационной системы. Обосновывается и принимается решение использовать в качестве брокера обмена сообщениями инструмент Kafka. Разбираются нюансы технических решений для устранения проблем дублирующихся записей и фильтрации последних результатов поиска информации.

*Ключевые слова:* корпоративные информационные системы, обновляемый информационный поиск, брокер обмена сообщениями, анализ данных, Kafka.

### Введение

Сегодня поиск информации и анализ существующих данных являются важными задачами для такого рода деятельности, как информационные технологии, причем в самом широком смысле. Трудно представить, сколь сложный инструментарий скрыт за строкой информационного поиска. Для реализации программной и аппаратной составляющих систем такого рода необходимо огромное количество человеко-лет. Осложняют эту задачу и такие критически важные требования, как необходимость постоянно эволюционировать, то есть скачкообразно совершенствовать подходы и при этом поддерживать бесперебойное предоставление сервиса конечным пользователям.

Менее жесткие, но все же высокие требования предъявляются и к анализу данных и поиску новой информации в рамках корпоративных информационных систем. Важными задачами, чью инфраструктурную поддержку необходимо обеспечивать, являются поиск новых тенденций, агрегирование уже существующих данных и получение из них новых сведений, а также использование существующих корпоративных сервисов для получения ответов на вопросы, которые появляются у бизнес-пользователей к данным, создаваемым в ходе работы их бизнеса [1]. И настолько же важно сделать эти данные непротиворечивыми и пополняемыми с течением времени, когда появляются новые модели и методы работы с данными или просто хорошая идея о том, как извлечь новую полезную информацию, которую потом можно превратить в выгоду для компании.

Какими бы амбициозными ни были современные высокотехнологичные компании, для того чтобы работать с данными по-новому, необходимы новые современные инструменты, а именно информационная инфраструктура, которая бы могла поддержать реализацию новых идей. Такого рода связующим звеном сегодня все чаще становятся так называемые очереди сообщений, через которые идет обмен командами и событиями между подсистемами информационной системы компании [2]. Однако сам по себе инструмент обмена сообщениями недостаточен для решения задачи создания системы обновляемого информационного поиска. Необходима четкая постановка задачи, подход к ее решению с минимально необходимыми деталями реализации и архитектурный дизайн системы в целом.

### 1. Постановка задачи

Сформируем ключевые функциональные и технические требования к информационной системе обновляемого информационного поиска, которая могла бы в достаточной мере эффективно отвечать на вызовы, стоящие сегодня перед компаниями, извлекающими выгоду из данных за счет их умного анализа и предоставления в понятной для широкого круга людей форме.

Необходимо разработать дизайн системы по поиску информации в ответ на запросы пользователей. Ключевыми особенностями данной системы должны стать следующие функциональные и технические требования.

1. Расчеты должны выполняться асинхронно, то есть пользователи не обязаны ждать получения всех результатов за компьютером.
2. Результаты должны поступать к пользователям системы постепенно, по мере их готовности. Система должна отображать новые результаты, как только они будут сохранены, нет необходимости ждать, пока будет посчитано все.
3. Отображаемые результаты должны быть непротиворечивы. При одинаковых параметрах запросов разные пользователи должны видеть одни и те же результаты.
4. Должна существовать органично встроенная возможность добавлять новые поисковые механизмы, создающие новые результаты как по ранее созданным запросам, так и по новым.
5. Должна быть возможность по требованию пересчитать результаты ранее созданного и обчисленного запроса, например, при обнаружении ошибок в расчетах.
6. Система должна быть готова к обработке таких ситуаций, как множественная доставка одного и того же сообщения потребителю, временная потеря сетевого соединения между частями системы.
7. Части системы не должны зависеть от языка реализации других частей. То есть разные подсистемы могут быть написаны на разных языках программирования.
8. Уровень представления и уровень расчетов должны быть слабо связаны между собой. Уровень представления зависит только от контракта уровня расчетов. Если в системе появляются новые типы данных, интерфейс должен уметь отображать их в простейшем виде, детальная реализация отображения может быть поставлена конечным пользователям позже, отдельно от обновлений логики расчетов.

### 2. Архитектурный дизайн системы

Для реализации предъявляемых функциональных и технических требований предлагается использовать микросервисный подход [3–6]. Это позволит избежать создания монолитной системы и реализовать гибкую инфраструктуру, которая сможет удовлетворить предъявляемым требованиям к расширяемости логики расчетов, возможности использовать разные языки программирования и слабосвязанности уровня представления и уровня расчетов.

В качестве связующего звена между частями системы предлагается использовать брокер обмена сообщениями [7]. Из решений с открытым исходным кодом, которые широко используются сегодня, можно выделить RabbitMQ и Kafka [8–10]. RabbitMQ представляет собой классический брокер обмена сообщениями, который не хранит их в очереди после успешной обработки. В отличие от RabbitMQ брокер Kafka позволяет хранить сообщения и после их обработки, в том числе давая возможность подключать новых потребителей сообщений как учитывая всю предыдущую историю запросов, так и не учитывая, работая только с запросами, отправленными после

регистрации нового потребителя. Это реализуется такими режимами потребления, как самый ранний (earliest) и последний (latest) соответственно [11].

В итоге в качестве брокера обмена сообщениями предлагается использовать Kafka. Это решение должно позволить удовлетворить предъявляемым требованиям к расширяемости логики расчетов, учитывая или не учитывая историю запросов. Также связывание сервисов системы между собой через брокер сообщений позволяет частично учитывать случаи повторной доставки и разрывов соединения при написании программного кода. Обработка ситуации ошибки расчетов, которая должна быть исправлена для всех запросов, также может быть реализована с использованием технических особенностей работы Kafka, в частности с помощью версионирования потребителя в имени группы потребителей.

Само по себе использование брокера обмена сообщениями позволяет производить расчеты асинхронно. В сущности отправитель запроса на обработку и получение результатов не знает, кем будет выполнена процедура и будет ли она выполнена в принципе.

Рассмотрев основные архитектурные решения, такие как применение микросервисной архитектуры и использование брокера обмена сообщениями Kafka, разделим условную систему на следующие составные части.

1. Пользователи – инициаторы первоначальных запросов поиска информации.
2. Web Application – веб-приложение, доступное с помощью веб-браузера, в котором происходит заполнение формы при создании запроса пользователями.
3. Web API – веб-сервер, в который приходят запросы пользователей на поиск информации и который сохраняет их в базу данных запросов и результатов.
4. База данных запросов и результатов – база данных, которая хранит в себе данные пользователей, исходные данные запросов и полученные результаты. Возможно разделение этого хранилища на несколько отдельных баз данных, причем возможно применение как SQL, так и NoSQL решений [12, 13].
5. Брокер обмена сообщениями – связующее звено между частями системы, которое обеспечивает хранение сообщений и реализует механизм их обработки потребителями.
6. Сервисы обчета – части системы, где происходит поиск информации по заданным критериям из изначального запроса и по специализации каждой конкретной группы сервисов. Сервисом расчета теоретически может являться как человек, сидящий за компьютером и реализующий определенный поиск, так и «умный» алгоритм поиска и анализа данных. Время обработки конкретного запроса пользователя может сильно отличаться от одной группы сервисов расчета к другой.
7. Сервис обработки результатов – сохраняет результаты работы сервисов обчета в базу данных запросов и результатов.
8. Сервис мониторинга – обеспечивает наблюдение за состоянием и непротиворечивостью данных системы. Сигнализирует в случае неполноты данных, превышения ожидаемого времени обработки и передачи данных между частями системы, отказа частей системы.

Дизайн системы базируется на концепции потока событий и обмена сообщениями. Сервисы общаются друг с другом через брокера за счет обмена сообщениями через него. То есть контактируют только с шиной сообщений, но никогда друг с другом напрямую. Весь процесс взаимодействия асинхронный, то есть никто не ждет, когда его сообщение будет обработано всеми заинтересованными сторонами.

Очередь первоначальных запросов не должна очищаться и терять историю сообщений. В этом плане она должна быть реализована не как классическая *fire and forget* очередь, когда после обработки сообщение удаляется. Наоборот, очередь должна представлять собой хранимый лог сообщений (*persistent messages log*).

Очередь результирующих сообщений может не хранить их всегда, а иметь период очистки (*retention period*) и удалять сообщения, например, по прошествии недели.

Как только часть результата получена и сохранена в базе данных, ей присваивается уникальный идентификатор и она может быть кэширована (*cached*) до тех пор, пока не будет произведен принудительный перерасчет результатов по набору входных параметров.

Рассмотрев архитектурные особенности системы на высоком уровне, перейдем к детализации технической реализации слоя хранения результатов.

### 3. Обработка результатов и слой хранения данных

Если рассматривать реляционное хранилище для результатов, полученных сервисами обсе-та на поисковые запросы пользователей, то предлагается хранить их в таблице с как минимум следующим набором обязательных атрибутов:

1) `result_hash` – хранит MD5-хэш, полученный по объекту результата обсе-та, что позволяет считать контрольную сумму по результатам, в том числе для быстрого поиска одинаковых ре-зультатов;

2) `result_type` – хранит тип полученного результата;

3) `schema_version` – хранит версию контракта данных результата, что позволяет хранить в одной таблице сериализованный объект результата разных версий;

4) `processor_type` – уникальный в пределах системы человекочитаемый идентификатор типа сервиса обсе-та, может существовать несколько экземпляров сервиса с одним и тем же значени-ем этого атрибута, позволяет строить на его основе имя группы потребителей для брокера обмена сообщениями;

5) `processing_occurrence_number` – хранит в себе порядковый номер повторной обработки ис-ходного запроса, который привел к созданию этого результата;

6) `processing_session_id` – уникальный идентификатор сессии запуска конкретного экземп-ля сервиса обсе-та, который получается за счет объединения текущей временной метки и UUID, что делает этот атрибут упорядочиваемым хронологически, что необходимо для поиска наиболее актуальных результатов и отфильтровывания устаревших;

7) `message_id` – уникальный идентификатор сообщения с результатом обсе-та, которое гене-рируется каждый раз, когда мы пытаемся послать сообщение брокеру, позволяет на его основе строить логику обработки повторной доставки одного и того же результата.

Рассмотрев основные атрибуты таблицы результатов, перейдем к тому, для чего эти атрибу-ты предлагаются, а именно решению проблемы дублирующихся записей одних и тех же резуль-татов.

### 4. Устранение дублирующихся результатов

Предлагается использовать операцию SQL Merge для вставки результатов, гарантируя при этом отсутствие дублей [14].

Для того чтобы предлагаемый механизм работал ожидаемым образом, необходимо опреде-лить ограничения на уникальность комбинаций атрибутов, описанных ранее.

Необходимо создать уникальный индекс на атрибут `message_id`, чтобы предотвратить обра-зование дублирующихся записей при повторной доставке одного и того же сообщения от брокера обмена сообщениями.

Также необходим уникальный индекс по следующим атрибутам: `parameters_id`, `result_type` и `result_hash`. Этот индекс гарантирует, что для одной и той же комбинации входных параметров поиска мы не добавим одинаковые результаты одного и того же типа более чем 1 раз, даже если у них будут разные `message_id`. Например, сервис обсе-та создает 3 результата и успешно отпра-вляем только первые 2 из них, потом аварийно завершается и заново пробует обработать и отпра-вить те же 3 результата, на этот раз успешно. Таким образом, нам необходимо сохранить 2 ре-зультата от первой попытки и только 1 результат от второй.

Операция SQL Merge используется, чтобы реализовать групповое потребление и сохранение результатов (`batch consumption`), при этом сохраняя гарантии транзакций ACID [15]. Это позволяет достигать большей пропускной способности обработки результатов по сравнению с обработкой и сохранением результатов по одному за раз с созданием транзакции на каждый отдельный резуль-тат. Также использование операции SQL Merge позволяет элегантно обрабатывать случай попытки вставить уже существующие данные и делать эту проверку средствами, встроенными в СУБД.

### 5. Фильтрация последних актуальных результатов

Предлагается реализация следующего механизма фильтрации и возврата пользователям только последних результатов обсе-та в случае, когда процесс поиска повторялся несколько раз.

Среди всех результатов целевого `result_type` от всех сервисов обсе-та, для которых опре-делен одинаковый `parameters_id`, необходимо получить максимальное значение атрибута

schema\_version и по нему получить список из processing\_session\_id, в рамках которых были получены результаты данной, максимальной, версии данных этого типа результата для всех затронутых типов сервиса расчета. После этого мы запрашиваем все результаты данного parameters\_id для заданного result\_type и попадающего в полученный на предыдущем шаге список processing\_session\_id.

Этот довольно сложный подход к фильтрации и, более того, имеющий определенные недостатки с точки зрения производительности. Однако он позволяет решать поставленные задачи по отбрасыванию старых результатов при появлении новых.

Одним из недостатков предлагаемого решения можно выделить случай генерации нового результата с новым значением атрибута schema\_version для комбинации параметров поиска. В этом случае мы отбросим все ранее полученные результаты этого типа и вернем только единственный новый результат, что в определенных условиях может быть нежелательным поведением системы.

### Заключение

Развитие информационной инфраструктуры и подходов к решению распространенных задач бизнеса продолжается сегодня довольно высокими темпами. Компании создают свое программное обеспечение или заказывают его у сторонних организаций. И при этом все стараются извлечь максимальную выгоду из накапливаемых данных, занимаются постоянной ретроспективой своих процессов, а также стараются прогнозировать дальнейшее развитие ситуации.

Таким образом, становится актуальной проблема поддержки этих амбициозных задач за счет создания и использования информационных систем и их инфраструктуры, адекватных специфике задачи поиска информации и актуализации результатов. Решая задачи, стоящие перед бизнесом, важно искать компромисс между желанием написать решение «под ключ» с нуля и использованием платных монструозных корпоративных информационных систем.

Связующим звеном разрозненных частей общей информационной системы может стать очередь сообщений. Это один из широко используемых сегодня вариантов борьбы со сложностью и решения проблемы горизонтальной масштабируемости. Однако мало лишь использования классической очереди сообщений для определенного класса задач, таких как обновляемый информационный поиск. Необходима поддержка режима работы брокера без удаления обработанных сообщений из очереди, тем самым реализуя хранимый лог сообщений. Подходящим по требованиям открытым (open source) решением является брокер сообщений Kafka.

Использование Kafka позволяет соблюсти тот самый баланс между написанием своего собственного программного обеспечения для решения всей задачи и использованием полностью готового решения. Мы получаем инструмент, реализующий «из коробки» важные механизмы, такие как хранимый лог сообщений, групповая подписка на новые сообщения, режимы потребления последний и самый ранний, конкурентное потребление. Вкупе с важными для решения задачи обновляемого поиска возможностями Kafka рассчитан на работу с большим количеством часто публикуемых сообщений, что должно быть более чем достаточно для большинства корпоративных информационных систем, включая высоконагруженные сервисы поиска для внешних клиентов. Также, как уже отмечалось, Kafka – это открытое программное обеспечение, что в наши дни является бесспорным плюсом, когда видна тенденция переключения фокуса разработки программного обеспечения в сторону решений с открытым исходным кодом даже при реализации программного обеспечения только для внутреннего использования.

Конечно, важно понимать, что ценен не столько конкретный инструмент, такой как Kafka, а предлагаемый подход к построению систем, реализующих обновляемый информационный поиск. Необходимо учитывать такие нюансы, как идемпотентная обработка, версионирование, непротиворечивость результатов, а также возможность поддержки и развития решения. Лишь аккумулируя опыт из смежных сфер разработки программного обеспечения, удастся создать поистине полезное и технически актуальное решение.

### Литература/References

1. Loginovsky O.V., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. Supercomputing Technologies as Drive for Development of Enterprise Information Systems and Digital Economy. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 55–70. DOI: 10.14529/jsfi200103
2. *Message Bus*. Available at: <https://www.enterpriseintegrationpatterns.com/patterns/messaging/MessageBus.html> (accessed 31.12.2020).
3. Kalske M., Mäkitalo N., Mikkonen T. Challenges When Moving from Monolith to Microservice Architecture. *Garrigós I., Wimmer M. (eds.) Current Trends in Web Engineering. ICWE 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10544*. Springer, Cham., 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-74433-9\_3
4. Namiot D., Sneps-Sneppe M. On micro-services architecture. *International Journal of Open Information Technologies*, 2014, vol. 2, no. 9.
5. Viggiano M., Terra R., Rocha H., Valente M., Figueiredo E. *Microservices in practice: A survey study*, 2018.
6. *Microservices*. Available at: <https://martinfowler.com/articles/microservices.html> (accessed 31.12.2020).
7. *Message broker*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Message\\_broker](https://en.wikipedia.org/wiki/Message_broker) (accessed 31.12.2020).
8. *Messaging that just works – RabbitMQ*. Available at: <https://www.rabbitmq.com> (accessed 31.12.2020).
9. *Apache Kafka*. Available at: <https://kafka.apache.org/> (accessed 31.12.2020).
10. *RabbitMQ vs. Kafka*. Available at: <https://medium.com/better-programming/rabbitmq-vs-kafka-1ef22a041793> (accessed 31.12.2020).
11. *Kafka Consumer*. Available at: <https://docs.confluent.io/platform/current/clients/consumer.html> (accessed 31.12.2020).
12. *SQL and NOSQL: Which is Better*. Available at: <http://www.jetir.org/papers/JETIR1508005.pdf> (accessed 31.12.2020).
13. *The Future is Polyglot Persistence*. Available at: <https://martinfowler.com/articles/nosql-intro-original.pdf> (accessed 31.12.2020).
14. *Merge (SQL)*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Merge\\_\(SQL\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Merge_(SQL)) (accessed 31.12.2020).
15. *ACID*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/ACID> (accessed 31.12.2020).

**Шинкарев Александр Андреевич**, канд. техн. наук, инженер-программист, ООО «Софт-маст-ИТ»; [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru).

*Поступила в редакцию 31 декабря 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210101

## ON ONE APPROACH TO IMPLEMENTATION OF INFORMATION INFRASTRUCTURE FOR RENEWABLE INFORMATION SEARCH

**A.A. Shinkarev**, [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru)

LLC “Softmast-IT”, Chelyabinsk, Russian Federation

Major tasks in the field of information technology that business faces today one way or another relate to data processing and search for new information in it. The methods in use include statistical methods, machine learning models, and simpler methods and models. However, all solutions aimed at information search require an information infrastructure that would meet the basic requirements

for systems of this kind. **The purpose of the study** was to describe the main functional and technical requirements to modern systems implementing renewable information search. The author meant to form fundamental architectural proposals for the design of the system as a whole and its key parts, as well as to identify the main components of the information system and approaches to solving key problems for solutions based on the message exchange mechanism. **Materials and methods.** The paper considers the modern statement of the problem of creating enterprise information systems for renewable information search. The author compares message brokers that are viewed as the most interesting in the framework of this statement. **Results.** The article substantiates the relevance of the problem of creating information systems for renewable information search and formulates the task to create a system of such kind. The author makes an overview of the architecture design of the solution at a high level of abstraction. The modular composition of the information system under consideration is discussed. Kafka is chosen and substantiated as the most suitable message broker. The nuances of technical solutions to eliminate duplicate records and filter the latest information search results are analyzed.

*Keywords: enterprise information systems, renewable information search, message broker, data analysis, Kafka.*

*Received 31 December 2020*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шинкарев, А.А. Об одном подходе к реализации информационной инфраструктуры обновляемого информационного поиска / А.А. Шинкарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 5–11. DOI: 10.14529/ctcr210101

#### FOR CITATION

Shinkarev A.A. On One Approach to Implementation of Information Infrastructure for Renewable Information Search. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 5–11. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210101

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СМИ МЕТОДАМИ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО СИСТЕМНОГО ИНЖИНИРИНГА

**В.Н. Комаров<sup>1</sup>, С.М. Рощин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург», г. Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup> Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

При разработке любой информационной системы крайне важным этапом ее жизненного цикла является этап проектирования или моделирования. Среди существующих подходов к проектированию информационных систем, например, такого как «классическая» разработка UML-диаграмм с помощью унифицированного языка моделирования, все большую популярность получает подход модельно-ориентированного системного инжиниринга, ориентированный на построение моделей. **Цель исследования.** Рассмотреть моделирование системы мониторинга и анализа информации электронных СМИ методами модельно-ориентированного системного инжиниринга. **Методы и инструментарий исследования.** Предложено использование инструментария методологии системно-ориентированного проектирования, сфокусированной на создании и использовании моделей разной степени детализации на различных стадиях проектирования. Представлено применение моделей иерархических декомпозиций сущностей на примере типовых сущностных характеристик искусственных систем: требования к системе, функции системы, компоненты системы (подсистемы), работы по созданию системы. Описан регулярный метод построения и последовательного расширения архитектурных моделей продуктов, на основе которого построены модели иерархической таксономии функциональных требований к системе, ключевых функций, компонент ядра системы. На основе моделей иерархической таксономии построена модель соответствия требований и функций и модель соответствия функций и компонент системы. **Результаты.** Разработанные модели наглядно показывают взаимосвязь компонент системы, требований, функций и модулей друг с другом. Применяемый подход позволяет детализировать представление системы на основе ее декомпозиции на подсистемы и на основе учета сущностных характеристик. Все это дает возможность упорядочить последовательности этапов создания системы и декомпонировать их на отдельные этапы работ. **Заключение.** Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, позволяют перейти к следующему этапу жизненного цикла разрабатываемой информационной системы – ее программной разработке.

*Ключевые слова:* мониторинг информации СМИ, анализ данных, система мониторинга и анализа данных, анализ текста, интеллектуальный анализ данных, модельно-ориентированный системный инжиниринг, модель иерархической таксономии, модель соответствия требований и функций, модель соответствия функций и компонент.

## Введение

Ранее в статьях [1, 2] авторами была рассмотрена проблема информационного влияния современных электронных средств массовой информации на общество, в том числе на предприятия оборонно-промышленного комплекса России. Были представлены структура и обобщенный алгоритм работы автоматизированной системы мониторинга и анализа информации электронных СМИ, разрабатываемой авторами в рамках диссертационного исследования.

В настоящей статье показано моделирование системы мониторинга и анализа информации электронных СМИ методами модельно-ориентированного системного инжиниринга.

Ожидаемым результатом следующего этапа разработки является программная реализация системы.

## 1. Модельно-ориентированный подход разработки систем

Сегодня разработка унифицированных моделей и систем моделей все чаще предшествует проектированию сложных технических изделий, систем высокотехнологичной деятельности, предприятий, информационных систем и цифровых платформ. Для описания и представления систем различной природы (технических, организационно-технических, социально-экономических) все более широко используется модельно-ориентированный подход (Model Based, MB). В частности, этот подход применяется в таких важных сферах, как системный инжиниринг (Model Based System Engineering, MBSE) и менеджмент (Model Based Management, MBM), методологии Систем 2.0 (Model Based Systems 2.0, MBS) [3, 4].

В данном исследовании использовался инструментарий MBSE – методологии системно-ориентированного проектирования, сфокусированной на создании и использовании моделей разной степени детализации на различных стадиях проектирования [5].

В качестве типовых сущностных характеристик искусственных систем в модельно-ориентированном подходе используются такие, как [6]:

- требования к системе;
- функции системы;
- компоненты системы (подсистемы);
- работы по созданию системы.

Соответственно, в качестве типовых опорных примеров применяются такие модели EBS иерархических декомпозиций BS сущностей E [7]:

- требования к системе – модель RBS (Requirements Breakdown Structure);
- функций системы, обеспечивающие требования (функциональные требования) – модель FBS (Function Breakdown Structure);
- компонент системы (подсистемы), которые обеспечивают выполнение требований и функций – модель SBS (System Breakdown Structure);
- работ по созданию системы – модель WBS (Work Breakdown Structure);
- и т. д.

Связи между элементами иерархических моделей EBS устанавливают таблицы отношений моделей [8]. Отношения могут быть установлены между компонентами одной и той же сущности (таблицы отношений вида компоненты иерархий «сами на себя»): RBS-RBS, FBS-FBS, SBS-SBS, WBS-WBS и т. д.

Отношения могут быть установлены между компонентами иерархий разных сущностей: RBS-FBS, FBS-SBS, SBS-WBS.

Такие описания через связанности моделей разных сущностей увязывают их в метамодели.

Тем самым через связанности компонент разных иерархических моделей частные модели собираются и увязываются в «большие» метамодели. При необходимости могут учитываться и связи компонент с внешней средой [9].

В итоге расширенные архитектурные модели, учитывающие сущностные характеристики искусственной системы  $S$ , задаются посредством:

- онтологии, терминов, используемых для описания  $S$ ;
- составом сущностных характеристик  $E1BS, E2BS, \dots$ , используемых для описания  $S$ ;
- иерархическими моделями  $E1BS, E2BS, \dots$  характеристик сущностей  $E1, E2, \dots$ ;
- учитываемыми видами  $k$  связанностей элементов модели EBS;
- моделями (таблицами) отношений по учитываемым видам  $k$  связанностей  $DSM_k$  ( $E1BS, E_mBS$ ) компонент иерархических моделей  $E1BS$  и  $E_mBS$  на учитываемых уровнях их декомпозиций.

Искусственные системы проходят свои жизненные циклы (разработка, применение, модернизация или утилизация). Архитектурные модели и метамодели применяются по всему жизненному циклу искусственных объектов, и роль их все более увеличивается [10].

### 2. Регулярный метод построения и последовательного расширения архитектурных моделей продуктов

Архитектурное моделирование системы предполагает формирование целостного представления рассматриваемого объекта через выделение системы объекта и сферы ее существования – внешней среды посредством [11]:

- задания существенных сущностей и атрибутов системы и ее внешней среды;
- задания иерархии системы;
- иерархической декомпозиции, детализации существенных сущностей и атрибутов;
- идентификации и задания существенных связей сущностей и атрибутов (на разных уровнях иерархии системы);
- задания принципов построения и функционирования системы.

Метод предполагает формирование на основе исходных данных по возможности простой стартовой архитектурной модели. Далее проводится пошаговое итерационное добавление к стартовой модели новых сущностных характеристик с формированием для них унифицированных архитектурных моделей. В итоге выполняются следующие подобные действия по формированию моделей [12].

#### *Система – подсистемы*

В предмет рассмотрения вводится стартовая сущность – система S (в более общем случае система систем SoS) и ее внешняя среда. Собираются и анализируются исходные данные, задаются термины и онтология предметной области, формируются архитектурные модели S:

- SBS – иерархически упорядоченная модель компонент (подсистем) системы S. Модель показывает иерархическую таксономию S;
- DSM (SBS, SBS) – модель связанностей (таблицы учитываемых отношений) компонент системы S.

#### *Требования*

В предмет рассмотрения добавляется сущностная характеристика E1 системы S. Собираются и анализируются исходные данные, задаются онтологии сущности E1, строятся архитектурные модели:

- E1BS модель таксономии сущности E1 – показывает иерархически упорядоченные компоненты E1, например, это может быть иерархическая модель требований, RBS;
- DSM (RBS, RBS) модель связанностей компонент требований RBS, например, для RBS это могут быть характеристики непротиворечивости и/или конфликтности требований.

#### *Функции*

В предмет рассмотрения добавляется сущностная характеристика E2 системы S. Собираются и анализируются исходные данные, задаются онтологии сущности E2, строятся архитектурные модели:

- E2BS модель таксономии сущности E2 – показывает иерархически упорядоченные компоненты E2, например, это может быть иерархическая модель функций, FBS;
- DSM (E2BS, E2BS) модель связанностей компонент E2BS, например, для FBS это могут быть связанности, отражающие логическую последовательность исполнения функций (такие представления называют процессными);
- DSM (E1BS, E2BS) модель связанностей компонент разных сущностных характеристик – E1BS и E2BS, например, для RBS и FBS это связанности, отражающие соответствие требований и функций.

#### *Компоненты*

В предмет рассмотрения добавляется сущностная характеристика E3 системы S. Собираются и анализируются исходные данные, задаются онтологии сущности E3, строятся архитектурные модели:

- E3BS модель таксономии сущности E3 – показывает иерархически упорядоченные компоненты E3, например, это может быть иерархическая модель компонент системы, PBS;
- DSM (E3BS, E3BS) модель связанностей компонент E3BS, например, для PBS это могут быть связанности, отражающие интерфейсы компонент системы;
- DSM (E2BS, E3BS) модель связанностей компонент разных сущностных характеристик – E2BS и E3BS, например, для FBS и PBS это связанности, отражающие соответствие функций и компонент (так называемая функциональная архитектура системы).

### **Работы**

В предмет рассмотрения добавляется сущностная характеристика E4 системы S. Собираются и анализируются исходные данные, задаются онтологии сущности E4, строятся архитектурные модели:

- E4BS модель таксономии сущности E4 – показывает иерархически упорядоченные компоненты E4, например, это может быть иерархическая модель компонент работ по созданию продукта, WBS;
- DSM (E4BS, E4BS) модель связанностей компонент E4BS, например, для WBS это могут быть связанности, отражающие логическую последовательность исполнения функций;
- DSM (E3BS, E4BS) модель связанностей компонент разных сущностных характеристик – E3BS и E4BS, например, для PBS и WBS это связанности, отражающие соответствие компонент продукта и состава работ по его разработке.

### **3. Разработка архитектурной модели системного инжиниринга системы мониторинга и анализа публикаций электронных СМИ**

На рисунке представлены модели иерархической таксономии функциональных требований к системе RBS (*a*), ключевых функций системы FBS (*b*) и компонент ядра системы PBS (*в*). Данные модели наглядно отражают связи компонент информационной системы, требований к ней и ее ключевых функций [13].

К функциональным требованиям системы относятся: удобство эксплуатации (человеко-ориентированный интерфейс системы, быстрый отклик системы на действия пользователя), широкие возможности мониторинга и анализа информации (возможность комплексного применения различных методов и инструментария при мониторинге и анализе информации электронных СМИ), хранение данных (система должна хранить необработанные собранные данные, метаданные, данные после обработки и анализа, а также данные за длительный период времени – исторические данные) [14].

Ключевыми функциями системы являются [15, 16]:

- мониторинг информации электронных СМИ из RSS-каналов, web-сайтов и социальных сетей;
- анализ текстовых данных путем предварительной обработки с последующим применением методов обработки естественного языка, text mining, нейросетевых моделей;
- хранение данных.

Для выполнения обозначенных функциональных требований и функций в системе предусмотрены следующие ключевые компоненты (компоненты ядра системы) [17–19]:

- модуль мониторинга (включает в себя блок парсинга RSS-каналов, web-сайтов и социальных сетей);
- модуль аналитики (включает в себя блоки предварительной обработки, извлечения информации, обработки естественного языка, методов text mining и нейросетевых методов);
- модуль хранения (включает в себя блоки хранения необработанных данных, метаданных, обработанных данных и исторических данных).

В табл. 1 представлена модель DSM (RBS, FBS) соответствия требований к системе и ее функций.

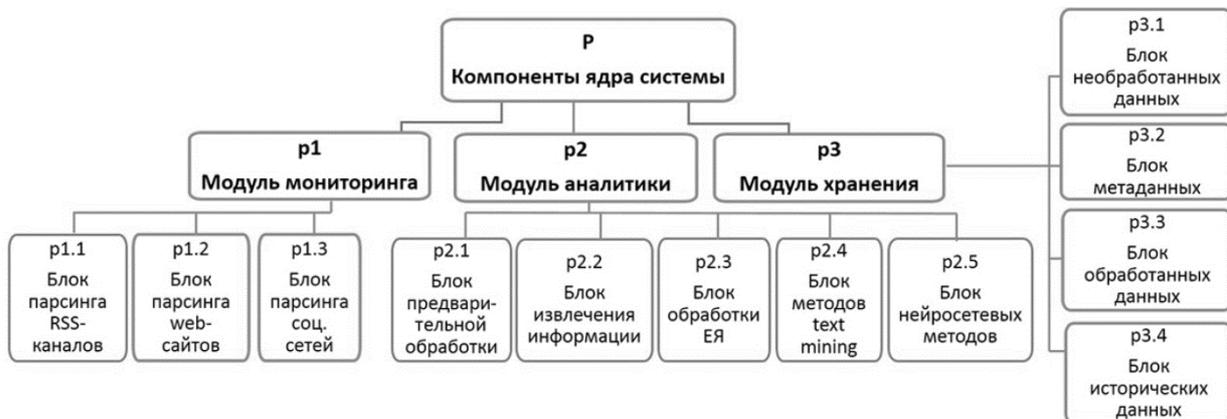
В табл. 2 представлена модель DSM (FBS, PBS) соответствия функций и компонент системы.



a)



b)



c)

Модель иерархической таксономии: а – функциональных требований к системе RBS;  
 b – ключевых функций FBS; c – компонент ядра системы PBS

Hierarchical taxonomy model: a – functional requirements for the RBS system;  
 b – key FBS functions; c – PBS core component

Модель DSM (RBS, FBS) соответствия требований и функций

Таблица 1

Table 1

DSM (RBS, FBS) matching requirements and features

Требования к системе R	Функции системы F											
	f1.1 Парсинг RSS-каналов	f1.2 Парсинг web-сайтов	f1.3 Парсинг соц. сетей	f2.1 Предварит. обработка	f2.2 Извлечение информации	f2.3 Обработка ЕЯ	f2.4 text mining	f2.5 Нейросетевые методы	f3.1 Необработанные данные	f3.2 Метаданные	f3.3 Обработанные данные	f3.4 Исторические данные
r1 Удобство эксплуатации	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
r1.1 Человеко-ориентированный интерфейс	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
r1.2 Быстрый отклик на запросы пользователя	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
r2 Широкие возможности мониторинга и анализа	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*
r2.1 Комплексное применение методов и инструментов мониторинга и анализа	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*
r3 Хранение данных	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
r3.1 Хранение различных данных	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Модель DSM (FBS, PBS) соответствия функций и компонент

Table 2

DSM (FBS, PBS) Feature and Component Matching Model

Функции системы F	Компоненты системы P											
	p1.1 Блок парсинга RSS-каналов	p1.2 Блок парсинга web-сайтов	p1.3 Блок парсинга соц. сетей	p2.1 Блок предварительной обработки	p2.2 Блок извлечения информации	p2.3 Блок обработки ЕЯ	p2.4 Блок методов text mining	p2.5 Блок нейросетевых методов	p3.1 Блок необработанных данных	p3.2 Блок метаданных	p3.3 Блок обработанных данных	p3.4 Блок исторических данных
f1.1 Парсинг RSS-каналов	*											
f1.2 Парсинг web-сайтов		*										
f1.3 Парсинг соц. сетей			*									
f2.1 Предварительная обработка				*	*	*	*					
f2.2 Извлечение информации				*	*	*	*	*				
f2.3 Обработка ЕЯ				*	*	*	*	*				
f2.4 text mining				*	*	*	*	*				
f2.5 Нейросетевые методы				*	*	*	*	*				
f3.1 Необработанные данные	*	*	*	*					*			
f3.2 Метаданные	*	*	*						*	*	*	*
f3.3 Обработанные данные					*	*	*	*			*	
f3.4 Исторические данные					*	*	*	*				*

### Заключение

Рассмотренный подход к моделированию архитектуры систем обеспечивает целый ряд полезных свойств и имеет хороший потенциал прикладных применений. Его возможности:

– охватывает описания архитектур типовых искусственных систем – продуктов, систем деятельности предприятий, сложных композиций тех и других, информационных систем и цифровых платформ;

– позволяет детализировать представление системы на основе ее декомпозиции на подсистемы;

– позволяет детализировать представление системы на основе учета сущностных характеристик;

– позволяет поэтапно расширять представление системы путем:

1) детализации описаний (анализ);

2) добавления к уже созданному представлению новых подсистем и сущностных характеристик (расширение);

3) путем свертки сущностей и их моделей и создания новых верхнеуровневых сущностей и систем в увязке с ранее созданными описаниями (синтез);

– при исполнении на компьютере записям иерархий сущностей и их отношений могут быть поставлены в соответствие применяемые базы данных. Тем самым представления соответствующих моделей являются машиночитаемыми и цифровизируемыми.

Построенные в работе модели наглядно показывают взаимосвязь компонент системы, требований, функций и модулей друг с другом, что позволяет детализировать представление системы на основе ее декомпозиции на подсистемы и на основе учета сущностных характеристик. Это позволяет создать математическую модель системы, упорядочить последовательности этапов ее создания и декомпонировать их на отдельные работы.

### Литература

1. Комаров, В.Н. Мониторинг и системный анализ информации электронных СМИ для промышленных предприятий / В.Н. Комаров, С.М. Роцин // *Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы: сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф.* – Самара: ООО «Агентство международных исследований», 2018. – С. 36–40.

2. Комаров, В.Н. Разработка архитектуры системы мониторинга и анализа публикаций в сети интернет / В.Н. Комаров, С.М. Роцин // *Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сб. науч. ст. по итогам девятой междунар. науч. конф. (31 октября 2019 г.)*. – Казань: ООО «Конверт», 2019. – Ч. 2. – С. 27–29.

3. Кондратьев, В.В. Управление архитектурой предприятия / В.В. Кондратьев. – М.: Инфра-М, 2015. – 358 с.

4. Кожевников, Н.А. Разработка и применение облачных сервисов архитектурного моделирования в системном инжиниринге и менеджменте 2.0 / Н.А. Кожевников, В.В. Кондратьев, Л.А. Хачатуров. // *IV International Conference “Engineering & Telecommunication – En&T 2017”: Book of abstracts. Moscow-Dolgoprudny, November 29–30, 2017*. – Moscow: MIPT, 2017. – P. 162–164.

5. Щейников, С.П. Системно-ориентированный подход к разработке продукции на базе продуктов Siemens PLM Software / С.П. Щейников // *Рациональное управление предприятием*. – 2017. – № 2. – С. 58–60.

6. Развитие методов системного и цифрового моделирования высокотехнологичной деятельности / Е.В. Благодарный, В.В. Кондратьев, Д.А. Пахотин, К.А. Шадрин. – М.: En&T, 2019. – С. 47–54.

7. Романов, А.А. Прикладной системный инжиниринг / А.А. Романов. – М.: Физматлит, 2015. – 555 с.

8. Подход к созданию унифицированного конструктора моделей искусственных систем / В.В. Кондратьев, К.Ф. Лацерус, А.А. Романов, Ю.М. Урличич // *5th International Conference “Engineering & Telecommunication – En&T 2018”: Book of abstracts. Moscow, November 15–16, 2018*. – М.: МФТИ, 2018. – С. 81–86.

9. Кондратьев, В.В. 7 нот менеджмента. Настольная книга руководителя / В.В. Кондратьев. – М.: ЭКСМО, 2008. – 965 с.

10. Кондратьев, В.В. Конструктор регулярного менеджмента: Пакет мультимедийных учебных пособий / В.В. Кондратьев. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 256 с.
11. Новиков, Д.А. Кибернетика / Д.А. Новиков. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2015. – 152 с.
12. Анализ данных и процессов / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, И.И. Холод и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 512 с.
13. Аверченков, В.И. Мониторинг и системный анализ информации в сети Интернет / В.И. Аверченков, С.М. Роцин. – Брянск: БГТУ, 2012. – 160 с.
14. Паклин, Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям / Н.Б. Паклин, В.И. Орешков. – СПб.: Питер, 2013. – 704 с.
15. Дюк, В.А. Применение технологий интеллектуального анализа данных в естественнонаучных, технических и гуманитарных областях / В.А. Дюк, А.В. Флегонтов, И.К. Фомина // Известия российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. – 2011. – № 138. – С. 77–87.
16. Ковалев, С.П. Методы теории категорий в модельно-ориентированной системной инженерии / С.П. Ковалев // Информатика и ее применения. – 2017. – № 3. – С. 42–50.
17. Романов, А.А. Прикладной системный инжиниринг / А.А. Романов. – М.: Физматлит, 2015. – 555 с.
18. Талукдер, Ю.З. Модельно-ориентированное проектирование систем автоматического управления в инженерном образовании / Ю.З. Талукдер // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 174–174.
19. Тельнов, Ю.Ф. Инжиниринг предприятия и управление бизнес-процессами / Ю.Ф. Тельнов, И.Г. Федоров. – М.: Юнити, 2017. – 304 с.

**Комаров Виталий Николаевич**, аспирант, ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург», г. Екатеринбург; komaroffvn@mail.ru.

**Роцин Сергей Михайлович**, канд. техн. наук, доцент, Брянский государственный технический университет, г. Брянск; roschinsm@ya.ru.

*Поступила в редакцию 15 ноября 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210102

## MODELING OF THE SYSTEM OF MONITORING AND ANALYSIS OF INFORMATION OF ELECTRONIC MEDIA BY METHODS OF MODEL BASED SYSTEM ENGINEERING

**V.N. Komarov**<sup>1</sup>, komaroffvn@mail.ru,

**S.M. Roshchin**<sup>2</sup>, roschinsm@ya.ru

<sup>1</sup> PJSC “Kalinin Machinery Plant, Ekaterinburg”, Ekaterinburg, Russian Federation,

<sup>2</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

When developing any information system, an extremely important stage of its life cycle is the design or modeling stage. Among the existing approaches to the design of information systems, such as, for example, the “classic” development of UML diagrams using a unified modeling language, the model-oriented systems engineering approach, focused on building models, is gaining popularity. **Purpose of the study.** Consider modeling a system for monitoring and analyzing electronic media information using the methods of model-oriented system engineering. Research methods and tools. It is proposed to use the toolkit of the system-oriented design methodology, focused on the creation and use of models of different degrees of detail at different stages of design. The ap-

plication of models of hierarchical decomposition of entities is presented on the example of typical essential characteristics of artificial systems: requirements for the system, system functions, system components (subsystems), work on creating a system. A regular method for constructing and consistently expanding architectural models of products is described, on the basis of which models of hierarchical taxonomy of functional requirements for the system, key functions, and components of the system core are built. Based on hierarchical taxonomy models, a model for matching requirements and functions and a model for matching functions and system components are built. **Results.** The developed models clearly show the relationship of system components, requirements, functions and modules with each other. The approach used makes it possible to detail the presentation of the system based on its decomposition into subsystems and on the basis of taking into account the essential characteristics. All this makes it possible to streamline the sequence of stages of creating a system and decompose them into separate stages of work. **Conclusion.** The results obtained in the course of the conducted research make it possible to proceed to the next stage of the life cycle of the information system being developed – its software development.

*Keywords:* media information monitoring, data analysis, a data monitoring and analysis system, text analysis, data mining, model based system engineering, a hierarchical taxonomy model, a model for matching requirements and functions, a model for matching functions and components.

### References

1. Komarov V.N., Roshchin S.M. [Monitoring and system analysis of electronic media information for industrial enterprises]. *Naukoemkie tekhnologii i intellektual'nye sistemy* [Science-intensive technologies and intelligent systems]. Samara, LLC “Agency for International Studies”, 2018, pp. 36–40. (in Russ.)
2. Komarov V.N., Roshchin S.M. [Development of the architecture of the system for monitoring and analyzing publications on the Internet]. *Peredovye innovacionnye razrabotki. Perspektivy i opyt ispol'zovaniya, problemy vnedreniya v proizvodstvo* [Advanced innovative developments. Prospects and experience of use, problems of implementation in production]. Kazan, LLC “Convert”, 2019, pp. 27–29. (in Russ.)
3. Kondratyev V.V. *Upravlenie arhitekturoj predpriyatiya* [Enterprise architecture management]. Moscow, Infra-M Publ., 2015. 358 p.
4. Kozhevnikov N.A., Kondratyev V.V., Hachaturov L.A. [Development and application of cloud services of architectural modeling in systems engineering and management 2.0]. *IV International Conference “Engineering & Telecommunication – En&T 2017”: Book of abstracts. Moscow-Dolgoprudnu, November 29–30, 2017.* Moscow, MIPT, 2017, pp. 162–164. (in Russ.)
5. Shcheinikov S.P. [Systems-oriented approach to product development based on Siemens PLM Software products]. *Rational enterprise management*, 2017, no. 2, pp. 58–60. (in Russ.)
6. Blagodarnyj E.V., Kondratyev V.V., Pahotin D.A., Shadrin K.A. [Development of methods for system and digital modeling of high-tech activities]. Moscow, En&T, 2019, pp. 47–54. (in Russ.)
7. Romanov A.A. *Prikladnoy sistemnyy inzhiniring* [Applied Systems Engineering]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015. 555 p.
8. Kozhevnikov N.A., Kondratyev V.V., Lacerus K.F., Romanov A.A., Urlichich U.M. [An approach to creating a unified constructor of artificial systems models]. *5th International Conference “Engineering & Telecommunication – En&T 2018”: Book of abstracts. Moscow, November 15–16, 2018.* Moscow, MIPT, 2018, pp. 81–86. (in Russ.)
9. Kondratyev V.V. *7 not menedzhmenta. Nastol'naya kniga rukovoditelya* [7 notes of management. Executive's Handbook]. Moscow, EKSMO Publ., 2008. 965 p.
10. Kondrat'yev V.V. *Konstruktor regul'yarnogo menedzhmenta: Paket mul'timediynykh uchebnykh posobiy* [Regular Management Constructor: Multimedia Tutorials Package]. Moscow, INFRA-M Publ., 2011. 256 p.
11. Novikov D.A. *Kibernetika* [Cybernetics]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2015. 152 p.
12. Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Holod I.I., Tess M.D., Elizarov S.I. *Analiz dannykh i protsessov* [Data and process analysis]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2009. 512 p.
13. Averchenkov V.I., Roshchin S.M. *Monitoring i sistemnyy analiz informatsii v seti Internet* [Monitoring and system analysis of information on the Internet]. Bryansk, BSTU Publ., 2012. 160 p.

14. Paklin N.B., Oreshkov V.I. *Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam* [Business Intelligence: From Data to Knowledge]. St. Petersburg, Piter Publ., 2013. 704 p.
15. Dyuk V.A., Flegontov A.V., Fomina I.K. [Application of data mining technologies in natural science, technical and humanitarian fields]. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*, 2011, no. 138, pp. 77–87. (in Russ.)
16. Kovaleev S.P. [Methods of Category Theory in Model-Based Systems Engineering]. *Informatika i ee primeneniya* [Informatics and its applications], 2017, no. 3, pp. 42–50. (in Russ.)
17. Romanov A.A. *Prikladnoy sistemnyy inzhiniring* [Applied Systems Engineering]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015. 555 p.
18. Talukder U.Z. [Model-Based Design of Automatic Control Systems in Engineering Education]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical science], 2014, no. 2, pp. 174–174. (in Russ.)
19. Tel'nov Yu.F., Fedorov I.G. *Inzhiniring predpriyatiya i upravlenie biznes-processami* [Enterprise Engineering and Business Process Management]. Moscow, Uniti Publ., 2017. 304 p.

*Received 15 November 2020*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Комаров, В.Н. Моделирование системы мониторинга и анализа информации электронных СМИ методами модельно-ориентированного системного инжиниринга / В.Н. Комаров, С.М. Рошин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 12–22. DOI: 10.14529/ctcr210102

### FOR CITATION

Komarov V.N., Roshchin S.M. Modeling of the System of Monitoring and Analysis of Information of Electronic Media by Methods of Model Based System Engineering. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 12–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210102

---

## ГАРАНТИРОВАННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ВОЗМУЩЕНИЙ И ПОМЕХ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ

Е.О. Подвилова, В.И. Ширяев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассматривается задача гарантированного оценивания состояния динамических систем в условиях неопределенности, когда известны только множества возможных значений возмущений и помех, а статистическая информация о них отсутствует или не может быть получена. Описан алгоритм полиэдральной аппроксимации информационных множеств, когда множества возможных значений возмущений и помех являются многогранниками. Алгоритм основан на неявном описании информационного множества системами линейных уравнений и неравенств и решении ряда задач линейного программирования. Рассмотрены методы повышения точности оценивания с помощью учета дополнительной информации о характере возмущений и помех. Описано гарантированное оценивание вектора состояния динамической системы, когда возмущения заданы в виде системы функций с неизвестными коэффициентами. В этом случае за счёт использования информации о том, что коэффициенты разложения являются постоянными, оценка вектора состояния получается точнее, чем в случае, когда возмущение известно с точностью до множества возможных значений. Приведен численный пример, демонстрирующий работу алгоритма. **Целью исследования** является разработка методов гарантированного оценивания состояния, возмущений и помех. **Методы исследования.** В работе использовались методы теории оптимизации, фильтрации, линейной алгебры, пакет прикладных программ MATLAB. **Результаты.** Описан метод гарантированного оценивания вектора состояния динамической системы с учётом дополнительной информации о характере возмущений. Описан метод полиэдральной аппроксимации информационных множеств, позволяющий получать гарантированную оценку вектора состояния, вектора возмущений и помех, а также множества прогнозов, что может быть использовано при разработке адаптивных алгоритмов оценивания и управления. Разработан алгоритм гарантированного оценивания вектора состояния системы и коэффициентов в разложении возмущения по системе заданных функций. **Заключение.** Приведен алгоритм полиэдральной аппроксимации информационных множеств, численный пример и анализ полученных оценок.

*Ключевые слова:* гарантированное оценивание, полиэдральная аппроксимация, информационное множество, эволюция множеств достижимости, оценка возмущений и помех.

### Введение

Задача оценивания состояния, возмущений и помех возникает в системах управления летательными аппаратами, в навигационных системах, в автоматизированных системах управления технологическими процессами, в задаче динамических измерений и др. [1–9].

Движение динамической системы описывается линейным разностным уравнением

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + \Gamma w_k + Bu_k, \\ y_{k+1} = Gx_{k+1} + Hv_{k+1}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_k, w_k, y_k, v_k, u_k$  – векторы состояния системы, возмущения, измерения, ошибок измерений на  $k$ -м шаге соответственно;  $A, \Gamma, B, G, H$  – известные матрицы.

В каждый момент времени производится измерение вектора состояния  $y_k$ , по результатам которого осуществляется оценивание вектора состояния  $x_k$ , а затем вычисляется величина терминального управления  $u_k$  по результатам оценивания и в соответствии с заданным критерием.

При этом функционирование динамических систем производится в условиях неполноты информации, связанной с отсутствием информации о внешних возмущениях и помехах измерений, неточностью модели, неполными измерениями.

Выбор алгоритма оценивания зависит от характера возмущений  $w_k$  и помех  $v_k$  в системе. Для описания реальных процессов часто применяют стохастические модели, когда начальное состояние системы  $x_0$ , возмущения  $w_k$  и ошибки измерений  $v_k$  являются нормально распределёнными взаимно некоррелированными случайными величинами. Тогда широкое применение находит фильтр Калмана [10–13]. Однако для многих измерительных систем невозможно провести большое число испытаний, поэтому статистическая информация может отсутствовать или быть недостоверной, поэтому применение фильтра Калмана может быть не обосновано.

На практике большое значение имеют задачи оценивания и управления для динамических систем, функционирующих в статистически неопределённой среде [5, 14, 15]. Например, при управлении самолётом при посадке требуется, чтобы при любых допустимых возмущениях самолет не выкатился за кромку полосы, то есть самолёт не должен отклоняться от оси взлётно-посадочной полосы более чем на заданную величину [3]. Кроме того, задача гарантированного оценивания возникает при принятии решения о допуске к эксплуатации беспилотных инерциальных навигационных систем при скачках погрешностей датчиков угловой скорости или акселерометров на величину, превышающую допустимые вариации уровня шума. Гарантированное оценивание также требуется в задаче синтеза управления беспилотным летательным аппаратом при сближении с маневрирующей целью, когда необходимо, чтобы летательный аппарат попал в некоторую заданную область относительно маневрирующей цели.

Тогда предполагают, что возмущения и помехи являются неизвестными, но могут принимать произвольные значения из некоторых заданных выпуклых множеств:

$$x_0 \in X_0, \quad w_k \in W, \quad v_k \in V, \quad k = 0, 1, \dots, N. \quad (2)$$

В этом случае требуется получить оценку в виде информационного множества  $\bar{X}_k$ , в котором гарантированно находится вектор состояния  $x_k \in \bar{X}_k$  в каждый момент времени на основе модели объекта и измерений, т. е. построить множество возможных траекторий объекта [14, 16, 17]. Чем меньше получается информационное множество, тем точнее получается оценка. Построение информационных множеств выполняется следующим образом. Сначала вычисляется множество прогнозов вектора состояния  $x_k$  системы по результатам оценки на предыдущем шаге:

$$X_{k+1/k} = A\bar{X}_k + \Gamma W + Bu_k, \quad k = 0, 1, \dots, N. \quad (3)$$

По результатам измерения  $y_{k+1}$  рассчитывается множество состояний, совместимых с измерением

$$X[y_{k+1}] = \{x \in R^n \mid Gx + Hv = y_{k+1}, v \in V\}, \quad (4)$$

и затем в результате пересечения множества прогнозов и множества, совместимого с измерением, получаем информационное множество

$$\bar{X}_{k+1} = X_{k+1/k} \cap X[y_{k+1}], \quad k = 0, 1, \dots, N. \quad (5)$$

Такой подход включает в себя выполнение операций суммы множеств в смысле Минковского, линейного преобразования и пересечения множеств. Однако построение информационных множеств является вычислительно сложной задачей для систем больших размерностей.

Разработанные алгоритмы гарантированного оценивания различаются в зависимости от способа описания множеств и алгоритмов выполнения операций над множествами. В работе Ф.К. Швеппе предлагается строить информационное множество в виде многомерного эллипсоида [18]. Также задача эллипсоидального оценивания была развита в работах Ф.Л. Черноушко, А.Б. Куржанского, Г.М. Бакана, Н.Н. Сальникова и др. [19–22]. В данных работах описана аппроксимация информационных множеств сверху эллипсоидами, однако в связи с этим происходит снижение точности.

В работах В.М. Кунцевича, М.М. Лычака, А.Ф. Шорикова предлагается использовать двойное описание многогранников набором вершин и уравнениями граней, что позволяет повысить точность оценивания, но требует преобразования в каждый момент времени множества вершин во множество граней и наоборот [9, 15].

В настоящее время активно развивается подход к описанию информационных множеств многогранниками заданной формы: в работах Е.К. Костоусовой, А. Vicino, G. Zappa предлагается описывать множества параллелотопами [23], в работах Т. Alamo, Е.Ф. Самачо – зонотопами [24]. Данный подход аналогично эллипсоидальному оцениванию основан на аппроксимации результатов операций суммы и пересечения множеств параллелотопами или зонотопами, поэтому в гарантированных оценках присутствуют потери за счет аппроксимации.

В работах А.В. Лотова, И.Г. Поспелова [25] рассмотрены численные алгоритмы построения множеств достижимости линейных динамических объектов, когда на начальное состояние и возмущение наложены ограничения в виде многогранников, описанных системами линейных неравенств. Построение множества достижимости сводится к нахождению фундаментальных решений системы неравенств или ортогональной проекции на основе метода исключения неизвестных. Данный метод требует больших вычислительных затрат, что не позволяет применять его в реальном времени. Тем не менее, использование линейных неравенств и множеств начинает находить большее распространение в задачах управления динамическими системами [13, 26].

Таким образом, проведенный обзор методов гарантированного оценивания показал, что применение известных аппроксимаций информационных множеств эллипсоидами, параллелотопами, зонотопами может приводить к потере точности оценок. Поэтому актуальной является задача гарантированного оценивания на основе аппроксимации информационных множеств выпуклыми многогранниками, что позволит повысить точность оценивания.

Иные подходы к решению задачи оценивания приведены в [13, 27, 28]. Работа продолжает исследования [29–35].

### 1. Постановка задачи

Для динамической системы, движение которой описано линейными разностными уравнениями:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + \Gamma w_k + Bu_k, \\ y_{k+1} = Gx_{k+1} + Hv_{k+1}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \end{cases} \quad (6)$$

ограничения на начальное состояние, возмущения и помехи заданы многогранниками, описанными системами линейных неравенств:

$$\begin{aligned} x_0 &\in X_0 : A_{x_0} x_0 \leq b_{x_0}, \\ w_k &\in W : A_w w_k \leq b_w, \\ v_k &\in V : A_v v_k \leq b_v, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (6) является наблюдаемой и управляемой. Требуется построить гарантированную оценку вектора состояния  $x_k$  в виде многогранника, то есть построить многогранник  $X_k$ , аппроксимирующий информационное множество  $\bar{X}_k$ :

$$\bar{X}_k \subseteq X_k = \left\{ x \mid A_{x_k} x \leq b_{x_k} \right\}. \quad (8)$$

### 2. Метод полиэдральной аппроксимации информационного множества

Пусть в  $k$ -й момент времени имеется  $L$  измерений,  $L = 1, \dots, k$ , то есть известны измерения  $y_{k-L}, \dots, y_k$ , а векторы  $x_{k-L}, \dots, x_k$ ,  $w_{k-L}, \dots, w_k$ ,  $v_{k-L}, \dots, v_k$  являются неизвестными. Управления  $u_{k-L}, \dots, u_k$  являются известными. Получим систему линейных уравнений, описывающую модель системы на окне измерений  $L$ :

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + \Gamma w_{k-1} + Bu_{k-1}, \\ y_k = Gx_k + Hv_k, \\ \dots \\ x_{k-L} = Ax_{k-L-1} + \Gamma w_{k-L-1} + Bu_{k-L-1}, \\ y_{k-L} = Gx_{k-L} + Hv_{k-L}. \end{cases} \quad (9)$$

Запишем ограничения на возмущения и помехи на последних  $L$  шагах в виде системы линейных неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{x_{k-L}} x_{k-L} \leq b_{x_{k-L}}, \\ A_w w_{k-1} \leq b_w, \\ \dots \\ A_w w_{k-L} \leq b_w, \\ A_v v_k \leq b_v, \\ \dots \\ A_v v_{k-L+1} \leq b_v. \end{array} \right. \quad (10)$$

Системы (9) и (10) описывают состояние динамической системы на некотором интервале наблюдения  $[k-L; k]$  и являются неявным заданием информационного множества  $\bar{X}_k$  для вектора  $x_k$ , а также соответствующих апостериорных множеств возмущений  $W_{k-1}$  и помех  $V_k$ . Чтобы получить, например, оценку вектора состояния  $x_k$ , нужно решить системы (9), (10) относительно данной переменной. Поскольку методы свёртки являются вычислительно сложными, будем строить аппроксимацию информационного множества. Будем строить явное представление аппроксимирующего многогранника  $X_k$  в виде системы линейных неравенств относительно переменной  $x_k$ , т. е.  $\bar{X}_k \subseteq X_k = \{x \mid A_{x_k} x \leq b_{x_k}\}$ . Требуется задать набор векторов нормалей  $a_i$  к граням аппроксимирующего многогранника  $X_k$ , где  $a_i$  –  $i$ -я строка матрицы  $A_{x_k}$ . Для вычисления значений члена  $b_{x_k}$  требуется решить ряд задач линейного программирования

$$x_k^* = \arg \max_{x_k} \langle a_i, x_k \rangle \text{ при ограничениях (9) и (10),} \quad (11)$$

где  $\langle a_i, x_k \rangle$  – скалярное произведение векторов, тогда  $i$ -я координата вектора  $b_{x_k}$  равна

$$b_{x_k}(i) = \langle a_i, x_k^* \rangle. \quad (12)$$

При использовании данного подхода не требуется выполнение операций над множествами, а форму многогранника можно задать любую. Выбирать направления аппроксимации следует в соответствии с требованиями задачи. Например, для важного на практике случая, когда требуется вычислить диапазон возможных значений по каждой из координат вектора  $x_k$ , аппроксимирующее множество представляет собой параллелепипед и матрица векторов-нормалей  $A_{x_k} = [I \quad -I]^T$ . Чем ближе к истинному информационному множеству задана форма аппроксимирующего многогранника, тем более точной будет получена аппроксимация и меньше будет накапливаться ошибка оценивания.

Важной особенностью описанного подхода является возможность получать не только гарантированные оценки вектора состояния, но и множества прогнозов вектора состояния, гарантированные оценки реализовавшихся возмущений и помех, действующих на систему, что может быть в дальнейшем использовано для разработки адаптивных алгоритмов оценивания и управления, а также прогнозирования состояния объекта. Кроме того, гарантированные оценки могут быть использованы для синтеза управления, когда требуется управлять трубкой траекторий.

Выбор ширины окна  $L$  также влияет на точность оценки. Но при увеличении  $L$  увеличивается размер систем линейных уравнений (9) и неравенств (10), а значит, и время вычисления оценки. Определить приемлемую для имеющихся вычислительных ресурсов ширину окна  $L$  можно на этапе проектирования системы управления исходя из требований по точности оценивания и априорно заданных множеств (7)  $X_0, W, V$ .

### 3. Учет особенности моделей процесса в задаче гарантированного оценивания

В описанном подходе оценка вектора состояния строится для всех возможных значений возмущений и помех из заданных выпуклых множеств. Для повышения точности и скорости оцени-

вания необходимо учитывать особенности модели возмущений и помех, которые могут быть известны в конкретных практических задачах [8, 27, 32]. Например, могут быть заданы по координатным ограничениям на скорость изменения возмущений и помех [27]:

$$\begin{aligned} |w_{k+1}(i) - w_k(i)| &\leq \delta_w(i), \quad i = 1, \dots, n_w, \\ |v_{k+1}(j) - v_k(j)| &\leq \delta_v(j), \quad j = 1, \dots, n_v, \end{aligned} \tag{13}$$

где  $\delta_w, \delta_v$  – заданные величины;  $w_k(i), v_k(j)$  –  $i$ -я,  $j$ -я координаты векторов  $w_k, v_k$ .

В некоторых случаях для осредненных значений возмущений и помех по координатам выполняются условия:

$$\left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w_k(i) \right| \leq \varepsilon_w(i), \quad i = 1, \dots, n_w, \quad \left| \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_k(j) \right| \leq \varepsilon_v(j), \quad j = 1, \dots, n_v, \tag{14}$$

где  $\varepsilon_w, \varepsilon_v$  – заданные величины.

Кроме того, возмущения и помехи могут быть представлены в виде линейной комбинации заданных функций с неизвестными параметрами. Например, плотность воздуха, температуру воздуха, составляющие скорости ветра представляют в виде определённой линейной комбинации некоррелированных случайных величин [см., например, 8]:

$$w_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i \varphi_{ik}, \quad v_k = \sum_{i=1}^l \beta_i \psi_{ik}, \tag{15}$$

где  $\alpha_i, \beta_i$  – неизвестные постоянные коэффициенты, которые необходимо вычислять в реальном времени по результатам измерений  $y_k, k = 1, 2, \dots$ .

Условия (13)–(15) являются линейными и могут быть включены в системы (9), (10) для получения более точной оценки вектора состояния.

#### 4. Пример

Пусть в системе (1) матрицы имеют следующие значения:

$$A = \begin{bmatrix} 0,9976 & 0,0464 \\ -0,0928 & 0,8584 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0,1189 \\ 4,639 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}, \quad G = I_{2 \times 2}, \quad H = I_{2 \times 2}.$$

Множества возможных значений начального состояния, возмущений и помех являются многоугольниками (рис. 1):

$$x_0 \in X_0 : \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} x_0 \leq \begin{pmatrix} 0,00075 \\ 0,03 \\ 0,00075 \\ 0,03 \end{pmatrix}, \quad w_k \in W : \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} w_k \leq \begin{pmatrix} 1,5 \\ 1,5 \end{pmatrix}, \quad v_k \in V : \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} v_k \leq \begin{pmatrix} 0,000145 \\ 0,0228 \\ 0,000145 \\ 0,0228 \end{pmatrix}.$$

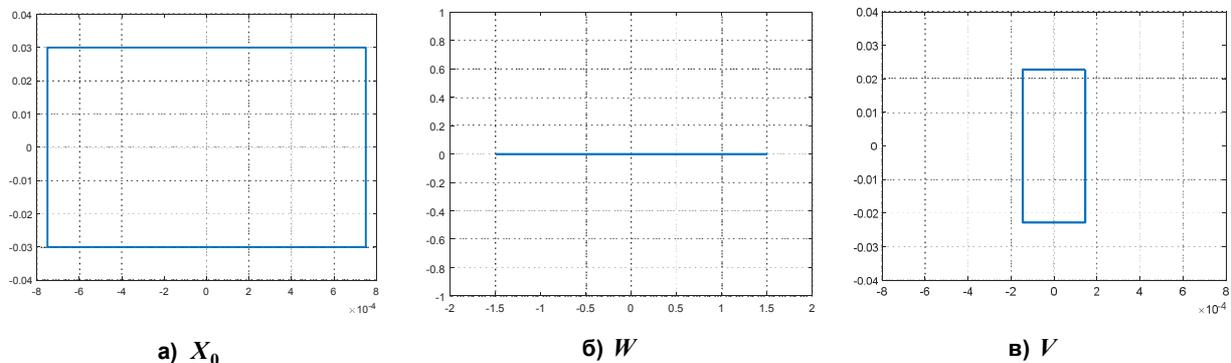


Рис. 1. Множества ограничений  $X_0, W, V$

Fig. 1. Restriction sets  $X_0, W, V$

## Управление в технических системах

Пусть для реализации процесса кроме информации о множестве возможных значений возмущений  $w_k \in W$  известен вид разложения возмущения по системе функций (рис. 2):

$$w_k = \alpha_1 \sin\left(\frac{\pi k}{6}\right) + \alpha_2 \cos\left(\frac{\pi k}{6}\right), \quad (16)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – неизвестные постоянные коэффициенты. В данном примере коэффициенты были приняты равными 1.

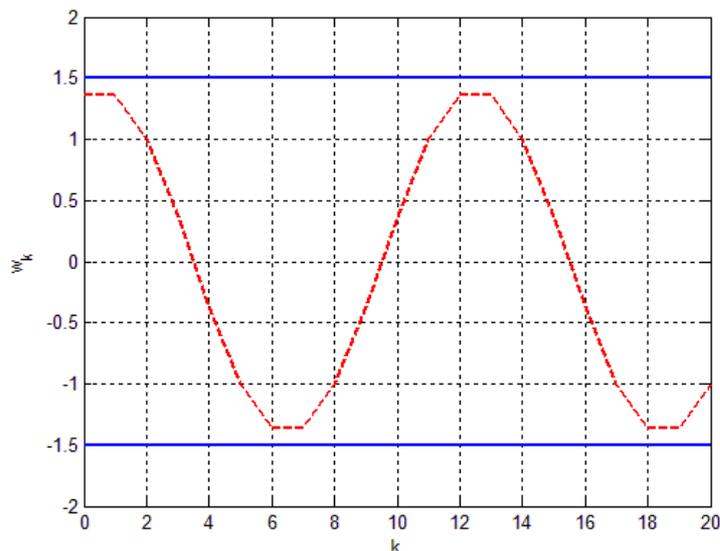


Рис. 2. Возмущения  $w_k$  (пунктир – возмущения  $w_k$ , сплошная линия – верхняя и нижняя границы множества  $W$ )  
Fig. 2. Disturbances  $w_k$  (dashed line denotes disturbances  $w_k$ , solid line denotes upper and lower borders of the set  $W$ )

Получены гарантированные оценки вектора состояния  $x_k$  для двух случаев:

1) когда модель возмущений неизвестна, но известно только множество возможных возмущений  $W$  (рис. 3);

2) когда задан вид разложения возмущения (рис. 4).

Аппроксимация информационного множества получена в виде прямоугольника, то есть вычислены диапазоны возможных значений по первой и второй координатам вектора состояния  $x_k$  (см. рис. 3, 4).

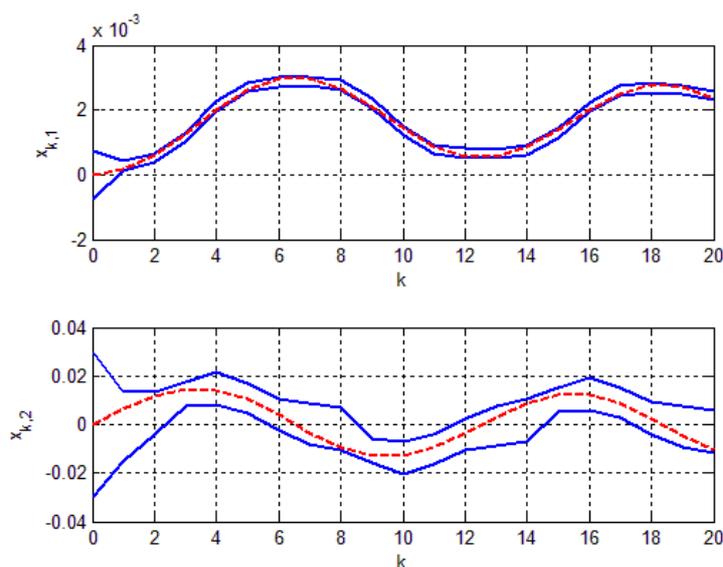


Рис. 3. Результаты гарантированного оценивания в случае, когда известно только множество возможных возмущений  $W$  (пунктир – истинное значение вектора состояния, сплошная линия – граница множественных оценок)  
Fig. 3. Set-valued estimates when only the set of disturbance possible values  $W$  is available (dashed line denotes the real value of state vector, solid line shows the borders of set-valued estimates)

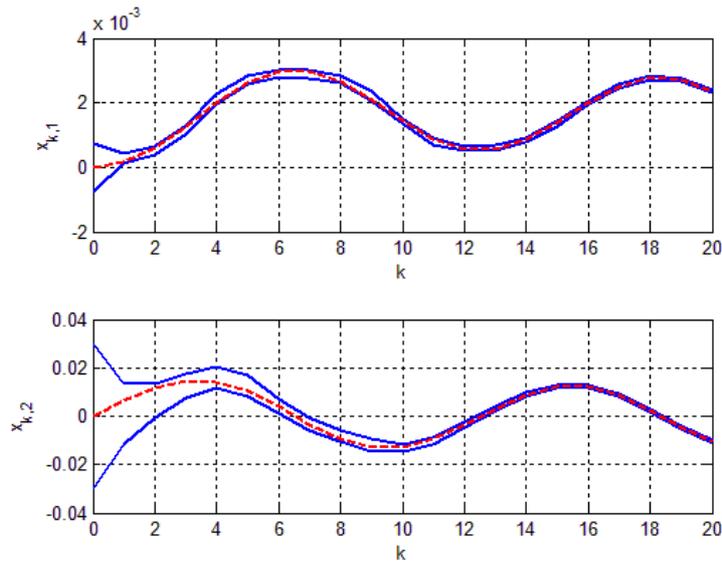


Рис. 4. Результаты гарантированного оценивания в случае, когда известен вид разложения возмущений  $w_k$  (пунктир – истинное значение вектора состояния, сплошная линия – граница множественных оценок)  
 Fig. 4. Set-valued estimates when the disturbance  $w_k$  decomposition model is known (dashed line denotes the real value of state vector, solid line shows the borders of set-valued estimates)

Вычислительный эксперимент показал, что при заданном виде разложения возмущения  $w_k$  по системе функций трубка возможных значений первой и второй координат вектора состояния получилась уже. Например, диапазон возможных значений на шаге  $k = 20$  по первой координате получился в 2,8 раза меньше, а по второй – в 15,8 раза меньше, чем в случае, когда известно только множество возможных значений возмущений.

Описанный метод полиэдральной аппроксимации позволяет получить оценки коэффициентов в разложении (16) (рис. 5). После шага  $k = 20$  оценка коэффициентов уже не улучшалась, поэтому далее можно не тратить вычислительные ресурсы на вычисление коэффициентов и использовать полученную оценку.

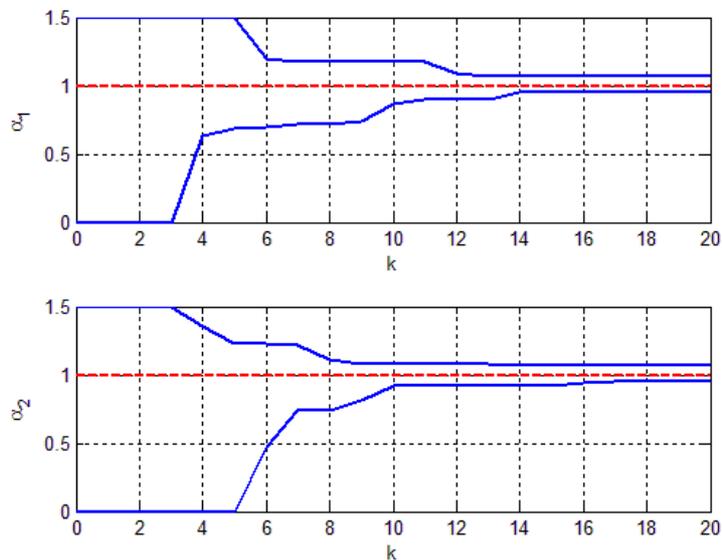


Рис. 5. Результаты оценки коэффициентов в разложении возмущений (пунктир – истинное значение коэффициентов, сплошная линия – граница оценок)  
 Fig. 5. Disturbance decomposition coefficients estimates (dashed line denotes the real value of the coefficients, solid line shows the borders of set-valued estimates)

**Заключение**

Приведено построение аппроксимации информационного множества сверху многогранником любой формы на основе описания информационного множества системами линейных неравенств и уравнений. Аппроксимацию можно строить с различной точностью благодаря увеличению окна наблюдений и учету дополнительной информации о возмущениях и помехах. Алгоритм аппроксимации сводится к решению задач линейного программирования. Поэтому важной остается задача разработки эффективных численных методов решения задачи линейного программирования с использованием нейронных сетей и параллельного программирования. Разработанный под-

ход позволяет строить гарантированные оценки множества прогнозов, что особенно актуально в задаче терминального управления, а также оценки возмущений и помех, что может быть использовано для разработки адаптивных алгоритмов оценивания и управления.

**Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-41-740022).**

### Литература

1. Андриевский, Б.Р. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть I. Методы / Б.Р. Андриевский, И.Б. Фуртат // *Автоматика и телемеханика*. – 2020. – № 9. – С. 3–61.
2. Дмитриев, С.П., Многоальтернативная фильтрация в задачах обработки навигационной информации / С.П. Дмитриев, О.А. Степанов // *Радиотехника*. – 2004. – № 7. – С. 11–17.
3. Кейн, В.М. Оптимизация систем управления по минимаксному критерию / В.М. Кейн. – М.: Наука, 1985. – 248 с.
4. Никифоров, В.О. Наблюдатели внешних детерминированных возмущений. I. Объекты с известными параметрами / В.О. Никифоров // *Автоматика и телемеханика*. – 2004. – № 10. – С. 13–24.
5. Филимонов, Н.Б. Идентификация состояния и внешней среды дискретных динамических объектов методом полиэдрального программирования / Н.Б. Филимонов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2003. – № 2. – С. 11–15.
6. Шалыгин, А.С. Методы моделирования ситуационного 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.
7. Шестаков, А.Л. Методы теории автоматического управления в динамических измерениях / А.Л. Шестаков. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ. – 2013. – 257 с.
8. Школьный, Е.П. Атмосфера и управление движением летательных аппаратов / Е.П. Школьный, Л.А. Майборода. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 310 с.
9. Шориков, А.Ф. Решение задачи минимаксного программного управления расходом топлива ракеты-носителя / А.Ф. Шориков, В.И. Калев // *Автоматика и телемеханика*. – 2020. – № 2. – С. 76–90.
10. Kalman, R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems / R.E. Kalman // *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45.
11. Stepanov, O.A. Kalman Filtering: Past and Present. An Outlook from Russia / O.A. Stepanov // *Gyroscope and Navigation*. – 2011. – Vol. 2, iss. 2. – P. 99–110.
12. Калман, Р.Е. Идентификация систем с шумами / Р.Е. Калман // *Успехи математических наук*. – 1985. – Т. 40, № 4. – С. 27–41.
13. Миллер, Б.М. Робастное оценивание на основе метода наименьших модулей и фильтра Калмана / Б.М. Миллер, К.С. Колосов // *Автоматика и телемеханика*. – 2020. – № 11. – С. 72–92.
14. Кац, И.Я. Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределенных ситуациях / И.Я. Кац, А.Б. Куржанский // *Автоматика и телемеханика*. – 1978. – № 11. – С. 79–87.
15. Кунцевич, В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – Киев: Наукова думка, 2006. – 264 с.
16. Bertsekas, D. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty / D. Bertsekas, I. Rhodes // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1971. – Vol. 16, iss. 2. – P. 117–128.
17. Ананьев, Б.И. Оценивание случайных информационных множеств многошаговых систем / Б.И. Ананьев // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 2009. – № 4. – С. 35–41.
18. Schweppe, F. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system input / F. Schweppe // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1968. – Vol. 13, iss. 1. – P. 22–28.
19. Бакан, Г.М. Нестатистическая постановка и решение одной задачи фильтрации / Г.М. Бакан // *Автоматика и телемеханика*. – 1983. – № 9. – С. 32–44.
20. Куржанский, А.Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок / А.Б. Куржанский // *Автоматика и телемеханика*. – 1991. – № 4. – С. 3–26.
21. Назин, С.А. Параметрическое оценивание методом эллипсоидов в линейных многомерных системах с неопределенным описанием модели / С.А. Назин, Б.Т. Поляк // *Автоматика и телемеханика*. – 2007. – № 6. – С. 67–80.

22. Сальников, Н.Н. Эллипсоидальное оценивание состояний и параметров динамической системы при отсутствии априорной информации / Н.Н. Сальников // *Проблемы управления и информатики*. – 2014. – № 2. – С. 144–156.
23. Block recursive parallelotopic bounding in set membership identification / L. Chisci, A. Garulli, A. Vicino, G. Zappa // *Automatica*. – 1998. – Vol. 34. – P. 15–22.
24. Zonotopes: from Guaranteed State-estimation to Control / V.T.H. Le, C. Stoica, T. Alamo et al. – Wiley-ISTE, 2013. – 335 p.
25. Лотов, А.В. Модифицированный метод уточнения оценок для полиэдральной аппроксимации выпуклых многогранников / А.В. Лотов, А.И. Поспелов // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2008. – Т. 48, № 6. – С. 990–998.
26. Управление с ограничениями для линейных стационарных систем: интерполяционный подход / Х.-Н. Нгуен, П.-О. Гутман, С. Олару, М. Ховд // *Автоматика и телемеханика*. – 2014. – № 1. – С. 68–89.
27. Матасов, А.И. Метод гарантирующего оценивания / А.И. Матасов. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 100 с.
28. Поляк, Б.Т. Фильтрация при неслучайных возмущениях: метод инвариантных эллипсоидов / Б.Т. Поляк, М.В. Топунов // *Доклады АН*. – 2008. – Т. 418, № 6. – С. 749–753.
29. Podivilova, E. Application of model and process features in setvalued dynamical system state estimation / E. Podivilova, V. Shiryaev // *IEEE Xplore. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*.
30. Подивилова, Е.О. Сравнение минимаксного и калмановского алгоритмов оценивания векторов состояния динамических систем / Е.О. Подивилова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2012. – Вып. 17, № 35 (294). – С. 135–138.
31. Подивилова, Е.О. О подходе к оцениванию состояния динамических систем как к решению системы линейных неравенств / Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 133–136.
32. Шелудько, А.С. Алгоритм минимаксной фильтрации для одномерного хаотического процесса / А.С. Шелудько, В.И. Ширяев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2014. – № 5. – С. 8–12.
33. Ширяев, В.И. Синтез управления линейными системами при неполной информации / В.И. Ширяев // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 1994. – № 3. – С. 229–237.
34. Ширяев, В.И. Алгоритмы управления динамическими системами в условиях неопределенности / В.И. Ширяев // *Мехатроника*. – 2001. – № 8. – С. 2–5.
35. Ширяев, В.И. Об оценивании возмущений в задаче минимаксной фильтрации с помощью систем линейных неравенств / В.И. Ширяев, Е.Д. Ильин // *XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г.: тр.* – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 2757–2763.

**Подивилова Елена Олеговна**, заместитель начальника управления информатизации, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; podivilovaeo@susu.ru.

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

*Поступила в редакцию 31 декабря 2020 г.*

## DYNAMIC SYSTEMS STATE, DISTURBANCES AND NOISES SET-VALUED ESTIMATION UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION

E.O. Podivilova, podivilovaeo@susu.ru,

V.I. Shiryayev, shiriaevvi@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper considers the problem of set-valued dynamic systems state estimation under conditions of uncertainty, when the sets of disturbances and noises possible values are known and statistical information about them is absent or cannot be obtained. An algorithm for feasible set polyhedral approximation is described, when the sets of possible values of disturbances and noises are polyhedra. The algorithm is based on the implicit description of the information set with linear equations and inequalities systems and solving a number of linear programming problems. Methods for increasing the estimation accuracy by taking into account additional information about disturbances and noises models are considered. Set-valued estimation of the dynamical system state vector is described when the disturbances are given as a system of functions with unknown coefficients. In this case, due to the use of information that the coefficients are constant, the dynamic system state estimates are more accurate than in the case when the disturbances are known up to a set of possible values. A numerical example is presented to demonstrate the algorithm performance. **Aim.** The aim of the research is to develop dynamic system state, disturbance and noises set-valued estimation algorithms. **Research methods.** Methods of optimization theory, filtering, linear algebra, MATLAB software package were used in the work. **Results.** Dynamic system state estimation algorithm was described. The algorithm takes into account additional information about disturbances and noises models. A method of feasible set polyhedral approximation is described, which makes it possible to obtain a set-valued estimate of a state vector, a vector of disturbances and noises, and an evolution of reachable sets. It can be used in the adaptive estimation and control algorithms development. The algorithm for set-valued estimation of the system state vector and coefficients in the disturbance decomposition as a system of given functions is developed. **Conclusion.** An algorithm for feasible set polyhedral approximation was described. The numerical example was performed and the analysis of the estimates was presented.

*Keywords:* set-valued estimation, polyhedral approximation, feasible set, evolution of reachable sets, disturbances and noises estimation.

### References

1. Andrievsky B.R., Furtat I.B. Disturbance Observers: Methods and Applications. I. Methods. *Automation and Remote Control*, 2020, vol. 81, pp. 1563–1610.
2. Dmitriev S.P., Stepanov O.A. [Multiple Filtering in Navigation Information Processing Tasks]. *Radio Engineering*, 2004, no. 7, pp. 11–17 (in Russ.)
3. Keyn V.M. *Optimizatsiya sistem upravleniya po minimaksnomu kriteriyu* [Optimization of Control Systems According to the Minimax Criterion]. Moscow, Nauka, 1985. 248 p.
4. Nikiforov V.O. Observers of External Deterministic Disturbances. I. Objects with Known Parameters. *Automation and Remote Control*, 2004, vol. 65, pp. 1531–1541.
5. Filimonov N.B. [Identification of the State and environment of Discrete Dynamic Objects by the Method of Polyhedral Programming]. *Mechatronics, Automation, Control*, 2003, no. 2, pp. 11–15. (in Russ.)
6. Shalygin A.S., Lysenko L.N., Tolpegin O.A. *Metody modelirovaniya situatsionnogo upravleniya dvizheniyem bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Modeling Techniques of Situational Control of the Movement of Unmanned Aerial Vehicles; A.V. Nozdrachev and L.N. Lysenko (Eds. )]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 584 p.
7. Shestakov A.L. *Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya v dinamicheskikh izmereniyakh* [Theory of Automatic Control Methods in Dynamic Measurements]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013. 257 p.

8. Shkol'nyy E.P., Mayboroda L.A. *Atmosfera i upravlenie dvizheniem letatel'nykh apparatov* [Atmosphere and Aircraft Traffic Control]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1973. 310 p.
9. Shorikov A.F., Kalev V.I. Solving the Minimax Open-Loop Control Problem for Carrier Rocket Fuel Consumption. *Automation and Remote Control*, 2020, vol. 81, pp. 76–90.
10. Kalman R.E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
11. Stepanov, O.A. Kalman Filtering: Past and Present. An Outlook from Russia. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, iss. 2, pp. 99–110.
12. Kalman R.E. Identification of Noisy Systems. *Russian Mathematical Surveys*, 1985, vol. 40, no. 4, pp. 25–42.
13. Miller B.M., Kolosov K.S. [Robust Estimation Based on Least Modulus and Kalman Filter]. *Automation and Remote Control*, 2020, no. 11, pp. 72–92. (in Russ.)
14. Kats I.Ya., Kurzhanskii A.B., Minimax multi-step filtering in statistically uncertain situations, *Automation and Remote Control*, 1979, vol. 39, no. 11, pp. 1643–1650.
15. Kuntsevich V.M. *Upravleniye v usloviyakh neopredelennosti: garantirovannyye rezul'taty v zadachakh upravleniya i identifikatsii* [Management under Conditions of Uncertainty: Guaranteed Results in Management and Identification Problems]. Kiyev, Naukova dumka, 2006. 264 p.
16. Bertsekas D., Rhodes I. Recursive state estimation for a Set-Membership Description of Uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, vol. 16, iss. 2, pp. 117–128.
17. Anan'ev B.I., Estimation of Random Information Sets of Multistep Systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2009, vol. 48, no. 4, pp. 35–41.
18. Schweppe F. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system input. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1968, vol. 13, iss. 1, pp. 22–28.
19. Bakan G.M. Non-Statistical Statement and Solution of One Filtering Problem. *Automation and Remote Control*, 1983, vol. 44, no. 9, pp. 1125–1136.
20. Kurzhanskii A.B. The Identification Problem –The Theory of Guaranteed Estimates. *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, no. 4, pp. 447–465.
21. Nazin S.A., Polyak B.T. Ellipsoid-based Parametric Estimation in the Linear Multidimensional Systems with Uncertain Model Description. *Automation and Remote Control*, 2007, vol. 68, pp. 993–1005.
22. Salnikov N.N. Estimation of State and Parameters of Dynamic System with the Use of Ellipsoids at the Lack of a Priori Information on Estimated Quantities. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2014, no. 2, pp. 144–156.
23. Chisci L., Garulli A., Vicino A., Zappa G. Block recursive parallelotopic bounding in set membership identification. *Automatica*, 1998, vol. 34, pp. 15–22.
24. Le, V.T.H., Stoica C., Alamo T., Camacho E.C., Dumur D. Zonotopes: from Guaranteed State-estimation to Control. Wiley-ISTE, 2013. 335 p.
25. Lotov A.V., Pospelov A.I. The Modified Method of Refined Bounds for Polyhedral Approximation of Convex Polytopes. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2008, vol. 48, pp. 933–941.
26. Nguyen H.-N., Gutman P.-O., Oлару S., Hovd M. Control with Constraints for Linear Stationary Systems: An Interpolation. *Automation and Remote Control*, 2014, vol. 75 (1), pp. 57–74.
27. Matasov A.I. *Metod garantiruyushchego otsenivaniya* [Guaranteed Estimation Method]. Moscow, Moscow State University Publ., 2009. 100 p.
28. Polyak B.T., Topunov M.V. Filtering under Nonrandom Disturbances: the Method of Invariant Ellipsoids. *Doklady Mathematics*, 2008, vol. 77, no. 1, pp. 158–162.
29. Podivilova E.O., Shiryayev V.I. Application of model and process features in setvalued dynamical system state estimation. *IEEE Xplore. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076144
30. Podivilova E. [Comparison of Minimax and Kalman Algorithms for Estimation of Dynamic Systems State Vectors]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics*, 2012, iss. 17, no. 35 (294), pp. 135–138. (in Russ.)
31. Podivilova E.O., Shiriaev V.I. [On the approach of dynamic system state estimation as solving linear inequalities system]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics*, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 133–136. (in Russ.)

32. Sheludko A.S., Shiryayev V.I. [Minimax Filtering Algorithm for One-Dimensional Chaotic Process]. *Mechatronics, Automation, Control*, 2014, no. 5, pp. 8–12. (in Russ.)

33. Shiryayev V.I. Synthesis of Control of Linear Systems in Incomplete Information. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1994, no. 3, pp. 229–237. (in Russ.)

34. Shiryayev V.I. Control Algorithms for Dynamical Systems under Uncertainty. *Mekhatronika*, 2001, no. 8, pp. 2–5. (in Russ.)

35. Shiryayev V.I., Ilin E.D. [Estimating perturbations in the minimax filtering problem using systems of linear inequalities]. *XII All-Russian Meeting on Management Problems of VSPU-2014*. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2014, pp. 2757–2763. (in Russ.)

*Received 31 December 2020*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Подвилова, Е.О. Гарантированное оценивание состояния динамических систем, возмущений и помех в условиях неполноты информации / Е.О. Подвилова, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 23–34. DOI: 10.14529/ctcr210103

### FOR CITATION

Podivilova E.O., Shiryayev V.I. Dynamic Systems State, Disturbances and Noises Set-Valued Estimation under Conditions of Incomplete Information. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 23–34. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210103

# АЛГОРИТМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕБАЛАНСНОГО ВИБРОМОДУЛЯ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Г.М. Симаков, В.В. Топовский, И.А. Ильенков**

*Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия*

С развитием электронных систем управление различными электродвигателями асинхронного типа становится все более эффективным и точным. Такие двигатели используются в мире повсеместно, разнообразие задач, выполняемых такими механизмами, с каждым днем растет, и потребность в них не уменьшается. В настоящее время всё большее распространение получают системы электропривода переменного тока на базе асинхронного двигателя. Это обусловлено высокой надежностью, простотой конструкции и относительно малой стоимостью асинхронных двигателей, а также стремительным развитием силовой преобразовательной техники, позволяющей создавать различные виды полупроводниковых преобразователей и надежных источников питания. В большинстве случаев система векторного управления строится для предварительно намагниченного электропривода. В данной статье рассмотрен синтез системы векторного управления асинхронным двигателем без предварительного намагничивания, а также рассмотрены алгоритмы векторного управления электромеханического дебалансного вибромодуля без предварительного намагничивания АДКЗР. **Цель исследования.** Разработать структуру управления асинхронным двигателем дебалансного вибромодуля. Ввести звено деления в структуру управления. Синтезировать регулятор скорости, потокосцепления ротора и двух составляющих тока статора. Скомпенсировать действие ЭДС в каналах поперечной и продольной оси. Обеспечить в системе управления возможность реверса электрической машины. Реализовать моделирование полученной системы и провести исследование полученных результатов, получив динамические характеристики. **Методы.** Система векторного управления строится в виде канала стабилизации модуля потокосцепления ротора и канала управления скоростью вращения ротора. Для достижения необходимого результата введем нелинейный регулятор типа звена деления в структуру управления. Это позволит преобразовать нелинейную структуру в линейную. Скомпенсируем действие ЭДС в каналах поперечной и продольной оси. Реализовав моделирование полученной системы, проведем исследование полученных результатов, получив динамические характеристики. **Результаты.** Структурное моделирование будет проведено в программном пакете MATLAB/Simulink. В целях сравнительной оценки результатов синтеза системы управления с регулятором момента в виде звена деления будет также синтезирована система подчиненного регулирования, обладающая аналогичными параметрами силовой части. **Заключение.** Выбор в качестве выходной координаты момента двигателя позволяет существенно упростить математическую модель асинхронного двигателя. Кроме особенностей математической модели асинхронного электродвигателя в настоящей работе требуется учитывать особенности вибромодуля как нагрузки. В данном случае можно выделить две главные особенности – большой момент инерции маховых масс электропривода, а также синусоидальную зависимость момента сопротивления от угла поворота ротора.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АДКЗР), намагничивание, система подчиненного регулирования (СПР), система регулирования момента (СРМ), пакет программного обеспечения MATLAB, динамические характеристики, электродвижущая сила (ЭДС).

## Введение

В настоящее время электропривод с частотным преобразователем и асинхронным двигателем является главным типом регулируемого промышленного электропривода, серийно выпускаемого ведущими отечественными и зарубежными электротехническими фирмами.

При математическом описании асинхронной машины используются общепринятые допущения и ограничения [1]:

- Магнитная система машины не насыщена.
- Потери в стали отсутствуют.
- Фазные обмотки машины симметричны и сдвинуты на  $120^\circ$  (для 3-фазной машины).
- Магнитодвижущие силы обмоток и магнитные поля распределены вдоль окружности воздушного зазора по синусоидальному закону.
- Величина воздушного зазора постоянна.
- Ротор машины симметричен.
- Реальная распределенная обмотка заменена эквивалентной сосредоточенной, создающей ту же магнитодвижущую силу.

Главными компонентами асинхронного электродвигателя являются статор и ротор, которые отделены друг от друга воздушным зазором. Активную работу в двигателе выполняют обмотки и сердечник ротора [2].

### Алгоритм двухканального управления

При синтезе системы векторного управления асинхронного электропривода одним из классических методов, например, методом подчиненного регулирования, управление будет осуществляться по двум каналам: каналу поперечной оси и каналу продольной оси. В данном случае необходимо предварительное намагничивание машины и последующее удержание потокосцепления ротора на номинальном уровне [5].

Данная структура позволяет осуществлять управление скоростью вращения дебалансов по двум каналам без предварительного намагничивания. Необходимым условием линеаризации является равенство постоянных времени двух каналов – канала потокосцепления ротора и канала поперечной составляющей тока статора. Здесь возникает еще одна проблема – контуры регулирования поперечной и продольной составляющей тока статора имеют одинаковое быстродействие, поскольку физически это один и тот же контур регулирования тока статора. Скомпенсировав действие ЭДС в каналах поперечной и продольной оси путем введения положительных обратных связей по ним, можно рассматривать контуры токов  $I_d$  и  $I_q$  как независимые друг от друга [13].

Управление электромагнитным моментом двигателя с использованием звена деления проиллюстрировано на рис. 1.

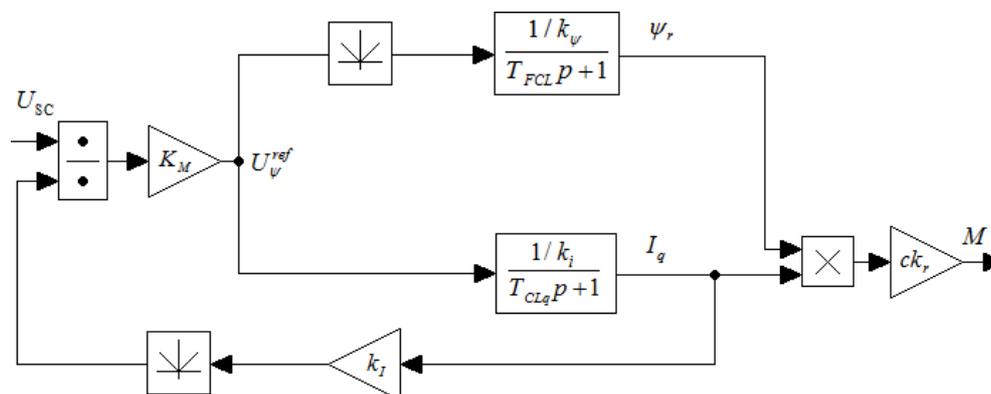


Рис. 1. Двухканальное управление электромагнитным моментом асинхронного двигателя

Fig. 1. Dual control electromagnetic torque induction motor

На рис. 1 были приняты следующие обозначения:

$U_{sc}$  – выходной сигнал регулятора скорости;

$K_M$  – дополнительный усилитель;

$U_{\psi}^{ref}$  – напряжение задания потокосцепления ротора и тока  $I_q$ ;

$k_i$  – коэффициент обратной связи по току статора;

$k_{\psi}$  – коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора;



На рис. 2 были приняты следующие обозначения:

$U_w^{ref}$  – напряжение задания скорости;

$U_{FC}$  – выходной сигнал регулятора потокосцепления;

$W_{SC}(p)$  – передаточная функция регулятора скорости;

$W_{FC}(p)$  – передаточная функция регулятора потокосцепления ротора;

$KPT_d$  – контур регулирования тока  $I_d$ ;

$L_m$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;

$T_r$  – эквивалентная постоянная времени роторной цепи;

$KPT_q$  – контур регулирования тока  $I_q$ ;

$k_\omega$  – коэффициент обратной связи по скорости;

$m$  – масса дебаланса;

$g$  – ускорение свободного падения;

$r$  – эксцентриситет дебаланса;

$\varphi$  – угловое положение дебаланса.

Дополнительный усилитель  $K_M$  устанавливает однозначное соответствие между уровнями сигнала  $U_{SC}$  и значениями электромагнитного момента  $M$ . Данный усилитель рассчитывается по формуле

$$K_M = \frac{M_{\max}}{U_{SC}^{\max} \cdot ck_r} \cdot k_\psi \cdot k_i. \quad (3)$$

Составим математическое описание системы управления. Выражение для сигнала задания тока  $I_q$  и потокосцепления  $\psi_r$ :

$$U_\psi^{ref} = K_M \cdot \frac{U_{SC}}{k_i \cdot I_q}. \quad (4)$$

Тогда потокосцепление  $\psi_r$  определяется так:

$$\psi_r = U_\psi^{ref} \cdot W_{FCL}(p), \quad (5)$$

где  $W_{FCL}(p)$  – передаточная функция контура регулирования потокосцепления ротора.

Ток  $I_q$  определяется аналогичным образом:

$$I_q = U_\psi^{ref} \cdot W_{CLq}(p), \quad (6)$$

где  $W_{CLq}(p)$  – передаточная функция контура регулирования тока  $I_q$ .

Электромагнитный момент двигателя:

$$M = ck_r \cdot I_q \cdot \psi_r. \quad (7)$$

Если пренебречь инерционностью контура тока  $I_d$  по сравнению с инерционностью внешнего по отношению к нему контура потокосцепления, то

$$M = ck_r \cdot I_q \cdot K_M \cdot \frac{U_{SC}}{k_i \cdot I_q} W_{FCL}(p) = \frac{ck_r \cdot K_M}{k_i} \cdot U_{SC} \cdot \frac{1/k_\psi}{T_{FCL}p + 1}. \quad (8)$$

Кроме особенностей математической модели асинхронного электродвигателя в настоящей работе требуется учитывать особенности вибромодуля как нагрузки. В данном случае можно выделить две главные особенности – большой момент инерции маховых масс электропривода, а также синусоидальную зависимость момента сопротивления от угла поворота ротора.

Применимость такой структуры управления к электромеханическим дебалансным вибраторам можно показать с помощью компьютерного моделирования [3, 4].

Уравнение движения электропривода будет выглядеть так:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M - M_c = M - M_{TP} - mgr \sin \varphi. \quad (9)$$

Суммарное силовое воздействие со стороны двух полумодулей дебалансного вибратора с учетом переменного характера скорости вращения дебалансов имеет следующий вид:

$$F_{\Sigma} = 2mr \left( \omega^2 \cos \varphi + \frac{d\omega}{dt} \sin \varphi \right). \quad (10)$$

Здесь можно выделить две составляющие:

1) центробежные силы  $mr\omega^2 \cos \varphi$ ;

2) тангенциальная составляющая полного ускорения дебаланса  $mr \frac{d\omega}{dt} \sin \varphi$ .

Передаточная функция регулятора тока выбрана следующей:

$$W_{ccd}(p) = K_{ccd} \frac{T_{\sigma e} p + 1}{T_{\sigma e} p}. \quad (11)$$

Неизвестным параметром регулятора является  $K_{ccd}$ . Передаточная функция замкнутого контура регулирования тока  $I_d$  с таким регулятором имеет вид

$$W_{CLd}(p) = \frac{1/k_i}{T_{CLd} p + 1}, \quad (12)$$

где  $T_{CLd} = \frac{1}{\Omega_{CLd}}$  – эквивалентная постоянная времени контура регулирования тока  $I_d$ , которая

определяется исходя из принятой полосы пропускания  $\Omega_{CLd}$  контура регулирования тока, которая определяется исходя из принятой полосы пропускания контура регулирования тока. Для того чтобы разделить движения контуров, принимаем, что полоса пропускания контура регулирования тока  $\Omega_{CLd}$  должна быть на порядок выше, чем частота сейсмического сигнала  $\Omega$ , т. е.  $\Omega_{CLd} \geq (6 \dots 10) \cdot \Omega$ .

Тогда можно из выражения для  $T_{CLd}$

$$T_{CLd} = \frac{R_1 T_{\sigma e}}{K_{ccd} K_{fe} k_i} \quad (13)$$

определить коэффициент передачи  $K_{ccd}$

$$K_{ccd} = \frac{R_1 T_{\sigma e}}{T_{CLd} K_{fe} k_i}. \quad (14)$$

Передаточная функция регулятора тока  $I_q$  выбирается аналогичным образом:

$$W_{ccd}(p) = K_{ccd} \frac{T_{\sigma e} p + 1}{T_{\sigma e} p}. \quad (15)$$

Тогда передаточная функция замкнутого контура регулирования тока  $I_q$  с таким регулятором:

$$W_{CLq}(p) = \frac{1/k_i}{T_{CLq} p + 1}, \quad (16)$$

где  $T_{CLq} = \frac{1}{\Omega_{CLq}}$  – эквивалентная постоянная времени контура регулирования тока  $I_q$ , которая

определяется исходя из принятой полосы пропускания контура регулирования тока  $\Omega_{CLq}$ . Для того чтобы разделить движения контуров, принимаем следующее:

$$\Omega_{CLq} = \Omega,$$

тогда из выражения следует:

$$T_{CLq} = \frac{R_1 T_{\sigma e}}{K_{ccq} K_{jc} k_i}. \quad (17)$$

Определить коэффициент передачи  $K_{ccq}$ :

$$K_{ccq} = \frac{R_1 T_{\sigma e}}{T_{CLq} K_{jc} k_i}. \quad (18)$$

Передаточная функция регулятора потокосцепления ротора выбирается так:

$$W_{FC}(p) = K_{FC} \frac{T_2 p + 1}{T_2 p}. \quad (19)$$

Тогда передаточная функция замкнутого контура регулирования потокосцепления ротора с таким регулятором:

$$W_{CLq}(p) = \frac{1/k_{\psi}}{T_{FCL} p + 1}, \quad (20)$$

где  $T_{FCL} = \frac{1}{\Omega_{FCL}}$  – эквивалентная постоянная времени контура регулирования потокосцепления,

которая определяется исходя из принятой полосы пропускания контура регулирования потокосцепления  $\Omega_{FCL}$ . Исходя из синтеза, принимаем  $\Omega_{FCL} = \Omega_{CLq} = \Omega$ .

Тогда можно из выражения для  $T_{FCL}$

$$T_{FCL} = \frac{k_i T_2}{K_{FC} L_{\mu} k_{\psi}}$$

определить коэффициент передачи  $K_{FC}$ :

$$K_{FC} = \frac{k_i T_2}{T_{FCL} L_{\mu} k_{\psi}}.$$

Поскольку при решении поставленной задачи не требуется обеспечение астатизма по скорости, то контур регулирования скорости можно выбрать пропорциональным [2].

Если пренебречь инерционностью вложенных контуров по сравнению с контуром регулирования скорости, то приравнивая желаемую передаточную функцию к передаточной функции контура регулирования скорости:

$$\frac{W_{SC}(p) \cdot \frac{ck_r \cdot K_M}{k_i} \cdot \frac{1}{k_{\psi}} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} p}}{1 + W_{SC}(p) \cdot \frac{ck_r \cdot K_M}{k_i} \cdot \frac{1}{k_{\psi}} \cdot \frac{1}{J_{\Sigma} p} \cdot k_{\omega}} = \frac{1/k_{\omega}}{T_{SCL} p + 1}, \quad (21)$$

получим выражение для определения передаточной функции регулятора скорости

$$W_{SC}(p) = K_{SC} = \frac{J_{\Sigma} \cdot k_i \cdot k_{\psi}}{T_{SCL} \cdot ck_r \cdot K_M \cdot k_{\omega}}. \quad (22)$$

Поскольку передаточную функцию контура регулирования потокосцепления приближенно можно представить следующим периодическим звеном

$$W_{SCL}(p) = \frac{1/k_{\psi}}{T_{FCL} p + 1},$$

то можно заключить, что линеаризация математической модели асинхронного двигателя (при условии работы в пределах ограничений регуляторов, с помощью звена деления и дополнительной обратной связи по току  $I$ ) является осуществимой. Кроме того, система управления асинхронным электроприводом в этом случае не требует предварительного намагничивания электрической машины и отдельного управления по каналу  $d$ . Электропривод, при описании которого имеется допущение, что насыщение магнитной системы в нем отсутствует, называется ненасыщенным. Предположение такого допущения, например при описании электродвигателя в виде



В данной модели входными параметрами являются проекции вектора напряжения статора, а выходными – магнитный поток ротора, скорость двигателя, проекции токов статора, ротора, проекции потокосцепления статора, потокосцепление ротора, главное потокосцепление и роторная частота [7,8].

### Результат моделирования

Исходными данными для проектирования системы управления электромеханического дебалансного вибромодуля были амплитуда виброусилителя ( $A$ ) и частота виброусилителя ( $\Omega$ ):  $A = 390\,000$  Н;  $\Omega = 14\pi$  рад/с. Ниже представлены параметры системы управления, которые использовались при ее синтезе и моделировании [13].

Параметры дебалансов:

- эксцентриситет дебаланса  $r = 0,2$  м;
- масса дебаланса  $m = 500$  кг.

Параметры выбранного асинхронного двигателя 4A280S10Y3:

- номинальная мощность  $P_r = 37$  кВт;
- номинальное фазное напряжение статора  $U_{1r} = 220$  В;
- номинальная скорость вращения  $n_r = 590$  об/мин;
- номинальный момент на валу двигателя  $M_r = 600$  Нм;
- максимальный момент на валу двигателя  $M_{\max} = 1080$  Нм;
- номинальный фазный ток  $I_{1r} = 79$  А;
- число пар полюсов  $p_p = 5$ ;
- коэффициент связи ротора  $k_r = 0,937$ ;
- активное сопротивление статора  $R_1 = 0,0835$  Ом;
- эквивалентная постоянная времени статорной цепи  $T_{\sigma e} = 0,024$  с;
- взаимная индукция обмоток статора и ротора  $L_m = 0,0177$  Гн;
- эквивалентная постоянная времени роторной цепи  $T_r = 0,2716$  с;
- момент силы трения в подшипниках  $M_{\text{тр}} = 200$  Нм;
- момент инерции электропривода, приведенный к валу электродвигателя  $J_{\Sigma} = 23,6$  кг·м<sup>2</sup>;
- коэффициент передачи частотного преобразователя  $K_{fc} = 31,1$ .

Структурное моделирование было проведено в программном пакете MATLAB/Simulink.

В целях сравнительной оценки результатов синтеза системы управления с регулятором момента в виде звена деления (СРМ) была также синтезирована система подчиненного регулирования (СПР), обладающая аналогичными параметрами силовой части. [11] Результаты цифрового моделирования (графики переходных процессов скорости двигателя, момента, потокосцепления ротора и тока  $I_d$ ) приведены в следующем пункте данной научной статьи.

### Исследование системы с учетом кривой намагничивания

Из справочника по асинхронным электродвигателям известны табличные данные из справочного каталога Копылова [12] по исследуемому асинхронному двигателю 4A280S10Y3, по которым произведем построение кривой намагничивания в среде MATLAB:

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЕБАЛАНСНЫХ ВИБРОМОДУЛЕЙ

Моделирование алгоритмов управления проводилось в программном пакете MATLAB/Simulink.

Имитационная модель электропривода дебалансного вибромодуля с двухканальным алгоритмом представлена на рис. 4.

Имитационное моделирование разработанной системы было проведено в программном пакете MATLAB/Simulink, в результате чего были рассчитаны ее динамические характеристики. Результаты моделирования представлены на рис. 5–9. Предполагается, что использование данной структуры управления позволит существенно снизить тепловые потери на намагничивание асинхронного электропривода дебалансного вибромодуля по сравнению с классическими системами, разработанными ранее.

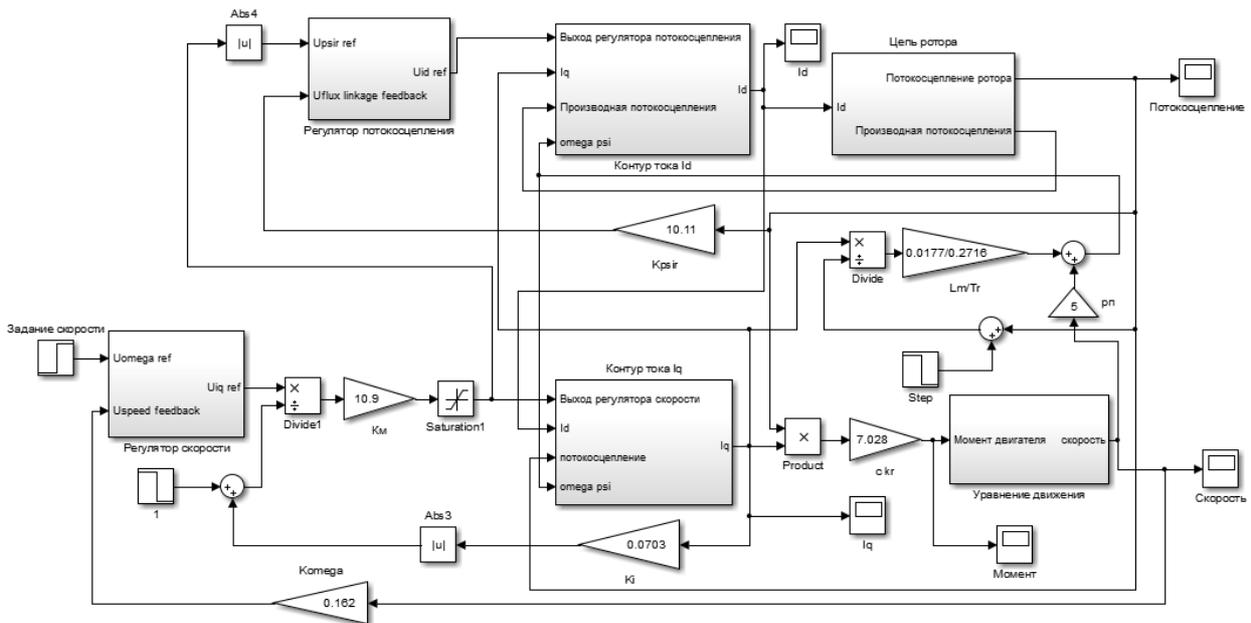


Рис. 4. Имитационная модель электропривода дебалансного вибромодуля с двухканальным алгоритмом  
Fig. 4. Simulation model of the unbalanced vibration module electric drive with a two-channel algorithm

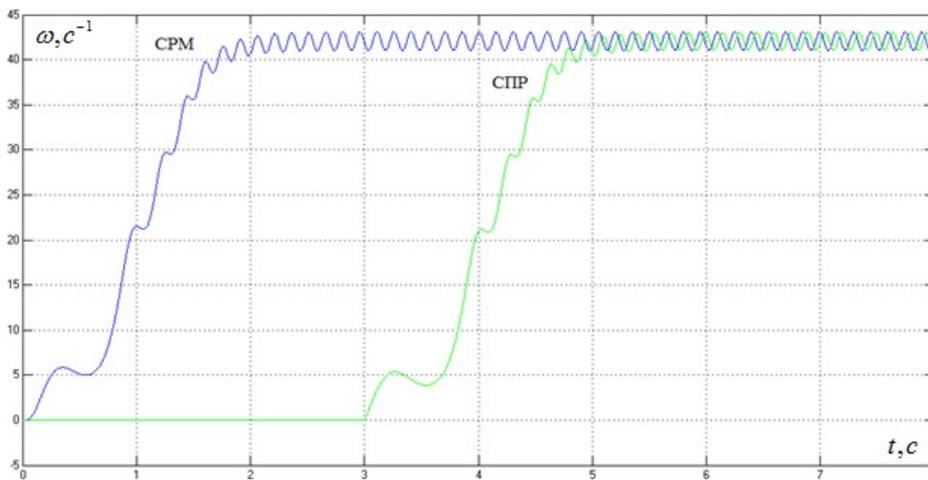


Рис. 5. Переходные процессы скорости дебаланса для системы с двухканальным алгоритмом  
Fig. 5. Unbalance rate transients for a system with a two-channel algorithm

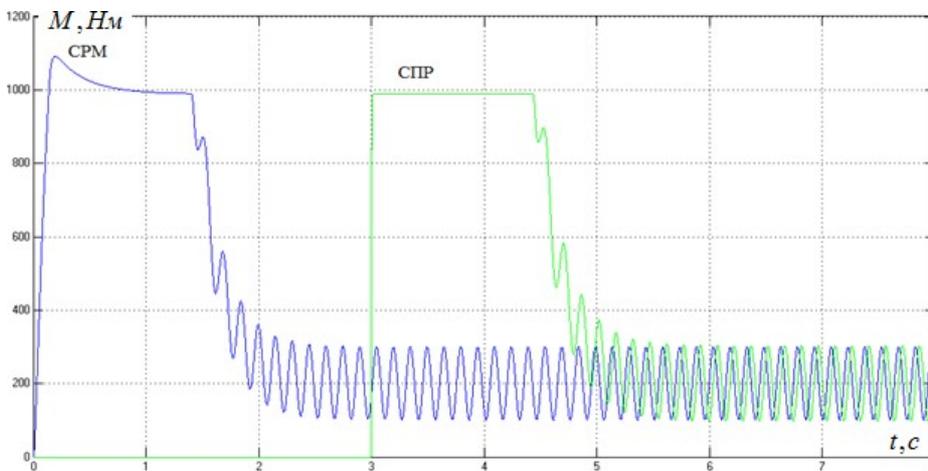


Рис. 6. Переходные процессы электромагнитного момента для системы с двухканальным алгоритмом  
Fig. 6. Transients of electromagnetic moment for a system with a two-channel algorithm

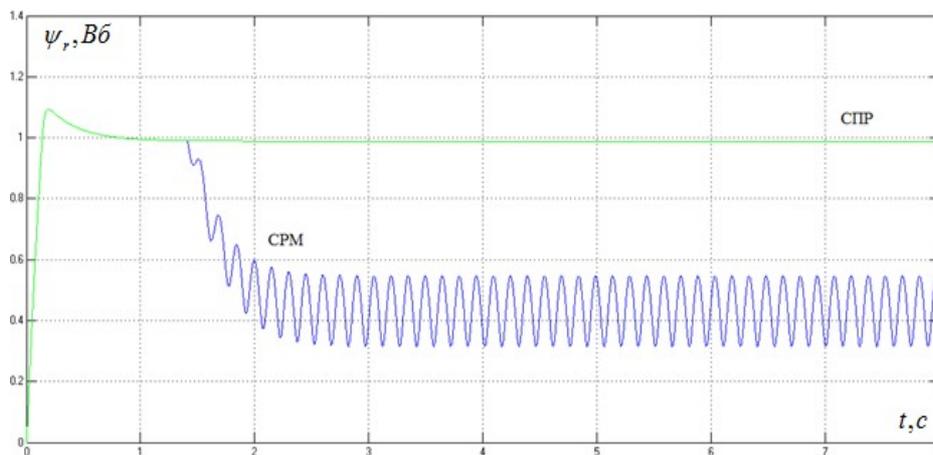


Рис. 7. Переходные процессы потокосцепления ротора для системы с двухканальным алгоритмом  
 Fig. 7. Rotor flux linkages for a dual-channel system

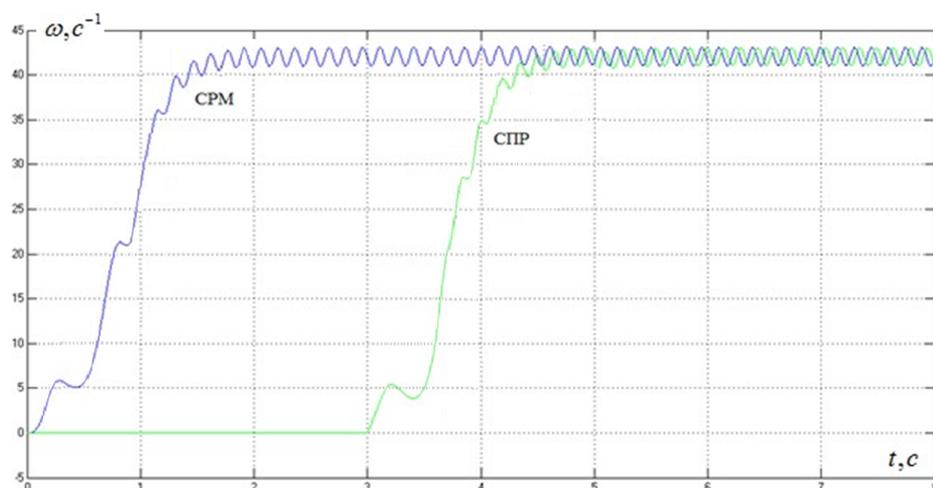


Рис. 8. Переходные процессы скорости дебаланса для системы с двухканальным алгоритмом с учетом кривой намагничивания  
 Fig. 8. Unbalance rate transients for a system with a two-channel algorithm taking into account the magnetization curve

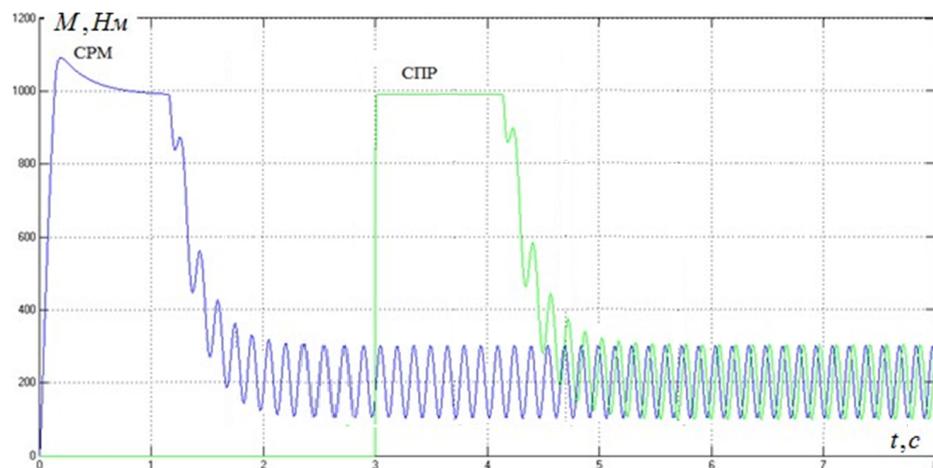


Рис. 9. Переходные процессы электромагнитного момента для системы с двухканальным алгоритмом с учетом насыщения  
 Fig. 9. Transients of electromagnetic moment for a system with a two-channel algorithm taking into account saturation

### Выводы

Структурное моделирование построенной системы управления дебалансного вибромодуля было проведено в программном пакете MATLAB/Simulink.

В целях сравнительной оценки результатов синтеза системы управления с регулятором момента в виде звена деления (СРМ) была также синтезирована система подчиненного регулирования (СПР), обладающая аналогичными параметрами силовой части. Контур регулирования намагничивающего тока в обоих случаях настраивается на полосу пропускания  $f = 700$  Гц, контур регулирования тока  $I_q$  в СРМ был настроен на частоту 70 Гц. При этом частотный преобразователь представлялся безынерционным звеном.

Для исследований были произведены расчеты для асинхронного электродвигателя и регуляторов. Результаты цифрового моделирования, графики переходных процессов скорости двигателя, электромагнитного момента, потокосцепления ротора и тока  $I_d$  для системы с регулятором момента в виде звена деления (СРМ) и классической СПР, обладающей аналогичными параметрами силовой части, показаны на рис. 5–9. В обеих системах осуществлялось задание на частоту сейсмического сигнала, равную 7 Гц. Поскольку система подчиненного регулирования предполагает предварительное намагничивание асинхронного двигателя, то в целях более наглядного представления результатов моделирования пуск двигателя в этой системе был осуществлен на 3 с позже, чем в системе с регулятором момента (СРМ). Учет насыщения магнитной системы при моделировании работы асинхронного короткозамкнутого двигателя позволяет на одну секунду раньше получить значения расчетного момента холостого хода и скорости вращения вала двигателя, чем в случае, не учитывающем это явление.

### Литература

1. Симаков, Г.М. Автоматизированный электропривод: учеб. / Г.М. Симаков – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 135 с.
2. Асинхронный электропривод общепромышленного назначения с прямым цифровым управлением и развитыми интеллектуальными свойствами / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев, Д.А. Монов // Известия вузов. Серия «Электротехника». – 2001. – № 3. – С. 60–67.
3. Куцевалов, В. М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами / В.М. Куцевалов. – М.: Энергия, 1979. – 160 с.
4. Шрейнер, Р.Т. Ресурсы энергосбережения в повторно-кратковременных режимах работы асинхронного привода / Р.Т. Шрейнер, А.А. Емельянов, А.В. Медведев // Промышленная энергетика. – 2011. – № 11. – С. 22–27.
5. Новая серия цифровых асинхронных электроприводов на основе векторных принципов управления и формирования переменных / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев, Д.А. Монов // Электротехника. – 2001. – № 12. – С. 25–30.
6. Востриков, А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 364 с.
7. Новое поколение преобразователей частоты серии ЭПВ / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, В.А. Матисон, В.Б. Степанов // Силовая электроника. – 2006. – № 2. – С. 64–66.
8. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Г. Г. Соколовский – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
9. Симаков, Г.М. Метод последовательного синтеза энергетически эффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока / Г.М. Симаков, Ю.П. Филюшов // XVI Международная научно-техническая конференция «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург, 2015. – С. 111–114.
10. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
11. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с.

12. Копылов, И.П. *Математическое моделирование электрических машин* / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

13. Симаков, Г. М., *Асинхронный регулируемый электропривод тягодутьевых машин* / Г.М. Симаков, М.А. Марченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 175 с.

14. Виноградов, А.Б. *Бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторной системой управления* / А.Б. Виноградов // *Электричество*. – 2008. – № 2. – С. 44–50.

15. Симаков, Г.М. *Энергоэффективное управление электроприводом переменного тока* / Г.М. Симаков, Ю.П. Филушов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 241 с.

**Симаков Геннадий Михайлович**, д-р техн. наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; Simakov44\_86@mail.ru.

**Топовский Валерий Валерьевич**, старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; topovskij.2013@corp.nstu.ru.

**Ильенков Игорь Александрович**, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск; Igor\_Iljenkov@mail.ru.

*Поступила в редакцию 22 октября 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210104

## VECTOR CONTROL ALGORITHMS FOR AN ELECTROMECHANICAL UNBALANCE VIBRATION MODULE WITHOUT PRELIMINARY MAGNETIZATION OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR

**G.M. Simakov**, Simakov44\_86@mail.ru,  
**V.V. Topovskiy**, topovskij.2013@corp.nstu.ru,  
**I.A. Ilyenkov**, Igor\_Iljenkov@mail.ru

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation*

With the development of electronic systems, the control of various asynchronous type electric motors is becoming more efficient and accurate. Such engines are used everywhere in the world, the variety of tasks performed by such mechanisms is growing every day, and the need for them is not decreasing. Nowadays, AC electric drive systems based on an asynchronous motor are becoming more widespread. This is due to the high reliability, simple design and relatively low cost of induction motors, as well as the rapid development of power converter technology, which makes it possible to create various types of semiconductor converters and reliable power supplies. In most cases, the vector control system is built for a pre-magnetized electric drive. This article discusses the synthesis of a vector control system for an asynchronous motor without preliminary magnetization, and also considers algorithms for vector control of an electromechanical unbalanced vibration module without preliminary magnetization of the asynchronous motor. **Aim.** To develop a control structure for an asynchronous motor of an unbalanced vibration module. Introduce a division link into the management structure. Synthesize a speed controller, rotor flux linkage and two components of the stator current. Compensate for the EMF action in the channels of the transverse and longitudinal axis. Provide the control system with the ability to reverse the electric machine. Implement the simu-

lation of the resulting system and conduct a study of the results obtained, having obtained dynamic characteristics. **Methods.** The vector control system is constructed in the form of a stabilization channel of the rotor flux linkage module and a channel for controlling the rotor rotation speed. To achieve the desired result, we introduce a nonlinear regulator of the division link type into the control structure. This will convert the nonlinear structure to linear. Let's compensate the EMF action in the channels of the transverse and longitudinal axis. Having realized the simulation of the obtained system, we will conduct a study of the results obtained, having obtained dynamic characteristics. **Results.** Structural modeling was carried out in the MATLAB/Simulink software package. For the purpose of a comparative assessment of the synthesis results of a control system with a torque regulator in the form of a division link, a subordinate control system will also be synthesized, which has similar parameters of the power unit. **Conclusion.** The choice of the motor torque as the output coordinate makes it possible to significantly simplify the mathematical model of the induction motor. In addition to the features of the mathematical model of an asynchronous electric motor, in this work it is necessary to take into account the features of the vibration module as a load. In this case, two main features can be distinguished – a large moment of inertia of the flywheel masses of the electric drive, as well as a sinusoidal dependence of the moment of resistance on the angle of rotation of the rotor.

*Keywords:* asynchronous squirrel-cage motor, magnetization, subordinate control system, torque control system, software package MATLAB, dynamic characteristics, electromotive force (EMF).

### References

1. Simakov G.M. *Avtomatizirovanyi elektroprivod* [Automated electric drive]. Novosibirsk, Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ., 2010. 135 p.
2. Vinogradov A.B., Chistoserdov V.L., Sibirtsev A.N., Monov D.A. [Asynchronous electric drive for general industrial purposes with direct digital control and advanced intellectual properties]. *Proceedings of the universities. Ser. Electrical Engineering*, 2001, no. 3, pp. 60–67. (in Russ.)
3. Kutsevalov V.M. *Asinchronnyye i sinchronnyye mashiny s massivnymi rotorami* [Asynchronous and synchronous machines with massive rotors]. Moscow, Energy Publ., 1979. 160 p.
4. Shreiner R.T., Emelyanov A.A., Medvedev A.V. [Energy saving resources in intermittent modes of operation of an asynchronous drive]. *Industrial power engineering*, 2011, no. 11, pp. 22–27. (in Russ.)
5. Vinogradov A.B., Chistoserdov V.L., Sibirtsev A.N., Monov D.A. [A new series of digital asynchronous electric drives based on vector control principles and variable generation]. *Electrical engineering*, 2001, no. 12, pp. 25–30. (in Russ.)
6. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* [Automatic control theory: Textbook. University manual]. Novosibirsk, Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ., 2003. 364 p.
7. Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Matison V.A., Stepanov V.B. [New generation of frequency converters EPV series]. *Power electronics*, 2006, no. 2, pp. 64–66. (in Russ.)
8. Sokolovsky G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Variable Frequency AC Drives: A Textbook for Students of Higher Educational Institutions]. Moscow, Publ. Center “Academy”, 2006. 272 p.
9. Simakov G.M., Filyushov Yu.P. [Method of sequential synthesis of energetically efficient control of a high-speed AC drive]. *XVI International Scientific and Technical Conference “AC Drives”*, 2015, pp. 111–114. (in Russ.)
10. Bulgakov A.A. *Chastotnoye upravlenie asinchronnymi dvigatelyami* [Frequency control of asynchronous motors]. Moscow, Energoizdat, 1982. 216 p.
11. Chernykh I.V. *Modelirovaniye electrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystem i Simulink* [Modeling electrical devices in Matlab, SimPowerSystem, and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, 2008. 288 p.
12. Kopylov I.P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh maschin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Higher School, 2001. 327 p.

13. Simakov G.M., Marchenko M.A. *Asinchronniy reguliruemiyi elektroprivod tyagodutevych machin* [Asynchronous variable electric drive of draft machines]. Novosibirsk, Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ., 2017. 175 p.

14. Vinogradov, A. B. [Sensorless asynchronous electric drive with adaptive vector control system]. *Electricity*, 2008, no. 2, pp. 44–50. (in Russ.)

15. Simakov G.M., Filyushov Yu.P. *Energoeffektivnoe upravlenie elektroprivodom peremennogo toka* [Energy efficient AC drive control]. Novosibirsk, Novosibirsk St. Techn. Univ. Publ., 2016. 241 p.

*Received 22 October 2020*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Симаков, Г.М. Алгоритмы векторного управления электромеханического дебалансного вибромодуля без предварительного намагничивания асинхронного двигателя / Г.М. Симаков, В.В. Топовский, И.А. Ильенков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 35–48. DOI: 10.14529/ctcr210104

### FOR CITATION

Simakov G.M., Topovskiy V.V., Ilyenkov I.A. Vector Control Algorithms for an Electromechanical Unbalance Vibration Module without Preliminary Magnetization of the Asynchronous Motor. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 35–48. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210104

---

# CONDUCTING A SYNTHESIS OF A DIGITAL AUTOMATON FOR AN AUTOMATED FIREFIGHTING SYSTEM

*K.M. Volkova, ksenifire@bk.ru*

*State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation*

Every year the industry in the world is gaining momentum: the number of industrial enterprises is growing, and with it the number of accidents at them. Oil today is the most common product for the synthesis and production of products. Increasing the level of fire protection systems at oil refineries remains one of the most important components of protecting people from technogenic hazards. The speed of innovation allows the application of artificial intelligence in the creation of automated fire protection systems. **Research objective.** This study is aimed at building a model of an automated integrated fire protection system (AISPPO). Through the synthesis of digital automata and minimizing the control functions of the digital model is created a system of automated integrated fire protection system. **Materials and methods.** To solve the problems of research used methods of constructing graphical algorithms of automated integrated fire protection system. This system is a new approach to solving the issue of safety of industrial facilities in the oil refining industry. **Results.** The proposed new model of the software implementation of a digital automaton in an automated integrated system of fire detection and monitoring of an oil refinery has made it possible to create a bank of calculated and analytical data on all potential types of failures in the structure of the enterprise in order to train personnel and make changes to existing methodological documents and instructions for personnel actions in a particular situation. **Conclusion.** The developed technology allows you to process the incoming signal contained in cyclograms into an intermediate form for the synthesis of digital automata using innovative tools.

*Keywords: Mili automaton, digital automaton, graph, graph vertex, minimization of logic function.*

## Introduction

The model of a digital automaton (CA) of an automated firefighting system with input and output signals induces a one-to-one mapping of the set of commands in the input signals (the input command mapping) into the set of commands in the output signals. In this article we consider the stages of solving the problem of synthesizing automata by the mappings induced by them.

According to the developed algorithm (Fig. 1), when selecting the states, one should take into account such recommendations as:

- the correspondence of the set and the initial set;
- the choice of the next state is made according to the ascending order after each PROCESS block;
- before each DECISION block, after each line adjacency point, which indicates the transition direction [1].

## Refinery accident and fire analysis

According to the developed functioning algorithm decided that the scheme of the CA model of the automated fire suppression system (AFS) will include 14  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{13}$  states, where  $a_0$  – the initial state [2].

All 14 states of digital automaton will be encoded by four-bit binary numbers (Tables 1–3). The memory block, in this case, will be a four-bit parallel register on D-triggers, because storage of each bit of the binary code will use one trigger [3, 14].

Based on the developed algorithm of functioning of the digital automaton ASFT we build a graph [4]. The state of the device in the graph will depend proportionally on the values of the vertices (vertices of the graph). The vertices of the graph of the ASPT CA model are connected by arcs, which show the direction of transition. At the top of the arcs we write transition conditions and output signals [5, 11, 12].

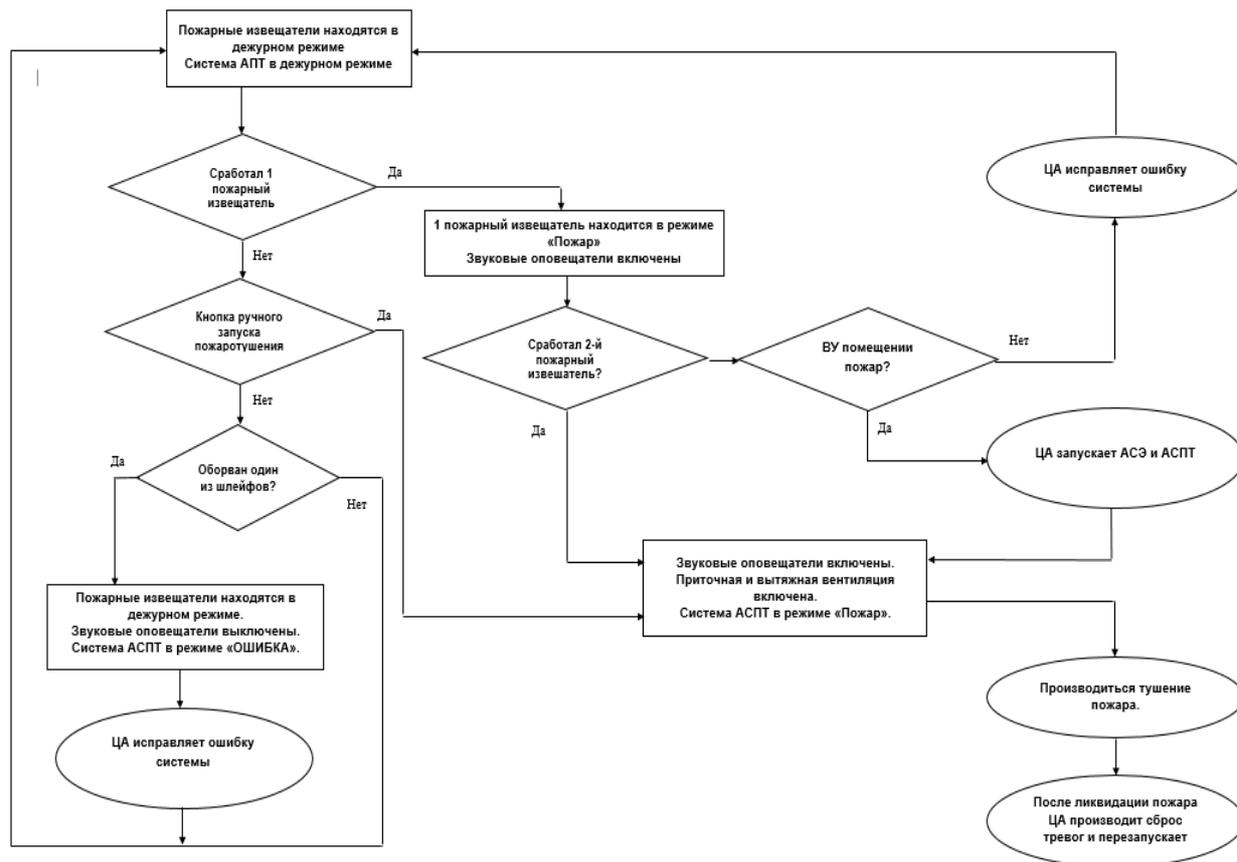


Fig. 1. Algorithm of automatic fire extinguishing system operation at an industrial facility

Table 1  
Assignment of values to the states of the digital automata model of the automatic fire-fighting system

State of the machine	Status deciphering
$a_0$	Fire detectors are in standby mode. APT system in standby mode
$a_1$	1 fire detector is in Fire mode. The sounders are on
$a_2$	The fire detectors are in standby mode. The sounders are switched off. The ASFT system is in ERROR mode
$a_3$	CA corrects an error with the system
$a_4$	The sounders are switched on. Supply and exhaust ventilation is switched on. The ASPT system is in Fire mode
$a_5$	The fire is extinguished
$a_6$	After fire suppression, the CA resets the alarms and restarts the ASFT
$a_7$	CA launches ASE and ASPT
$a_8$	CA corrects system error
$a_9$	1 fire detector was triggered
$a_{10}$	Button for manual start of fire extinguishing is pressed
$a_{11}$	One of the loops is broken
$a_{12}$	The 2nd fire detector is triggered
$a_{13}$	There is a fire in the premises

Table 2

Coding of the states of the digital automata model  
of the automatic firefighting system

State of the machine	Binary code			
	$Q_4$	$Q_3$	$Q_2$	$Q_1$
$a_0$	0	0	0	0
$a_1$	0	0	0	1
$a_2$	0	0	1	0
$a_3$	0	0	1	1
$a_4$	0	1	0	0
$a_5$	0	1	0	1
$a_6$	0	1	1	0
$a_7$	0	1	1	1
$a_8$	1	0	0	0
$a_9$	1	0	0	1
$a_{10}$	1	0	1	0
$a_{11}$	1	0	1	1
$a_{12}$	1	1	0	0
$a_{13}$	1	1	0	1

Table 3

Table of D-trigger transitions of the digital automatic  
firefighting system model

Go to	D
0 → 0	0
0 → 1	1
1 → 0	0
1 → 1	1

Read the graph as follows: the automaton is in the initial state  $a_0$ , then under the signal from the fire detector it changes its state to  $a_1$ , with this transition the output signals must be formed  $y_1, y_5, y_6$ . This is followed by a transition  $a_2$  to the state with the formation of output signals  $y_1, y_3, y_6$ . From the state  $a_2$  to  $a_3$ , then to  $a_4$ . From the state  $a_4$  the transition to the state  $a_5$ , or  $a_8$  [5] is possible. The  $a_5$  automaton enters the state if the external condition (fire is detected)  $x_3$  is 1 ( $\overline{x_3}$ ) with issuing of  $y_1, y_3, y_4$  control signals, and the automaton  $a_8$  enters the state if the same signal is 0 ( $\overline{x_3}$ ), etc.

After constructing the graph, fill in the table of functions of the vertices of the graph. Using this table you can write functions for any number of variables (Fig. 2). After that it is necessary to analyze it carefully in order to simplify (minimize) it, because the tabular method does not give an opportunity to obtain in perfect disjunctive normal form (DNF) for outputs the minimal disjunctive normal form (MDNF) or the minimal conjunctive normal form (MCNF) [6]. In this case it will be enough to apply the gluing law to some expressions [7, 8].

On the transition column of the digital automaton of the automated integrated firefighting system let's fill in the table 4. Example for the first line: The initial state, which is coded as "0000", changes to the state with the code "0001". This transition is unconditional. We see that  $Q_4 = 0$ ,  $Q_3 = 0$ ,  $Q_2 = 0$ ,  $Q_1 = 0$ , and in the new state  $Q_4 = 0$ ,  $Q_3 = 0$ ,  $Q_2 = 0$ ,  $Q_1 = 1$  [6]. According to the table of D-trigger transitions  $Q_4 = 0$ ,  $Q_3 = 0$ ,  $Q_2 = 0$ ,  $Q_1 = 1$ , to get  $D_1$ , it is necessary to supply 1 to the input in the column

$D_2, D_3, D_4$  “Trigger Control Signals”, and to supply 0 to the others, at this transition the signals are formed  $y_1, y_5, y_6$ . All the following lines are completed in the same way.

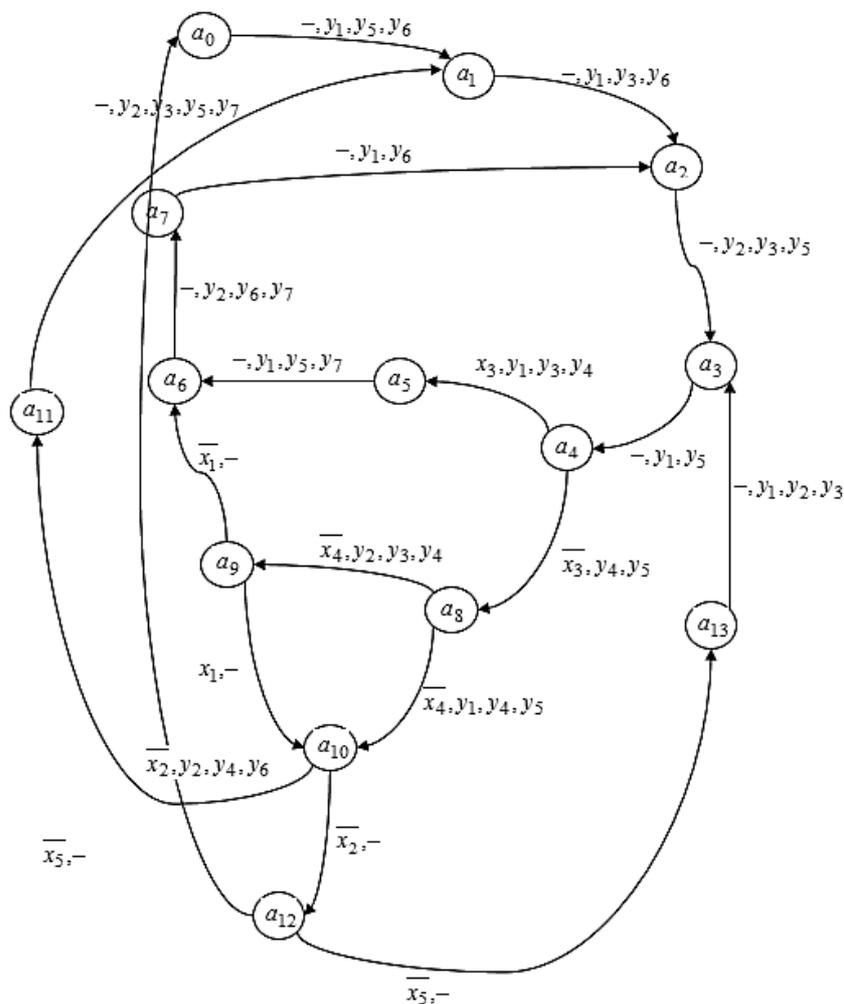


Fig. 2. Transition graph of the digital automaton of the automated integrated firefighting system

According to the table of functioning of the digital automata graph of AISPT we make analytical expressions in the SDNF for output signals  $y_1, y_2, y_3$ , and also signals of control of triggers  $D_4, D_3, D_2, D_1$ . The perfect disjunctive normal form of the function is a disjunction of elementary conjunctions [7, 15].

The output signal  $y_1$  will be generated if the automaton is in state  $a_0$ , or in  $a_1$ , or in  $a_3$ , or in  $a_5$ , or in  $a_7$ , or in  $a_{13}$ , and the sign  $a_4 x_3 = 1$ , or in state  $a_8$  and the sign  $x_4 = 0$ . Similarly the functions for other output signals and trigger control signals are written [10, 13].

Functioning of the graph of the digital automaton ASPT

Table 4

$y_1 = a_0 \vee a_1 \vee a_3 \vee a_4 x_3 \vee a_5 \vee a_7 \vee a_8 x_4 \vee a_{13}$	(1)
$y_2 = a_2 \vee a_6 \vee a_8 x_4 \vee a_{10} x_2 \vee a_{11} \vee a_{13}$	(2)
$y_3 = a_1 \vee a_2 \vee a_4 x_3 \vee a_8 x_4 \vee a_{11} \vee a_{13}$	(3)
$y_4 = a_4 x_3 \vee a_4 x_3 \vee a_8 x_4 \vee a_8 x_4 \vee a_{10} x_2 = a_4 \vee a_8 \vee a_{10} x_2$	(4)
$y_5 = a_0 \vee a_2 \vee a_3 \vee a_4 x_3 \vee a_5 \vee a_8 x_4 \vee a_{11}$	(5)

$y_6 = a_0 \vee a_1 \vee a_6 \vee a_7 \vee a_{10}x_2$	(6)
$y_7 = a_5 \vee a_6 \vee a_{11}$	(7)
$D_1 = a_0 \vee a_2 \vee a_4x_3 \vee a_6 \vee a_8x_4 \vee a_{10}x_2 \vee a_{11} \vee a_{12}x_5 \vee a_{13}$	(8)
$D_2 = a_1 \vee a_2 \vee a_5 \vee a_6 \vee a_7 \vee a_8x_4 \vee a_9x_1 \vee a_9x_1 \vee a_{10}x_2 \vee a_{13} =$ $= a_1 \vee a_2 \vee a_5 \vee a_6 \vee a_7 \vee a_8x_4 \vee a_9 \vee a_{10}x_2 \vee a_{13}$	(9)
$D_3 = a_3 \vee a_4x_3 \vee a_5 \vee a_6 \vee a_9x_1 \vee a_{10}x_2 \vee a_{10}x_2 \vee a_{12}x_5 =$ $= a_3 \vee a_4x_3 \vee a_5 \vee a_6 \vee a_9x_1 \vee a_{10} \vee a_{12}x_5$	(10)
$D_4 = a_4x_3 \vee a_8x_4 \vee a_8x_4 \vee a_9x_1 \vee a_{10}x_2 \vee a_{10}x_2 \vee a_{12}x_5 =$ $= a_4x_3 \vee a_8 \vee a_9x_1 \vee a_{10} \vee a_{12}x_5$	(11)

Formulas (4), (9), (10), and (11) have been simplified using the gluing law. Using the laws of double negation and de Morgan formulas, the initial expressions from the basis of AND, OR, NOT are converted to the basis of AND, NOT.

$y_1 = a_0 \wedge a_1 \wedge a_3 \wedge a_4x_3 \wedge a_5 \wedge a_7 \wedge a_8x_4 \wedge a_{13}$	(12)
$y_2 = a_2 \wedge a_6 \wedge a_8x_4 \wedge a_{10}x_2 \wedge a_{11} \wedge a_{13}$	(13)

Convert all other formulas by analogy. With the help of the Logic Converter from the MultiSIM simulator program we will minimize the logic functions, which determine each of the control signals of the KS 1 triggers according to Table 4. The results of the minimization of the logic functions are shown in the figures (Figs. 3–15) [9].

$$J1 = \overline{Q_1}Q_2Q_3;$$

$$K1 = \overline{Q_2}Q_3Q_4 + Q_2\overline{Q_3}Q_4;$$

$$J2 = \overline{Q_1}Q_3 + \overline{Q_1}Q_3\overline{Q_4};$$

$$K2 = \overline{Q_1}Q_3 + Q_1\overline{Q_3}Q_4;$$

$$J3 = \overline{Q_1} + \overline{Q_2};$$

$$K3 = \overline{Q_1} + \overline{Q_2};$$

$$J4 = Q_1Q_2\overline{Q_3}Q_4;$$

$$K4 = Q_1\overline{Q_2}Q_3.$$

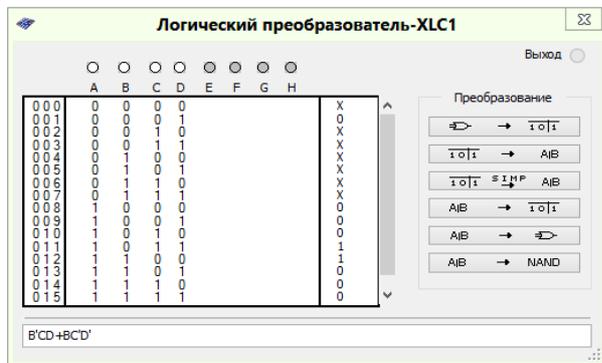


Fig. 3. Minimization of the logic function to control trigger signals K1

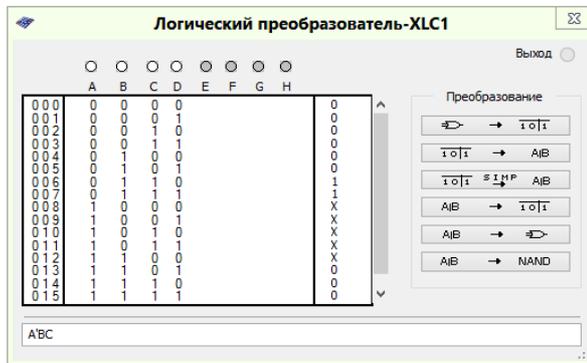


Fig. 4. Minimization of the logic function to control the trigger signals J1

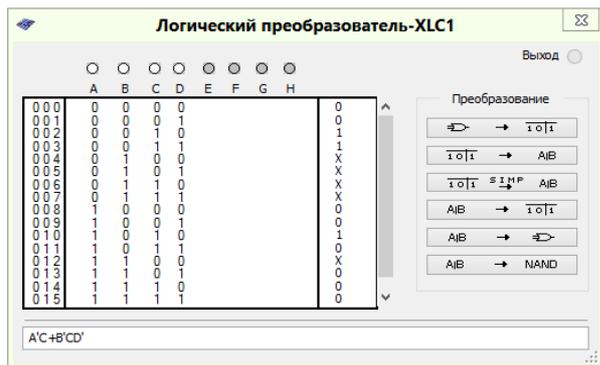


Fig. 5. Minimization of the logic function to control J2 trigger signals

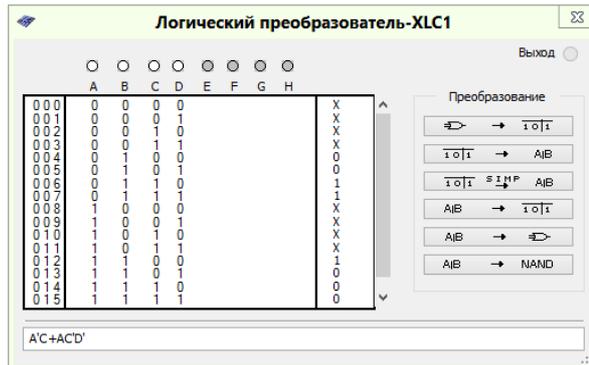


Fig. 6. Minimization of the logic function to control trigger signals K2

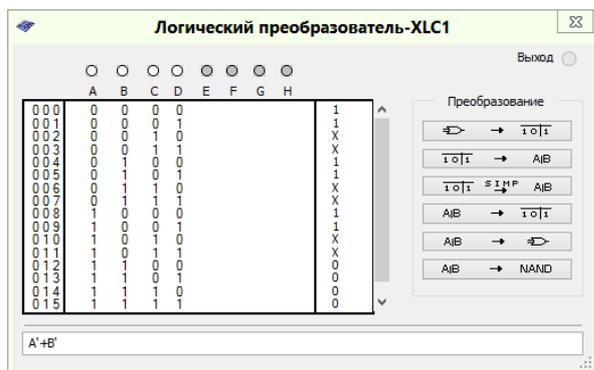


Fig. 7. Minimization of the logic function to control J3 trigger signals

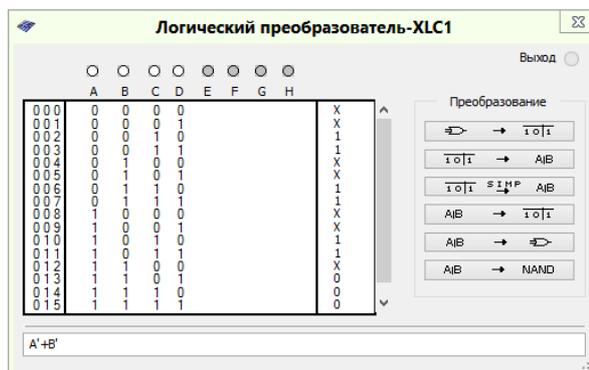


Fig. 8. Minimization of the logic function for the control of trigger signals K3

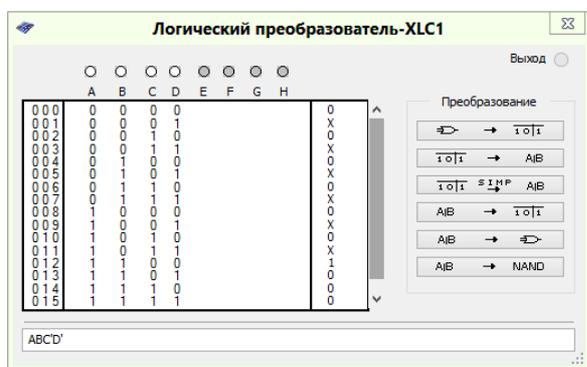


Fig. 9. Minimization of the logic function to control the trigger signals J4

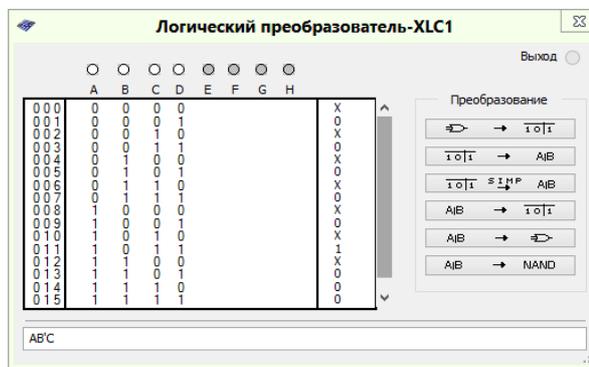


Fig. 10. Minimization of the logical function for the control with the K4 trigger signals

Now let's minimize the logical functions of KS 2, using also Logic Converter from the MultiSIM simulator. The result of minimization of logical functions (Figs. 11–15).

$$\begin{aligned}
 Y1 &= \overline{Q_1} \overline{Q_2} \overline{Q_3} \overline{Q_4} + Q_1 \overline{Q_2} \overline{Q_3} \overline{Q_4}; \\
 Y2 &= \overline{Q_1} \overline{Q_2} \overline{Q_3} \overline{Q_4} + Q_1 \overline{Q_2} \overline{Q_4} + Q_1 \overline{Q_3} \overline{Q_4}; \\
 Y3 &= \overline{Q_1} \overline{Q_2} \overline{Q_4} + Q_1 \overline{Q_3} \overline{Q_4}; \\
 Y4 &= \overline{Q_1} \overline{Q_2} \overline{Q_3} \overline{Q_4} + \overline{Q_1} \overline{Q_2} \overline{Q_4} + Q_1 \overline{Q_2} \overline{Q_3} \overline{Q_4} + Q_2 \overline{Q_3} \overline{Q_4}; \\
 Y5 &= \overline{Q_1} \overline{Q_3} \overline{Q_4} + Q_2 \overline{Q_3} \overline{Q_4} + Q_1 \overline{Q_2} \overline{Q_3} \overline{Q_4} + Q_1 \overline{Q_2} \overline{Q_3} \overline{Q_4}.
 \end{aligned}$$

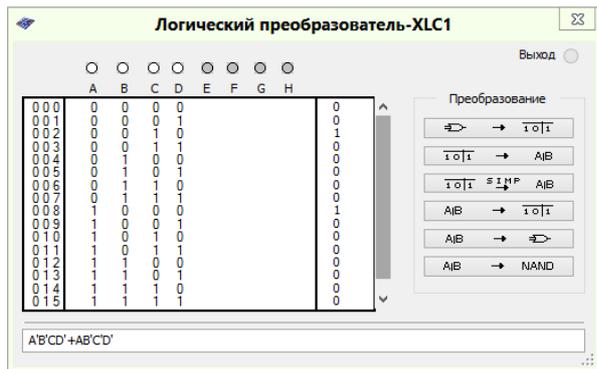


Fig. 11. Minimization of the logic function to control the signals of trigger Y1

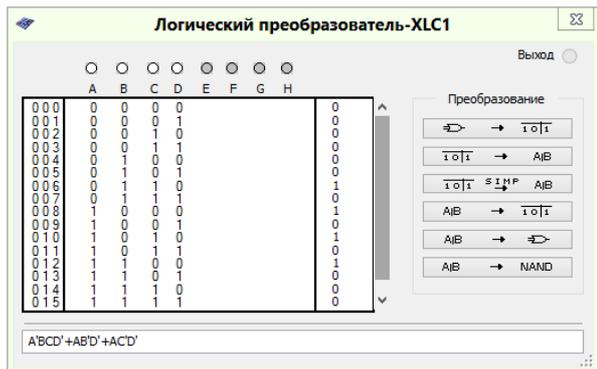


Fig. 12. Minimization of the logic function for the Y2 trigger signal control

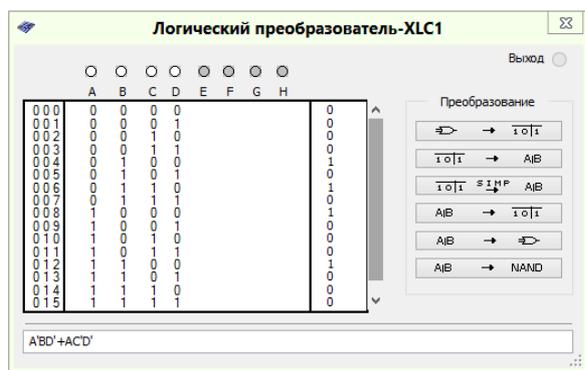


Fig. 13. Minimization of the logic function for the Y3 trigger signal control

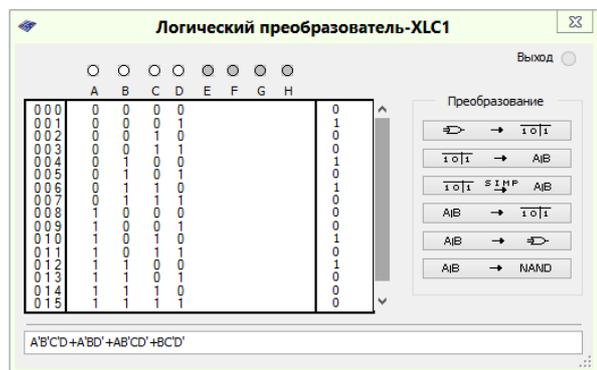


Fig. 14. Minimization of the logic function to control the signals of trigger Y4

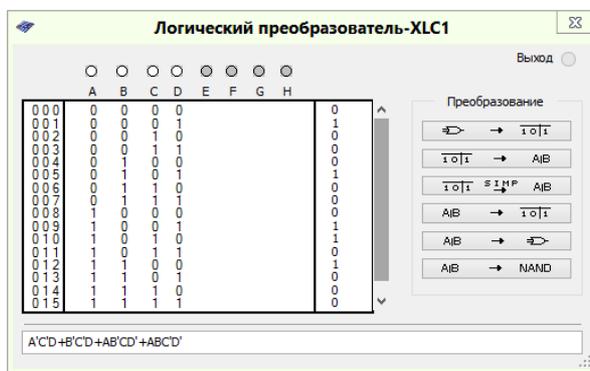


Fig. 15. Minimization of the logic function to control the trigger signals Y5

**Conclusion**

Minimized logic functions for KS 1 and KS 2 will be used in the construction of the model of digital automata of automated integrated fire protection system.

To simplify the CA scheme the minimized logic functions for KS 1 and KS 2 are analyzed and the same logic functions are defined. On the basis of the functional diagram of CA its circuit diagram on the selected series of digital integrated circuits is built.

**References**

1. Topolsky N.G. [Problems and principles of creating integrated security and life support systems]. Proceedings of the Fourth International Conference “Informatization of security systems” – ISB-95. Moscow, VIPTSH MVD RF, 1995, pp. 14–17. (in Russ.)

2. Pupkov K.A., Egupov N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of Classical and Modern Automatic Control Theory]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2004.
3. *Protiv pozhara. Entsiklopediya bezopasnosti* [Against Fire. Encyclopedia of Security]. Available at: <http://protivpozhara.ru/tipologija/teoriya/pozhary-i-vzryvy-na-vzryvopozharoopasnyx-obektax>.
4. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control]. St. Petersburg, VCB-Peterburg, 2007.
5. Little I.D.C. Models and Managers. The Concept of a Decision Calculus. *Management Science*, 1970, vol. 16, no. 8.
6. Larichev O.I., Petrovsky A.V. [Decision Support Systems. The modern state and prospects for their development]. *Progress of science and engineering. Ser. of Technical Cybernetics*. Moscow, VINITI, 1987, vol. 21, pp. 131–164. (in Russ.)
7. Edwards J.S. Expert Systems in Management and Administration – Are they different from Decision Support Systems? *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 61, pp. 114–121.
8. Topolsky N.G., Tarakanov D.V. [Modeling the dynamics of fire monitoring parameters in the building based on cellular automata]. *Security Systems – 2016: Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2016, pp. 585–588. (in Russ.)
9. Shalyto A. A. [Automated programming]. *Computer science and information technology: theses of reports of the International scientific conference in memory of Professor A. M. Bogomolov*. Saratov, Saratov State University, 2007. (in Russ.)
10. Martinov G.M., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A. Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017, 16–19 May 2017*, pp. 1–4.
11. Martinova L.I., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A. The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application. *Automation and remote control*, 2015, vol. 76, no. 1, pp. 179–186.
12. Martinov G.M., Nezhmetdinov R.A., Kuliev A.U. Approach to implementing hardware-independent automatic control systems of lathes and lathe-milling CNC machines. *Russian Aeronautics*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 293–296.
13. Mori Masahiko, Fujishima Makoto, Yohei Oda. 5 axis mill turn and hybrid machining for advanced application. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1 (1), pp. 22–27. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.004
14. Patent EP 0690426 (A2), G09B 19/00. Système d'entraînement à l'emploi de l'ordinateur, 03.01.1996.
15. Patent EP 1111966 A, G08B 5/00. Signaling Device, 27.06.2001.

*Received 17 December 2020*

---

УДК 519.713

DOI: 10.14529/ctcr210105

## ПРОВЕДЕНИЕ СИНТЕЗА ЦИФРОВОГО АВТОМАТА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

**К.М. Волкова**

*Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Россия*

Повышение уровня систем противопожарной защиты НПЗ остается одной из важнейших составных частей обеспечения защиты населения от угроз техногенного характера. Скорость развития инноваций позволяет применить искусственный интеллект при создании автоматизированных систем пожарной безопасности. **Цель исследования.** Данное исследование на-

правлено на построение модели автоматизированной интегрированной системы управления противопожарной защитой (АИСУПЗ). **Материалы и методы.** Для решения задач исследования использованы методы построения графов, задание графов алгоритмом работы автоматизированной интегрированной системы противопожарной защиты. Данная система является новым подходом к решению вопроса безопасности промышленных объектов нефтеперерабатывающей отрасли. **Результаты.** Предложенная новая модель программной реализации цифрового автомата в автоматизированной интегрированной системе обнаружения и мониторинга пожара нефтеперерабатывающего предприятия дала возможность создать банк расчетных и аналитических данных по всем потенциально возможным видам разрушения конструкции установок с целью подготовки персонала и внесения изменений в действующие руководящие документы и инструкции по действиям персонала в конкретной ситуации. **Заключение.** Разработанная технология дает возможность обработки поступающего сигнала, содержащегося на циклограммах, в промежуточную форму для синтеза цифровых автоматов при помощи инновационных инструментальных средств.

*Ключевые слова:* автомат Мили, цифровой автомат, граф, вершина графа, минимизация логической функции.

### Литература

1. Топольский, Н.Г. Проблемы и принципы создания интегрированных систем безопасности и жизнеобеспечения / Н.Г. Топольский // *Материалы четвертой международной конференции «Информатизация систем безопасности» – ИСБ-95.* – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1995. – С. 14–17.
2. Пупков, К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления / К.А. Пупков, Н.Д. Егунов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
3. Против пожара. Энциклопедия безопасности. – <http://protivpozhara.ru/tipologija/teorija/pozhary-i-vzryvy-na-vzryvopozharoopasnykh-obektax>.
4. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – СПб.: ВХБ-Петербург, 2007.
5. Little, I.D.C. *Models and Managers. The Concept of a Decision Calculus* / I.D.C. Little // *Management Science.* – 1970. – Vol. 16, no. 8.
6. Ларичев, О.И. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы их развития / О.И. Ларичев, А.В. Петровский // *Итоги науки и техники. Сер. Техническая кибернетика.* – М.: ВИНТИ, 1987. – Т. 21. – С. 131–164.
7. Edwards, J.S. *Expert Systems in Management and Administration – Are they different from Decision Support Systems?* / J.S. Edwards // *European Journal of Operational Research.* – 1992. – Vol. 61. – P. 114–121.
8. Топольский, Н.Г. Моделирование динамики параметров мониторинга пожара в здании на основе клеточных автоматов / Н.Г. Топольский, Д.В. Тараканов // *Системы безопасности – 2016: материалы 25-й Междунар. науч.-техн. конф.* – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 585–588.
9. Шалыто, А.А. Автоматное программирование / А.А. Шалыто // *Компьютерные науки и информационные технологии: тез. докл. Междунар. науч. конф. памяти проф. А.М. Богомолова.* – Саратов: Саратовский государственный университет, 2007.
10. Martinov, G.M. *Implementation of Control for Peripheral Machine Equipment Based on the External Soft PLC Integrated with CNC* / G.M. Martinov, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov // *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017, 16–19 May 2017.* – P. 1–4.
11. Martinova, L.I. *The Russian multi-functional CNC system AxiOMA control: Practical aspects of application* / L.I. Martinova, N.V. Kozak, R.A. Nezhmetdinov // *Automation and remote control.* – 2015. – Vol. 76, no. 1. – P. 179–186.
12. Martinov, G.M. *Approach to implementing hardware-independent automatic control systems of lathes and lathe-milling CNC machines* / G.M. Martinov, R.A. Nezhmetdinov, A.U. Kuliev // *Russian Aeronautics.* – 2016. – Vol. 59, no. 2. – P. 293–296.
13. Mori, Masahiko. *5 axis mill turn and hybrid machining for advanced application* / Masahiko Mori, Makoto Fujishima, Oda Yohei // *Procedia CIRP.* – 2012. – Vol. 1 (1). – P. 22–27. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.004

## Управление в технических системах

---

14. Patent EP 0690426 (A2), G09B 19/00. *Système d'entraînement à l'emploi de l'ordinateur*, 03.01.1996.

15. Patent EP 1111966 A, G08B 5/00. *Signaling Device*, 27.06.2001.

**Волкова Ксения Михайловна**, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва; ksenifire@bk.ru.

*Поступила в редакцию 17 декабря 2020 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Volkova, K.M. Conducting a Synthesis of a Digital Automaton for an Automated Firefighting System / K.M. Volkova // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 49–58. DOI: 10.14529/ctcr210105

### FOR CITATION

Volkova K.M. Conducting a Synthesis of a Digital Automaton for an Automated Firefighting System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 49–58. DOI: 10.14529/ctcr210105

---

## NEURAL NETWORK MODEL FOR PREDICTING PASSENGER CONGESTION TO OPTIMIZE TRAFFIC MANAGEMENT FOR URBAN PUBLIC TRANSPORT

*S. Faridai, fls.farida@mail.ru,  
R.S. Juraeva, juraeva.rukhshona@list.ru,  
S.N. Darovskikh, darovskikhsn@susu.ru,  
Sh.Sh. Qodirov, asp18kss327@susu.ru  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

The development of public transport in cities is an effective way to reduce “congestion” in the road network and, as a result, increase the speed of passenger transportation. Improving the quality of urban bus services helps attract more passengers. Bus intervals are calculated once for each route line individually, based on the average congestion of passengers at the stops. In turn, the sudden accumulation of a large number of passengers at bus stops causes that not all passengers can move in a timely manner, which causes concern for passengers. This is one of the factors that reduces the quality of passenger transport services. **The aim of the study** is to develop a model for predicting the congestion of passengers at bus stops to optimize traffic management of urban public transport. **Materials and methods.** This article presents a neural network model for predicting passenger congestion at bus stops. It takes into account the spatio-temporal characteristics of bus traffic. **Results.** The developed model for predicting passenger congestion at bus stops was tested on real data from bus route 3 (Dushanbe, Tajikistan). The model made it possible to predict passenger traffic (the number of passengers at bus stops) with an accuracy of 72% to 74.5% of the actual number of passengers at bus stops. **Conclusion.** The proposed method, in contrast to other methods, allows you to automatically adapt the forecasting model to the changing conditions of the route line. This method is universal and can be used for other route lines (bus stops). It does not require much time to reconfigure.

*Keywords: prediction, bus arrival time, public passenger transport, neural networks, urban route network.*

### Introduction

Urban passenger transport plays a significant role in the economy of any country, region or city, since it is the route transport that is the main way of moving passengers, where there is a high demand for passenger traffic.

Passenger traffic is the movement of passengers ordered by the transport network, quantitatively expressed in the volume of passengers transported by any type of public (ground, underground, air, etc.) or individual transport per unit of time (hour, day, month or year).

In connection with an increase in the level of motorization and an increase in the mobility of the population against the background of insufficient development of the road network of cities, the problem of optimizing passenger traffic is very acute, aimed at reducing the time or money associated with the formation of an unforeseen accumulation of passengers at stopping stations at different periods of time. , which often becomes a causal decrease in the speed of movement. A sharp decrease in traffic speeds, hours of traffic jams, obstruction of pedestrian traffic, environmental pollution, and traffic noise, finally, an increase in the number of road accidents are the main negative consequences of motorization.

Urban passenger traffic is studied on the basis of passenger traffic, which, as a rule, is highly irregular in seasons, days of the week, hours of the day and directions. The unevenness of the days of the week is characterized by peaks of passenger trips in certain directions on weekdays, rest days, holidays and

pre-holidays. The unevenness of the hours of the day is characterized by a sharp increase in the number of passengers during peak hours preceding the start and end of work, as well as at the start and end of the work of entertainment enterprises [1].

In order to maximally satisfy the demand of passenger traffic for travel by bus, it is necessary to develop dynamic route schedules for the movement of buses. But this will require a mathematical model of the passenger traffic of the route line, which, according to the forecast data, builds up various bus traffic.

Chinese scientists (Rui Xue, Daniel Sun and Shukai Chen) [2] have developed a model for the short-term prediction of passenger traffic on the basis of the time series of historical data. The authors propose an interactive multiple model (IMM) filtering algorithm for combining forecasts of time series models to develop a hybrid method for short-term forecasting of passenger traffic (weekly, daily, and 15-minute time series). The IMM algorithm is suitable for predicting traffic conditions in real time. However, in the course of the study, based on this algorithm, it was not possible to build accurate models for taking into account seasonal fluctuations, which led to serious lag in forecasts, and the approach based on the IMM algorithm was not extended to much shorter-term forecasts (for example, 3 minutes and 5 minutes) [3–6].

For short-term forecasting of passenger traffic, a model was developed based on the use of neural networks (CNN) [7–9]. When using this model, the video recording from the video surveillance camera of the bus interior was used as input information. However, the use of a video surveillance camera recording of a bus interior is not always possible and requires coordination with the city services responsible for the safety of the city's population.

Within the framework of the Smart Nation project, Singaporean scientists are working to create a model for predicting passenger traffic (crowds at stopping stations) based on GPS data from citizens' mobile phones [10]. But this approach is unacceptable in most countries of the world, since the law on privacy does not allow the use of confidential data (coordinates of movement) of citizens.

Classic models for forecasting passenger traffic are outdated and are not able to take into account the flexibility of the rapidly changing rate of passenger traffic at different stopping stations and times. Modern smart models, while still evolving, do much better than classic models and look promising. The purpose of this work is to develop a neural network model for predicting the accumulation of passengers at stopping points and a description of the results of its testing to optimize urban public transport traffic control. Implementation of the developed model on the example of public transport in Dushanbe allows you to optimize the dynamic schedule of buses on a given route.

### 1. Materials and method

In the city of Dushanbe, since 2017, a non-cash payment system has been implemented in public transport. The system works like all known cashless payment systems, except that the entrance to the bus is provided only from the front door, and the exit from the middle and rear doors. A validator is installed at the entrance, which is very convenient for passengers to immediately pay for their fare at the entrance. Validator reads as a special travel card, so with the application installed on the phone (QR-code for your phone screen) (Fig. 1).

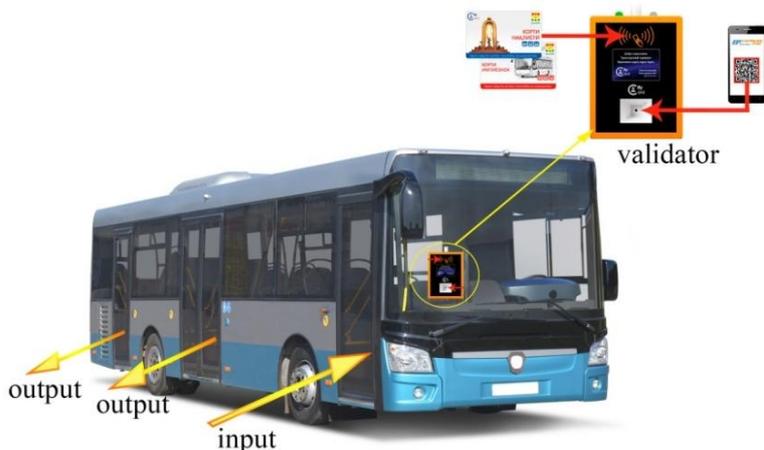


Fig. 1. Cashless payment systems fare collection in public transport of Dushanbe

This work is implemented on the example of the movement of public transport (buses) of route line No. 3A (running along the line Vokzal – Marom and Marom – Vokzal). The names of the stopping stations with indication of the conditional numbering are given in Table 1. The conventional designation of the numbering of the stopping stations is made for simplicity.

**Table 1**  
The names of the stopping stations with indication  
of the conditional numbering

Bus route line №3A	GJD Vokzal	TC "Sadbarg"	Kinoteatr Vatan	Natcionalnij Bank	TV Safina	ТСРКЮ im. Rudaki	TC Tajikistan	Choihonai Rohat	Gostinica Avesta	Ped. Universitet	Med. Universitet	Poselo Severnij	Agrarnij Universitet	Ploshad Pogranichnikov	Obanbor	Parki Ajini	Zavidi RC-Cola	Tajik Cement	Tcement Zavod	Terminali Marom
Number of bus station by route Vokzal-Marom	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Number of bus station by route Marom-Vokzal	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1



**Fig. 2.** Map of movement of route line No. 3A, indicating  
the conditional numbering of stopping stations

Buses in route line No. 3A begin to move intensively from 05:00 to 23:06 from the stop station “Railway Station” to “Terminal – Marom” and back. The traffic map of route line No. 3A is shown in Fig. 2. The length of this route is 11.1 km. The number of vehicles on this route, in accordance with demand, is 24 units.

Table 2 shows a heat map of the number of passengers depending on the time of day for route line No. 3A (according to the reports of validators [24] installed on the bus interior).

In the work under consideration, daily reports from validators are used as a data set. The reports show the time of the transaction (payment) and the unique identification number of the passenger. Based on these data, we prepared a sample consisting of features such as X1 – at the time of arrival (landing) of the bus, X2 – the number of passengers landed from each stop, X3 – departure time of the previous bus, X4 – date (in unit days in a year) and X(5–11) – days and weeks (in binarized form [11]).

Since the route line under consideration (No. 3A) has 20 stopping stations, therefore, we have a sample for each stopping station. Table 3 shows a fragment of the data sample.

Table 2

Heat map number of passengers depending on the time of day

Validator	Time																						
	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00				
71	2	20	51	24	27	17	24	35	12	39	26	0	53	38	1	0	0	0	0				
103	1	16	15	13	12	22	10	11	10	0	0	1	32	60	0	0	0	0	0				
156	15	32	55	38	66	58	27	32	44	34	22	35	47	41	35	36	0	0	0				
287	9	19	36	48	59	27	36	35	53	24	0	47	42	38	21	0	0	0	0				
312	0	39	30	61	28	30	37	27	38	46	39	0	40	25	0	0	0	0	0				
320	15	8	69	22	37	46	31	38	31	13	28	0	33	110	1	0	0	0	0				
327	21	32	41	22	52	51	59	48	37	48	0	55	40	0	0	0	0	0	0				
363	0	19	70	49	66	50	73	22	10	56	10	8	56	63	62	4	0	0	0				
558	1	57	34	34	33	9	26	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	45	247				
587	6	3	33	27	29	19	36	24	21	38	2	42	26	0	0	0	0	0	0				
590	1	16	36	27	36	33	23	34	24	9	31	13	25	3	0	0	0	0	0				
680	0	32	15	51	11	24	29	32	35	13	39	21	45	27	39	99	1	0	0				
686	4	14	22	44	24	14	35	12	31	6	44	40	13	28	39	9	99	0	0				

Table 3

Fragment of the data sample

Bus arrival time, in minutes	Number of passengers seated, PCs.	Departure time of the previous bus, in minutes	Date (in the day of the year)	Day of week						
				Mon. [0/1]	Tues. [0/1]	Wed. [0/1]	Thurs. [0/1]	Fri. [0/1]	Sat. [0/1]	Sun. [0/1]
X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
450	17	443	221	0	1	0	0	0	0	0
460	13	452	221	0	1	0	0	0	0	0
470	15	461	221	0	1	0	0	0	0	0
483	19	472	221	0	1	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1190	8	1181	225	0	0	0	0	0	1	0

Scaling the values of the elements of the dataset. Neural works poorly with the values of data items that have different ranges. For example, in our case, the bus time can be changed from 300 minutes to 1440 minutes. Such heterogeneity of data can complicate the learning process. It is customary to apply normalization to such heterogeneous data [11]. Normalization – is a broad category of methods that seek to make the similarity of different samples more visible to machine learning models, which helps the model isolate and generalize new data. The most common form of classification is suitable for this task: for each feature in the input data (a column in the input data matrix), the average for this feature  $\bar{X}_i$  subtracted from each value of the data element  $\bar{X}$ , and the difference is divided by the standard deviation  $\sigma$ , as a result of the feature it is centered by zero and has a standard deviation of one.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}; \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (X_i - \bar{X})^2}; \tag{2}$$

$$X_{norm_i} = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma}. \tag{3}$$

In fact, this normalization assumes that the data correspond to a normal distribution law (or Gauss law), centering and bringing this distribution to a unit variance. Dividing the dataset into training, validation and test mini datasets. Model evaluation always comes down to dividing the available data into

three sets: training, validation, and test. The model will be trained on training data and evaluated on validation data. After completing training, the model will be tested using test data. This approach allows you to get the most accurate assessment of the generality of the model [11–13, 15–23].

## 2. Artificial neural networks

Modeling using neural networks refers to machine learning methods, but compared to other algorithms, it has a large number of settings, which allows you to approximate nonlinear functions as accurately as possible. The neuron functioning diagram is shown in Fig. 3.

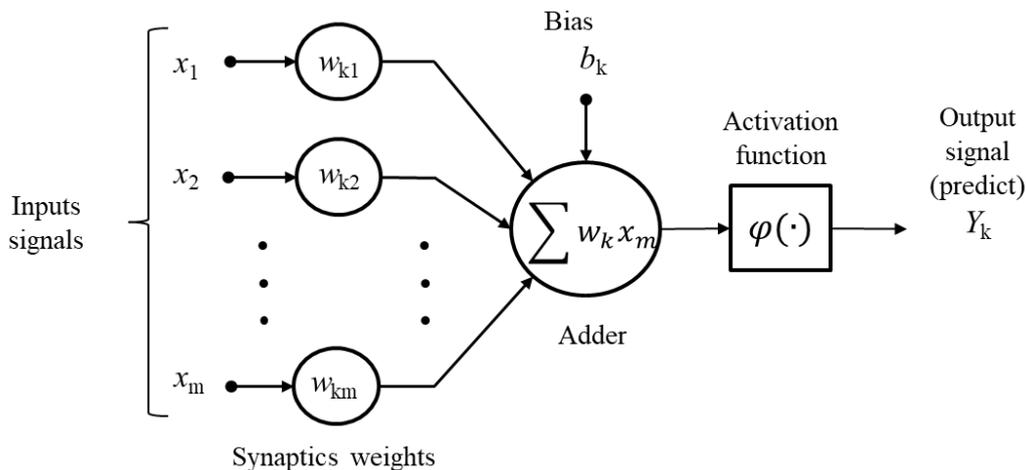


Fig. 3. Scheme of neuron functioning

In mathematical representation, the functioning (see Fig. 3) of neuron  $k$  can be described by the following pair of equations:

$$u_k = \sum_{m=1}^m w_{km} x_m; \quad (4)$$

$$Y_k = \varphi(u_k + b_k). \quad (5)$$

where  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – are input signals;  $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  – synaptic weights of neuron  $k$ ;  $u_k$  – linear combination of input actions;  $b_k$  – threshold;  $\varphi(\cdot)$  – activation function;  $Y_k$  – neuron output signal. Using a neural network, allows to approximate almost any function due to the optimal selection of synaptic weights [14].

### 2.1. Selecting and justifying the network architecture, as well as configuring network hyperparameters

The choice and justification of the network architecture is the first and important stage in the development of a neural network model. Depending on the type of information being processed (input data), several types of neural networks are distinguished (fully connected or multilayer networks, recurrent networks, convolutional networks, generative adversarial networks, etc.). Since tabular data are used in the problem being solved, we chose fully connected (multilayer) neural networks. Such networks are trained by supervised learning, with back propagation of the error [15–23].

### 2.2. Model 1

From the conditions of the problem, we have 20 stops on the route “Vokzal – Marom” and 20 stops on the route “Marom – Vokzal”. Based on the fact that we are not interested in final stops (there is no need to predict passenger traffic), therefore, we have 38 stopping points. Since our dataset for all stopping points has the same characteristics (elements), it is enough for us to build (justify and configure) one model and duplicate it for other stopping points, and, accordingly, additional training is provided on the dataset.

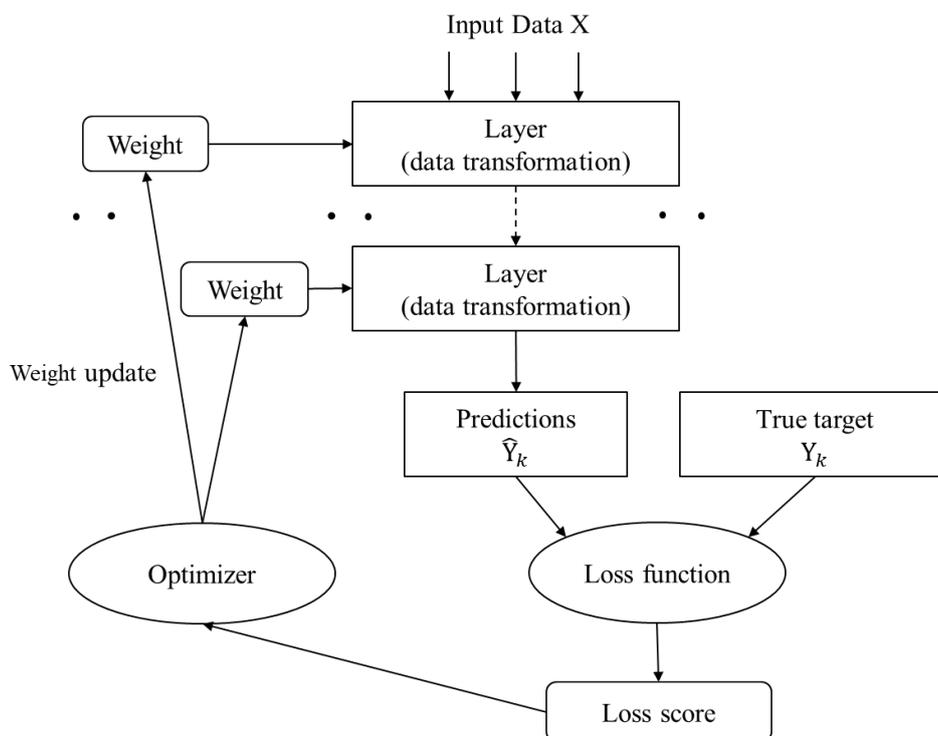
For the problem to be solved, there are 11 signals at the network input consisting of such elements (attributes) as  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{11}$  (see Table 3). Therefore, as the source network, a network consisting of two layers was originally constructed: a transformation layer consisting of 11 neurons, and an output

layer with one neuron. Accordingly, since we have the predicted value of the number of passengers at bus stops as the output signal (we are solving the regression problem), we chose the mean Square error (MSE) as the loss function, which is set by the expression:

$$L_{MSE_k} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}_k)^2, \quad (6)$$

where  $\bar{Y}_k$  – is the model predicted value of the target variable;  $Y_k$  desired value of the standard model [18–23]. The loss function – is an objective function that needs to be minimized in the course of training, so it is a measure of success for the problem we are solving.

Several types of optimizers were used as a network optimizer (Adagrad, Adadelta, Adam, Adamax, Adaline, SGD, Nadam, RMSprop). Experimental calculations have shown that the best network performance is achieved with the “Adam” optimizer that implements gradient descent with impulse. An optimizer is a mechanism by which the network will update the weights of neural connections based on the observed data and the loss function (Fig. 4) [12, 13].



**Fig. 4. Block-diagram of the network learning process**

To monitor the indicator of the quality of the developed network at the stages of training and testing, we chose (module) the Mean Absolute Error (MAE) – this is one of the convenient metrics of the quality of the models in regression problems, which is given by the expression:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Y_k - \bar{Y}_k|, \quad (7)$$

where  $\bar{Y}_k$  – is the target variable predicted by the model;  $Y_k$  – desired value of the target variable [21]. It is often used in regression problems and shows the amount of deviation of the predicted change from the true value.

Next, a series of experimental calculations was carried out [11], according to the results of which the best hyperparameters (the number of neurons of the first and second layers, the size of mini-packets and the number of learning epochs) of the network of our model were determined. The optimal parameters and settings of the network are shown in Table 4, and the finished network architecture is shown in Fig. 5.

Table 4

Neural networks configuration of model 1

Слои	Parameters of neural network	
	Number of inputs	
1	Number of neurons/activation function / Dropout	62/ - /0,3
2	Number of neurons/activation function/Dropout	18/ReLU/0,3
3	The number of neurons in the output layer	1
	Activation function of output layer	-
Loss (Gost) function:		MSE
Optimizer:		Adam
Accuracy:		MAE
Batch size:		32
Optimal number of epochs		125

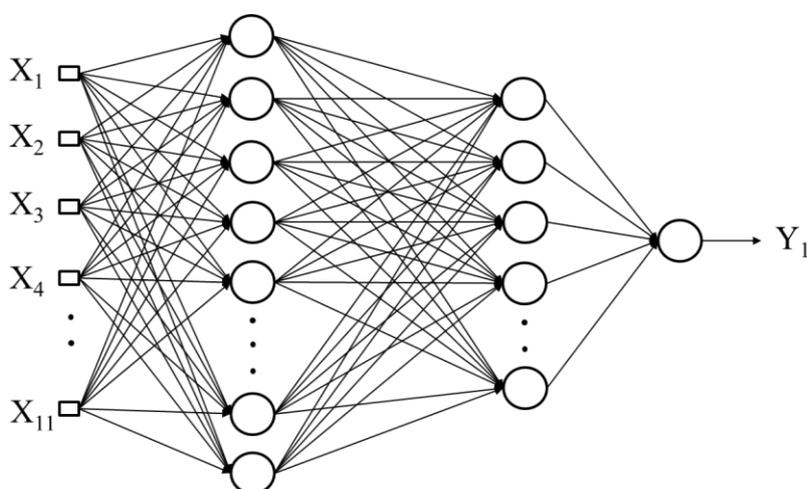


Fig. 5. Final (optimal) network architecture of the stop station model

In the process of performing experimental computations, in order to avoid retraining the network, several regularization methods were used in the development of model 1: early stopping of training, selection of mini-packets (batch-regularization) of training, and dropout regularization [12].

### 2.3. Transfer learning model 1

As noted above, for each stopping point, we copy the prepared model 1, and therefore we carry out the procedure for additional training of these models to the data sets of stopping points.

### 2.4. Estimating the accuracy of the models

After we trained our models (the number of which is 38), we conducted a test procedure on test data from each stop point. Despite the fact that our data sets were not large, our models predicted passenger traffic (the number of passengers at stopping points) with an accuracy of 72% to 74.5% of the actual number of passengers at stopping points. This suggests that it is necessary to use a larger amount of data (at least for several years) [19–22].

## 3. Recommendations

In order to improve the accuracy of the models for predicting passenger traffic at stopping points, it is necessary:

- retrain models on large data sets;
- use the method of sequential iteration between alternating adjacent models in order to extract hidden interrelated features between stopping points;
- use recurrent layers in models (RNN , LSTM).

### Conclusions

In this paper, a neural network model for predicting passenger congestion at bus stops has been developed and studied. Its distinctive feature is that it takes into account the spatial and temporal characteristics of passenger transport. It was tested on real data from bus route 3 (Dushanbe, Tajikistan). For the first time, temporary validator reports (transactions of travel Bank cards) were used as input data, which excludes unauthorized receipt of any information about passengers. The result of testing the developed neural network model made it possible to predict passenger traffic with an accuracy of 74.5% of the actual number of passengers at bus stops.

The approach considered in the article to solving the problem of optimizing the traffic management of urban public transport makes it possible to automatically adapt the developed forecasting model to the changing conditions of the route line (for example, starting duplicate route lines, changing the temporary operating modes of the city, etc.). This is its originality. The developed neural network model is universal and can be used for other route lines (bus stops). This does not require much time to reconfigure the developed neural network and train it.

### References

1. Turevsky I.S. *Avtomobil'nyye perevozki: ucheb. posobiye* [Automobile transportation: a tutorial]. Moscow: Forum, INFRA-M, 2016. 222 p.
2. Xue R., Sun D., Chen Sh. Short-Term Bus Passenger Demand Prediction Based on Time Series Model and Interactive Multiple Model Approach. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2015, article ID 682390, 11 p.
3. Blom H.A.P. An efficient filter for abruptly changing systems. *Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Decision and Control*, 1984, pp. 656–658.
4. Averbuch A., Itzikowitz S., Kapon T. Radar target tracking- viterbi versus IMM. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, vol. 27, no. 3, pp. 550–563.
5. Zhang Y., Liu Y. Traffic Forecasts Using Interacting Multiple Model Algorithm. *Chien B.C., Hong T.P., Chen S.M., Ali M. (eds.) Next-Generation Applied Intelligence. IEA/AIE 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5579. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 360–368 DOI: 10.1007/978-3-642-02568-6\_37
6. Ma Z., Xing J., Mesbah M., Ferreira L. Predicting shortterm bus passenger demand using a pattern hybrid approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2014, vol. 39, pp. 148–163.
7. Liu G., Yin Z.Z., Jia Y., Xie Y. Passenger flow estimation based on convolutional neural network in public transportation system. *Knowl.-Based Syst.*, 2017, vol. 123, pp. 102–115.
8. Gao C., Li P., Zhang Y., Liu J., Wang L. People counting based on head detection combining Adaboost and CNN in crowded surveillance environment. *Neurocomputing*, 2016, vol. 208, pp. 108–116.
9. Wang Z., Cai G., Zheng C., Fang C. Bus-crowdedness estimation by shallow convolutional neural network. *Proceedings of the International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP), Xi'an, China, 28–31 October 2018*, 20 p.
10. Hamblen M. The digital revolution at the cost of privacy. *Computerworld Russia Magazine*, # 04/2017, iss. 4-2017, pp. 26–27.
11. Qodirov Sh.Sh., Shestakov A.L. Development of Artificial Neural Network for Predicting Drill Pipe Sticking. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 20–32. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190302
12. Chollet F. *Deep Learning with Python: Manual*. Manning Publications, 2017. 386 p.
13. Gulli A., Pal S. *Deep Learning with Keras: Hand Book*. Birmingham – Mumbai, Packt, 2017. 310 p.
14. Haykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs* [Neural Networks: A Comprehensive Foundation]. Moscow, Williams Publ., 2006. 1104 p.
15. Raschka S. *Python Machine Learning*. Birmingham, Packt Publishing, 2015. 454 p.
16. Grus J. *Data Science from Scratch: First Principles with Python*. O'Reilly Media, 2015. 330 p.
17. Jojo M. *Learn Keras for Deep Neural Networks: Hand Book*. Canada, Apress, 2019. 192 p.
18. Ketkar N. *Deep Learning with Python: A Hands-on Introduction*. India, Apress, 2017. 162 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-2766-4

19. Wani M.A., Bhat F.A., Afzal S., Khan A.I. *Advances in Deep Learning*. Studies in Big Data book series (SBD, volume 57). Springer Singapore, 2020. 159 p. DOI: 10.1007 / 978-981-13-6794-6
20. McMahan B., Rao D. *Znakomstvo s PyTorch: glubokoye obucheniye pri obrabotke estestvennogo yazyka* [Introducing PyTorch: Deep Learning in Natural Language Processing]. St. Petersburg, Peter, 2020. 256 p.
21. Melin P. *Modular Neural Networks and Type-2 Fuzzy Systems for Pattern Recognition*. Studies in Computational Intelligence book series (SCI, volume 389). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 215 p. DOI: 10.1007 / 978-3-642-24139-0
22. Melin P., Castillo O., Kacprzyk J. *Design of Intelligent Systems Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Nature-Inspired Optimization*. Studies in Computational Intelligence, volume 601. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 612 p. DOI: 10.1007 / 978-3-319-17747-2\_14
23. Kyriakides G., Konstantinos G.M. *Hands-On Ensemble Learning with Python: Build highly optimized ensemble machine learning models using scikit-learn and Keras*. Birmingham – Mumbai, Packt Publishing, 2019. 298 p.
24. www.citycard.tj.

Received 11 November 2020

УДК 519.254

DOI: 10.14529/ctcr210106

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

С. Фаридау, Р.С. Джураева, С.Н. Даровских, Ш.Ш. Кодиров

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Развитие общественного транспорта в городах является эффективным способом уменьшения «заторов» в улично-дорожной сети и как следствие повышения скорости перевозок пассажиров. Повышение качества городских автобусных перевозок способствует привлечению большего числа пассажиров. Интервалы движения автобусов единожды рассчитываются для каждой маршрутной линии индивидуально, исходя из среднего показателя скопления пассажиров на остановочных пунктах. В свою очередь, внезапное скопление большого количества пассажиров на остановочных пунктах становится причиной того, что не все пассажиры могут своевременно передвигаться, что вызывает беспокойство у пассажиров. Это является одним из факторов снижения качества пассажирских транспортных услуг. **Целью исследования** является разработка модели прогнозирования скопления пассажиров на остановочных пунктах для оптимизации управления движением городского общественного транспорта. **Материалы и методы.** В настоящей статье представлена нейросетевая модель прогнозирования скопления пассажиров на остановочных пунктах. Она учитывает пространственно-временные характеристики движения автобусов. **Результаты.** Разработанная модель прогнозирования скопления пассажиров на остановочных пунктах апробирована на реальных данных автобусного маршрута № 3 (г. Душанбе, Таджикистан). Модель позволила спрогнозировать пассажиропоток (количество пассажиров на остановочных пунктах) с точностью от 72 до 74,5 % от реального числа пассажиров на остановочных пунктах. **Заключение.** Предлагаемый метод в отличие от других методов позволяет автоматически адаптировать модель прогнозирования под изменяющиеся условия маршрутной линии. Представленный метод универсальный и может применяться и для других маршрутных линий (остановочных пунктов). Он не требует больших временных затрат для перенастройки.

*Ключевые слова:* прогнозирование, время прибытия автобуса, общественный пассажирский транспорт, нейронные сети, городская маршрутная сеть.

### Литература

1. Туревский И.С. *Автомобильные перевозки: учеб. пособие.* – М.: Форум: ИИФРА-М, 2016. – 222 с.
2. Xue, R. *Short-Term Bus Passenger Demand Prediction Based on Time Series Model and Interactive Multiple Model Approach* / R. Xue, D. Sun, Sh. Chen // *Discrete Dynamics in Nature and Society.* – Vol. 2015, article ID 682390. – 1 p.
3. Blom, H.A.P. *An efficient filter for abruptly changing systems* / H.A.P. Blom // *Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Decision and Control.* – 1984. – P. 656–658.
4. Averbuch, A. *Radar target tracking- viterbi versus IMM* / A. Averbuch, S. Itzikowitz, T. Kapon // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* – 1991. – Vol. 27, no. 3. – P. 550–563.
5. Zhang, Y. *Traffic Forecasts Using Interacting Multiple Model Algorithm* / Y. Zhang, Y. Liu // *Next-Generation Applied Intelligence. IEA/AIE 2009. Lecture Notes in Computer Science, vol. 5579* / B.C. Chien, T.P. Hong, S.M. Chen, M. Ali (eds.). – Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. – P. 360–368. DOI: 10.1007/978-3-642-02568-6\_37
6. *Predicting shortterm bus passenger demand using a pattern hybrid approach* / Z. Ma, J. Xing, M. Mesbah, L. Ferreira // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* – 2014. – Vol. 39. – P. 148–163.
7. *Passenger flow estimation based on convolutional neural network in public transportation system* / G. Liu, Z.Z. Yin, Y. Jia, Y. Xie // *Knowl.-Based Syst.* – 2017. – Vol. 123. – P. 102–115.
8. *People counting based on head detection combining Adaboost and CNN in crowded surveillance environment* / C. Gao, P. Li, Y. Zhang et al. // *Neurocomputing.* – 2016. – Vol. 208. – P. 108–116.
9. *Bus-crowdedness estimation by shallow convolutional neural network* / Z. Wang, G. Cai, C. Zheng, C. Fang // *Proceedings of the International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP), Xi'an, China, 28–31 October 2018.* – 2018. – 20 p.
10. Хэмблен, М. *Цифровая революция за счет конфиденциальности* / М. Хэмблен // *Журнал Computerworld Russia.* – № 04/2017, вып. 4-2017. – С. 26–27.
11. Кодиров, Ш.Ш. *Разработка искусственной нейронной сети для прогнозирования прихватов колонн бурильных труб* / Ш.Ш. Кодиров, А.Л. Шестаков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 20–32. DOI: 10.14529/ctcr190302
12. Chollet F. *Deep Learning with Python: Manual* / F. Chollet. – Manning Publications, 2017. – 386 p.
13. Gulli, A. *Deep Learning with Keras: Hand Book* / A. Gulli, S. Pal. – Birmingham – Mumbai: Packt, 2017. – 310 p.
14. Хайкин, С. *Нейронные сети: полный курс: пер. с англ.* / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 p.
15. Raschka, S. *Python Machine Learning* / S. Raschka. – Birmingham: Packt Publishing, 2015. – 454 p.
16. Grus, J. *Data Science from Scratch: First Principles with Python* / J. Grus. – O'Reilly Media, 2015. – 330 p.
17. Jojo, M. *Learn Keras for Deep Neural Networks: Hand Book* / M. Jojo. – Canada: Apress, 2019. – 192 p.
18. Ketkar, N. *Deep Learning with Python: A Hands-on Introduction* / N. Ketkar. – India: Apress, 2017. – 162 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-2766-4
19. *Advances in Deep Learning* / M.A. Wani, F.A. Bhat, S. Afzal, A.I. Khan. – *Studies in Big Data book series (SBD, volume 57).* Springer Singapore, 2020. – 159 p. DOI: 10.1007/978-981-13-6794-6
20. Макмахан, Б. *Знакомство с PyTorch: глубокое обучение при обработке естественного языка* / Б. Макмахан, Д. Рао. – СПб.: Питер, 2020. – 256 с.
21. Melin, P. *Modular Neural Networks and Type-2 Fuzzy Systems for Pattern Recognition* / P. Melin. – *Studies in Computational Intelligence book series (SCI, volume 389).* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – 215 p. DOI: 10.1007/978-3-642-24139-0
22. Melin, P. *Design of Intelligent Systems Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Nature-Inspired Optimization* / P. Melin, O. Castillo, J. Kacprzyk. – *Studies in Computational Intelligence, vol. 601.* Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 612 p. DOI: 10.1007/978-3-319-17747-2\_14

23. Kyriakides, G. *Hands-On Ensemble Learning with Python: Build highly optimized ensemble machine learning models using scikit-learn and Keras* / G. Kyriakides, G.M. Konstantinos. – Birmingham – Mumbai: Packt Publishing, 2019. – 298 p.

24. [www.citycard.tj](http://www.citycard.tj).

**Фаридаи Содик**, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [fls.farida@mail.ru](mailto:fls.farida@mail.ru).

**Джураева Рухшона Султоновна**, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [juraeva.rukhshona@list.ru](mailto:juraeva.rukhshona@list.ru).

**Даровских Станислав Никифорович**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [darovskikhsn@susu.ru](mailto:darovskikhsn@susu.ru).

**Кодиров Шахбоз Шарифович**, аспирант, младший научный сотрудник НИИ технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [asp18kss327@susu.ru](mailto:asp18kss327@susu.ru).

*Поступила в редакцию 11 ноября 2020 г.*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Neural Network Model for Predicting Passenger Congestion to Optimize Traffic Management for Urban Public Transport / S. Faridai, R.S. Juraeva, S.N. Darovskikh, Sh.Sh. Qodirov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 59–69. DOI: 10.14529/ctcr210106

#### FOR CITATION

Faridai S., Juraeva R.S., Darovskikh S.N., Qodirov Sh.Sh. Neural Network Model for Predicting Passenger Congestion to Optimize Traffic Management for Urban Public Transport. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 59–69. DOI: 10.14529/ctcr210106

---

## WAVELET-CONVERSION IN ELECTROCARDIO SIGNAL PROCESSING

V.F. Telezhkin<sup>1</sup>, telezhkinvf@susu.ru,  
 B.B. Saidov<sup>1, 2</sup>, matem.1994@mail.ru, saidovb@susu.ru,  
 P.A. Ugarov<sup>1</sup>, Pavel@rts.susu.ac.ru,  
 A.N. Ragozin<sup>1</sup>, ragozinan@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

In the present work, processing of an electro cardio signal using a wavelet transform is considered. In electrocardiography, various digital signal-processing techniques are used to detect, extract, and analyze the various components of an electrocardiogram. Among them, the wavelet transform technique gives promising results in the analysis of the time-frequency characteristics of the electrocardiogram components. The urgency of solving the problem of improving the quality of life of people with the help of early diagnosis and timely treatment of various cardiac diseases is obvious. The process of automated analysis of a huge database of electrocardiographic data is especially important. Wavelet analysis can be successfully used to smooth and remove noise in the ECG signal. Electrocardiogram signal, cleaned from noise components, looks clearer, while its volume is from 10 to 5% of the original signal, which largely solves the problem of storing cardiac records. **Aim.** Development of an algorithm for threshold processing of wavelet coefficients and filtering of an electrocardiography signal. **Materials and methods.** Cardiograms were taken for analysis. Then they were digitized and entered into a computer for processing. A program was written in the MATLAB environment that implements continuous and discrete wavelet transform. **Results.** The work shows the result of filtering the ECG signal with the addition of noise with a signal-to-noise ratio of 35 and 45 dB using the decomposition levels  $N = 2$ ,  $N = 3$ ,  $N = 4$ . **Conclusion.** Based on the analysis of the data obtained, it can be concluded that the second level of decomposition is the most optimal for filtering the ECG signal. With an increase in the level of decomposition, the output ratio decreases, at the level  $N = 4$  the output signal-to-noise almost does not exceed the input one, therefore, the filtering becomes ineffective. The correlation coefficient to the fourth level is significantly reduced, which means a significant increase in the distortion introduced by the filtering algorithm.

*Keywords: electro cardio signal, wavelet transform, filtering algorithm, development of an algorithm.*

### Introduction

The increase in the number of diseases and deaths associated with functional disorders of the cardiovascular system is one of the most important problems of modern medicine. The urgency of solving the problem of improving the quality of life of people with the help of early diagnosis and timely treatment of various cardiac diseases is obvious. The process of automated analysis of a huge database of electrocardiographic data is especially important.

In recent years, a number of new noise reduction techniques have emerged. One of the first works in this area was devoted to cleaning the ECG signal from additive filter noise [1–9]. In the literature in the field of ECG research, a large number of noise reduction methods are currently described, for example, wavelet transform [10, 11], adaptive filter [12], fuzzy threshold [10], band rejection filter, nonlinear filter, Kalman filter [13] stationary wavelet transform [11] and Fourier transform. However, the approach based on the wavelet transform gives the most promising results [12].

Wavelet analysis can be successfully used to smooth and remove noise in the ECG signal. Electrocardiogram signal, stripped of noise components, looks clearer, while its volume is from 10 to 5% of the original signal, which to a large extent solves the problem of storing cardiac records.

The electrocardiogram signal, ECG, plays a critical role in the diagnosis of human heart disease. The primary processing of the ECG signal data and its subsequent study becomes much more efficient if the signal has no noise component, therefore, noise removal is a task of paramount importance [14].

When recording an ECG, the signal is inevitably more or less distorted by various noises. For example, network high-frequency interference of the electrical network (network noise), noise of electrocardiograph amplifiers, muscle tremor, low-frequency swimming of the isoline due to breathing. Fast discrete wavelet transform effectively removes the noise present in the digitized signal. The purpose of this work is to develop an algorithm for threshold processing of wavelet coefficients [1].

To implement the procedure for wavelet filtering of the CS, the method of threshold processing of coefficients was chosen. In the course of the work, an algorithm for the wavelet filtering of the CS by the thresholding method was developed and implemented [15]. There is a wide choice of wavelet bases used for filtering signals by the thresholding method, the choice of the wavelet function and noise reduction parameters, such as the type of threshold, the level of decomposition, etc., plays a decisive role in the method's operation. To implement the algorithm and conduct modeling, software was written in the language programming MATLAB.

### 1. Noises arising from registration of ECG signals

When recording an ECG, the signal is inevitably more or less distorted by various noises. The high-frequency components of the cardiac signal are considered to be noise. To smooth the cardiogram, high-frequency components are usually removed using various filters. It is clear that some of the information recorded by the cardiograph is lost. The origin of the high frequencies of the cardiac signal is not fully understood. The network high-frequency interference of the electrical network (network noise), due to the inclusion of a large number of electrical appliances in the electrical network, and the electronic noise of the electrocardiograph amplifiers have some influence. The frequency of this interference is 50 or 60 Hz [11].

It is assumed that physiological high-frequency noises are to a large extent a consequence of the electrical activity of the heart, since they are recorded by sensors located near the heart. Also, the noise causes the baseline to float, the baseline drift is a low-frequency interference with a frequency of less than 1 Hz, due to the influence of respiration and high skin resistance. The volatility of the isoline affects the accuracy of measuring the amplitude parameters of the electrocardiosignal, since it is from it that the count is taken. Traffic disturbances appear as single or cyclical bursts. The frequency of such interference is in the range from 1 to 40 Hz. They arise as a result of a change in the position of the patient or the electrode, hiccups, coughing, etc. In modern technical equipment with appropriate grounding, the hardware noise is practically insignificant in comparison with physiological noise. Effective separation of high-frequency noise components is possible using wavelet transform of the signal [3].

### 2. Noisy signal model

Wavelet analysis is effectively used to remove noise in a signal. Let's consider the simplest model, where the noisy signal looks like:

$$S'(t) = S(t) + \sigma n(t), \quad (1)$$

where  $S(t)$  – useful signal;  $\sigma$  – noise level;  $n(t)$  – gaussian white noise.

Gaussian white noise is a stationary random sequence that is absolutely uncorrelated, with a mathematical expectation of zero and a variance of one. The signal  $n(t)$  is called white noise, because it has a constant spectrum at all frequencies, by analogy with white light, which has a uniform continuous spectrum in the visible part [13].

The essence of noise removal, in other words, signal filtering, consists in suppressing the noise part  $n(t)$  of the signal and restoring the useful signal  $S(t)$ . In this paper, a threshold filtering algorithm with one-parameter threshold functions is used.

### 3. Threshold processing of wavelet coefficients

Wavelet transform of signals is one of the types of spectral analysis, the most famous representative of which is the Fourier transform. The English word wavelet (from the French “ondelette”) literally translates as “short wave”. In various translations of foreign articles, there are also terms such as: “burst”, “burst function”, “low-wave function” and others [1–4].

Continuous wavelet transform is carried out according to the formula:

$$W(x, s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \left( \frac{t-x}{s} \right) f(t) dt, \quad (2)$$

where  $t$  is the time axis;  $x$  is the time instant;  $s$  is the parameter inverse to the frequency (scale);  $\psi^*$  means the complex conjugate;  $f(t)$  is the signal under study;  $W(x, s)$  is the result of the wavelet transform for 2 values  $x$  and  $s$ ;  $\psi$  is the wavelet function. Expression [7] is used for discrete transformation.

$$d_{j,k} = \int \psi_{j,k}(x) f(x) dx, \quad (3)$$

where  $d$  is the coefficient for the scale  $j$  ( $j = 0, 1, \dots, -n$ ) and point  $k$ . Scaled and offset versions of the parent wavelet:  $\psi_{j,k} = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - k)$ .

The result of the Wavelet transform of the signal is the decomposition of the signal into approximating coefficients  $A_{mk}$ , which represent the smoothed signal, and detailing coefficients  $D_{mk}$ , which describe the oscillations.

It is known that the noise component is more reflected in the detailing coefficients  $D_{mk}$ . Therefore, for noise removal, usually only detail coefficients are processed.

The second assumption is that the noise component is a signal that is less in magnitude than the main one. Therefore, the simplest way to remove noise is to zero the coefficient values that are less than a certain threshold value [2].

This procedure is called coefficient thresholding and, ideally, allows you to get rid of the coefficients due only to the noise component and preserve the decomposition coefficients of the main signal. In foreign literature, the threshold processing of coefficients is called thresholding.

There are such thresholding methods as hard thresholding and soft thresholding. With strict thresholding, all coefficients exceeding a certain threshold value  $\tau$  are considered to belong to the original signal, and the smaller ones are referred to as noise and are zeroed out. With soft thresholding, the modulus coefficients smaller than  $\tau$  vanish, the remaining coefficients decrease in modulus by the value of  $\tau$ .

The value of the threshold value  $\tau$  plays the role of a control parameter that affects the filtering error. The choice of the threshold value determines the quality of the signal noise reduction, estimated as the signal-to-noise ratio.

With an underestimated value of  $\tau$ , some of the noise expansion coefficients do not vanish, which leads to poor filtering, the signal-to-noise ratio increases only by an insignificant amount. When the threshold  $\tau$  is overestimated, some of the informative coefficients vanish, the filtered signal is distorted [5].

Searching for the optimal value of  $\tau$  means finding such a threshold that, with the smallest change in the reconstructed signal, provides the highest value of the signal-to-noise ratio [3].

The quality of signal noise reduction and, consequently, the degree of increase in the signal-to-noise ratio depends not only on the type of the thresholding function, but also on the method of its application. Distinguish:

- general thresholding, carried out using a fixed value of the threshold  $\tau$  – a value that is the same for all levels of decomposition and signal detail coefficients;
- multilevel thresholding, carried out using the threshold  $\tau$ , the values of which vary from level to level;
- local thresholding, implying the use of the threshold  $\tau$ , variable not only in terms of the level of decomposition, but also depending on the position of the detail coefficients at a given level.

#### 4. Development of an algorithm for threshold processing of wavelet coefficients

Based on the generalized wavelet filtering algorithm, we will compose a wavelet filtering algorithm using the thresholding method of coefficients:

1) Decomposition (Direct wavelet transform):

- a) Choosing a wavelet function;
- b) Choice of the decomposition level  $N$ ;
- c) Calculation of the wavelet decomposition of the original signal to the level  $N$ ;

2) Thresholding of detail coefficients:

- a) Choice of thresholding method (hard / soft);
- b) For each level from 1 to  $N$ , a threshold is selected and soft (and in the case of images, hard) thresholding of the detail coefficients is applied;

3) Reconstruction. An inverse wavelet transform is performed based on the original  $N$  level approximating coefficients and the filtered detail level coefficients from 1 to  $N$ .

The block diagram of the wavelet filtering algorithm using the coefficient thresholding method is shown in Fig. 1.

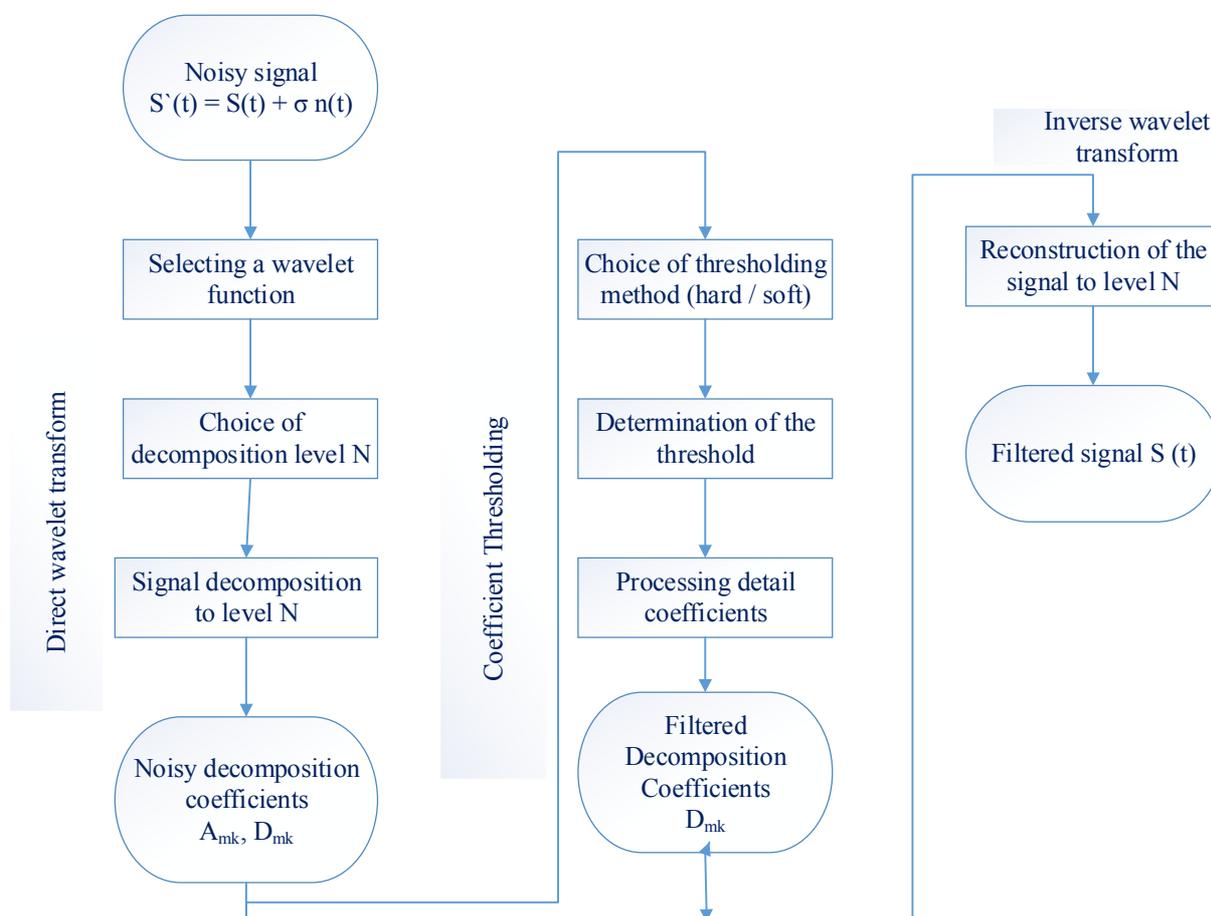


Fig. 1. Wavelet filtering algorithm by thresholding wavelet coefficients

To assess the efficiency of the algorithm and identify the optimal set of filtering parameters, the output signal-to-noise ratio will be used as a measure. The calculation of the correlation coefficient between the original and cleaned signal will also be carried out. The result of calculations will be displayed in text form for  $m$  variants of signal-to-noise mixtures  $S1', S2', \dots, Sm'$ .

For the filtered signal obtained at the output, the signal-to-noise ratio will be determined:

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{A_f}{A_n}, \quad (4)$$

where  $A_f$  is the average amplitude of the filtered signal;  $A_n$  is the average amplitude of the noise present in the signal after filtering.

The noise component of the filtered signal is determined from the following relationship:

$$n(i) = S(i) - S_f(i), \quad i = \overline{1, L}, \quad (5)$$

where  $n(i)$  is the sample of the noise component;  $S(i)$  – reading of the initial ECS without an additive component;  $S_f(i)$  is the count of the filtered signal;  $L$  is the signal length.

Correlation is understood as the relationship of some quantities represented by data – vectors or matrices. The generally accepted measure of linear correlation is the correlation coefficient. Its closeness to unity indicates a high degree of linear dependence. The degree of signal coupling is expressed in normalized units of the correlation coefficient, i.e. in the cosine of the angle between the vectors of the signals, and, accordingly, will take values from 1 (complete coincidence of signals) to  $-1$  (complete opposite).

The calculation of the cross-correlation coefficient between the original  $S$  and the cleaned  $S_f$  signals of length  $L$  will be performed according to the formula:

$$R_{S S_f} = \frac{\sum (S - \bar{S})(S_f - \bar{S}_f)}{\sqrt{\sum (S - \bar{S})^2 \sum (S_f - \bar{S}_f)^2}}, \quad (6)$$

where  $S$  is the initial ECG signal;  $S_f$  – filtered signal;  $\bar{S} = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L S_t$ ,  $\bar{S}_f = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L S_{ft}$  – the mean of the samples for  $S$  and  $S_f$ , respectively.

Let us determine the optimal level of decomposition  $N$ , to which it is advisable to carry out the decomposition in subsequent studies.

We act on the initial ECG signal  $S$  with white Gaussian noise  $\sigma$  with a given signal-to-noise ratio.

Table 1 shows the results of comparing the decomposition levels  $N = 2$ ,  $N = 3$ ,  $N = 4$  for the Simlet 4 wavelet. The type of the threshold function is soft, using an adaptive method for choosing the threshold value.

**Table 1**  
Results of comparing the levels of decomposition  $N = 2$ ,  $N = 3$ ,  $N = 4$

Input signal-to-noise ratio, dB	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$
	Output signal-to-noise ratio, dB		
30	35.721	33.819	30.655
35	39.697	34.862	30.878
40	43.270	35.182	30.959
45	45.271	35.336	30.984
	Correlation coefficient, %		
30	91.3	84.5	63.1
35	96.5	87.9	65.2
40	98.3	88.7	66
45	99	89.1	66.2

Figs. 2–4 show the result of filtering the ECG signal with added noise with a signal-to-noise ratio of 35 dB using the decomposition levels  $N = 2$ ,  $N = 3$ ,  $N = 4$ .

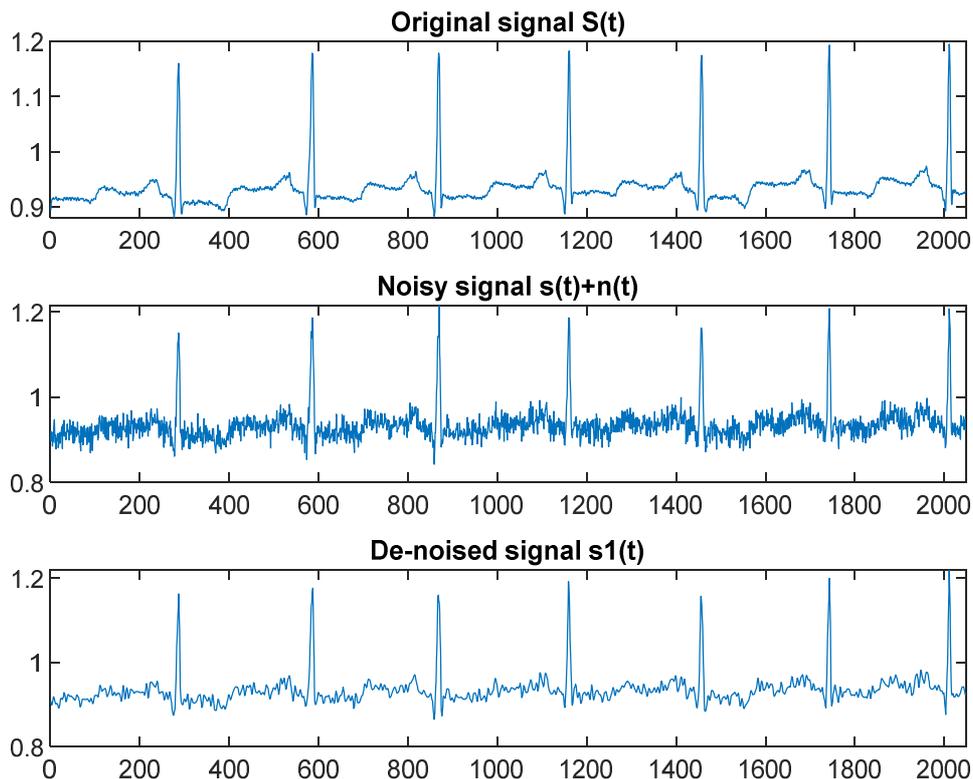


Fig. 2. The result of filtering the ECG signal with the addition of 35 dB noise  $N = 2$

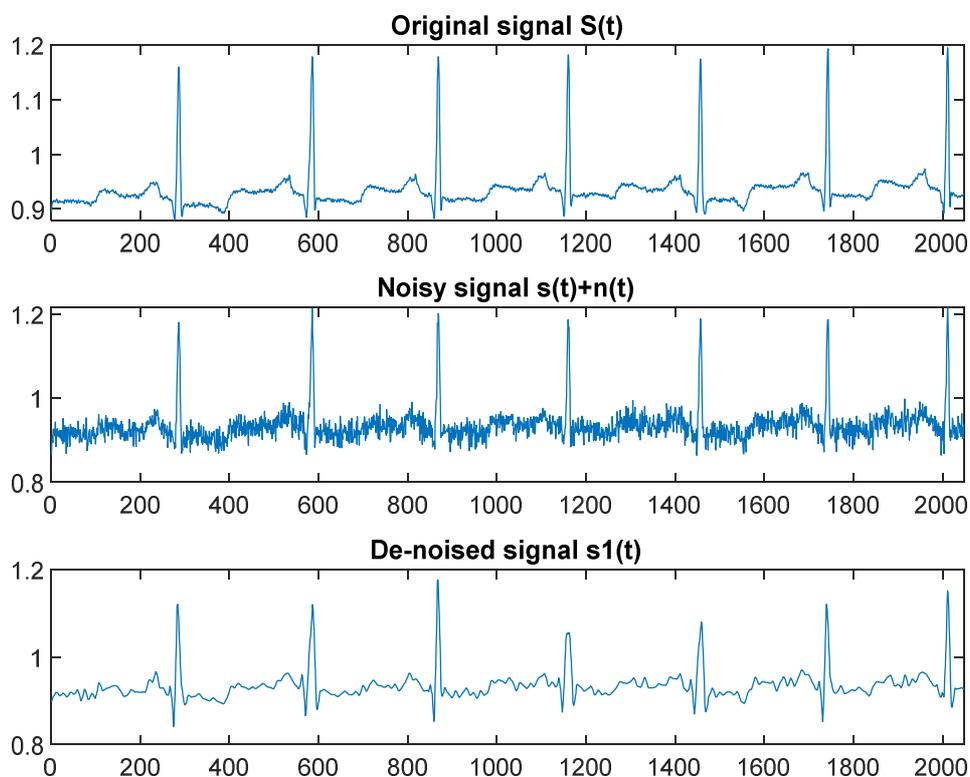


Fig. 3. The result of filtering the ECG signal with the addition of 35 dB noise  $N = 3$

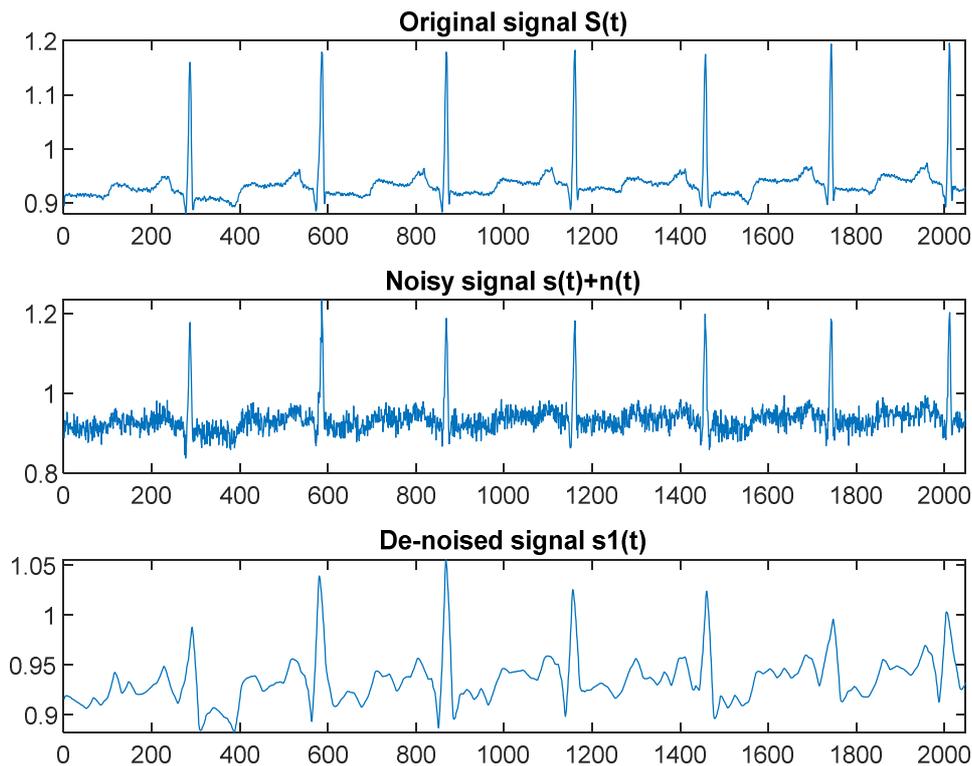


Fig. 4. The result of filtering the ECG signal with the addition of 35 dB noise  $N = 4$

Figs. 5–7 show the result of filtering an ECG signal with added noise with a signal-to-noise ratio of 45 dB using decomposition levels  $N = 2$ ,  $N = 3$ ,  $N = 4$ .

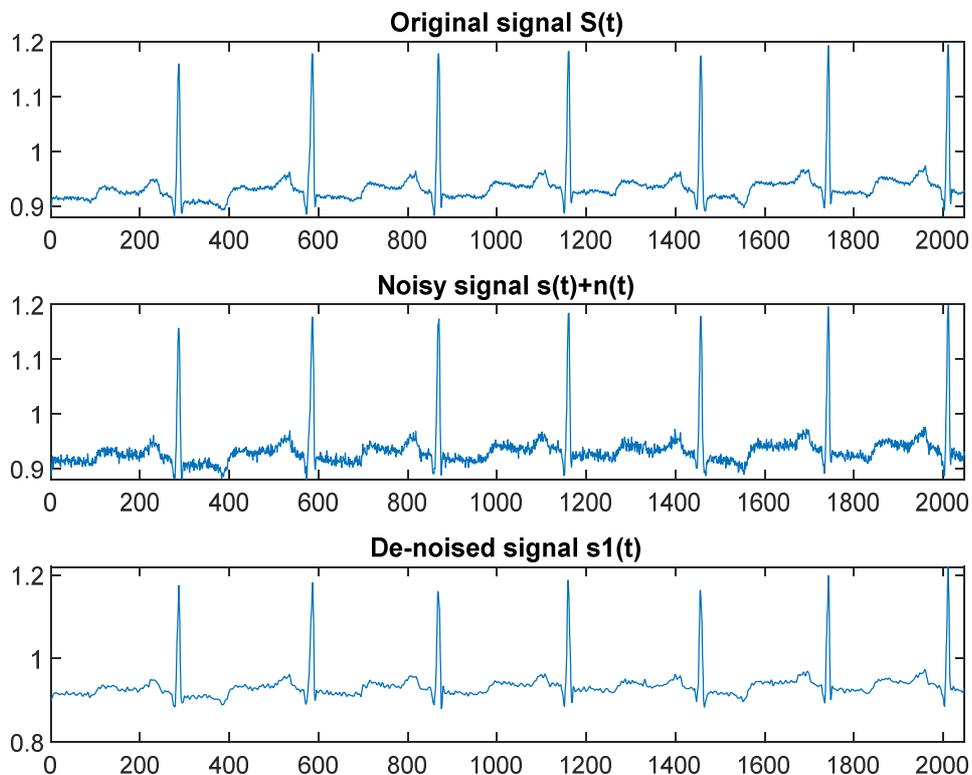


Fig. 5. The result of filtering the ECG signal with the addition of noise 45 dB  $N = 2$

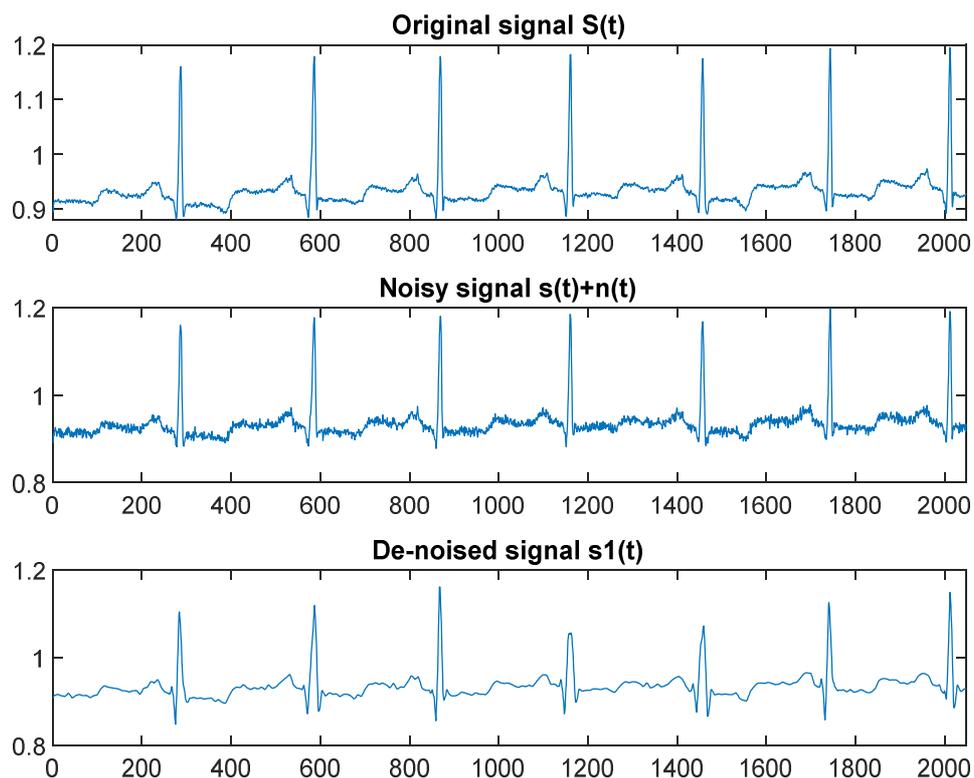


Fig. 6. The result of filtering the ECG signal with the addition of noise 45 dB  $N = 3$

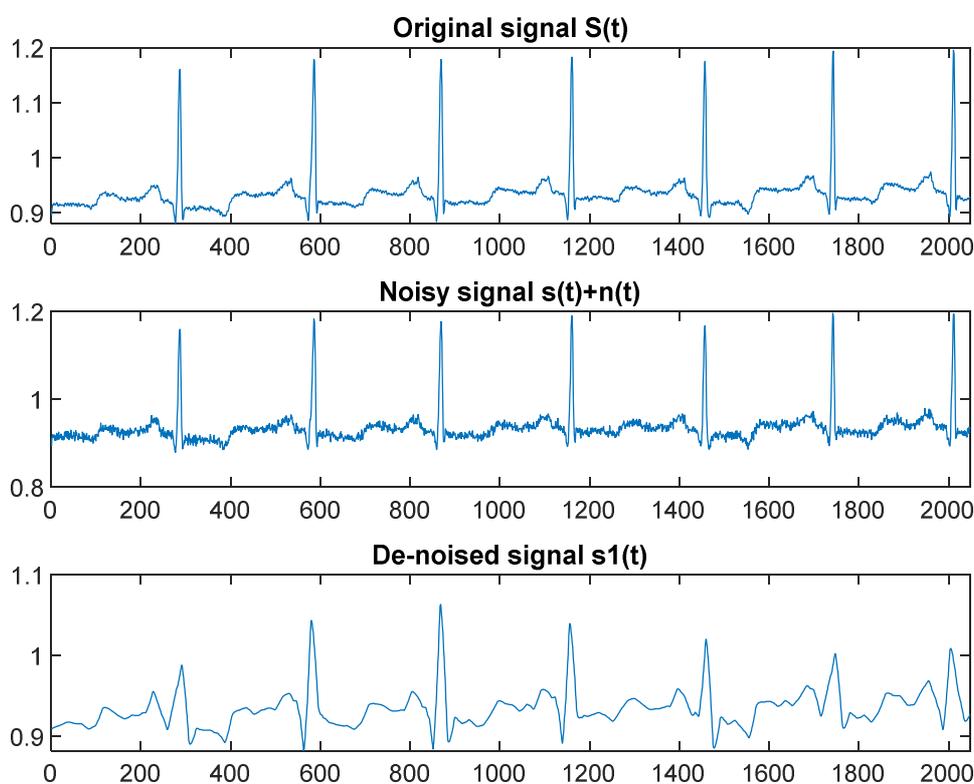


Fig. 7. The result of filtering the ECG signal with the addition of noise 45 dB  $N = 4$

### Conclusion

Based on the analysis of the data obtained, it can be concluded that the second level of decomposition is the most optimal for filtering the ECG signal.

With an increase in the level of decomposition, the output ratio decreases, at the level  $N = 4$  the output signal-to-noise almost does not exceed the input one, therefore, the filtering becomes ineffective.

The correlation coefficient to the fourth level is significantly reduced, which means a significant increase in the distortion introduced by the filtering algorithm.

The analysis of the graphs shown in Figs. 2–7 also confirms the conclusion about the optimality of the level  $N = 2$ .

Anastasia Denisovna Chupina, a student of the KE-658 group, took part in the process of experimental research.

### References

1. Lokenath D., Jean-Pierre A. *Wavelet Transforms and Their Applications*, 1998, pp. 685–713.
2. Parul G. Image processing using MATLAB. *National Conference on Advance Computing and Communication Technology (NCACCT-2010)*. ABES Engineering College, Ghaziabad, India, 2010, pp. 1–6.
3. Richard H., Guillaume B., Linda R.P. *WAVOS: a MATLAB toolkit for wavelet analysis and visualization of oscillatory systems*, 2012, pp. 2–8.
4. Darshana M., Asim B. Discrete wavelet transform using MATLAB. *International journal of computer engineering & technology (IJCET)*, 2013, vol. 4, pp. 252–259.
5. Burhan E. Signal and Image Denoising Using Wavelet Transform. *Advances in Wavelet Theory and Their Applications in Engineering, Physics and Technology*, 2012, pp. 495–514.
6. Chouakri S.A., Bereksi-Reguig F., Ahmaidi S., Fokapu O. Wavelet denoising of the electrocardiogram signal based on the corrupted noise estimation. *Computers in Cardiology*, Lyon, 2005, pp. 1021–1024.
7. Singh B.N., Tiwari A.K. Optimal Selection of Wavelet Basis Function Applied to ECG Signal Denoising. *Digital Signal Processing*, 2006, vol. 16 (3), pp. 275–287.
8. Sayadi O., Shamsollahi M.B. ECG denoising and compression using a modified extended Kalman filter structure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2008, vol. 55 (9), pp. 2240–2248.
9. Sameni, R., et al. Filtering noisy ECG signals using the extended Kalman filter based on a modified dynamic ECG model. in *Computers in Cardiology*, 2005.
10. Chouakri S.A., Bereksi-Reguig F., Ahmaidi S., Fokapu O. Wavelet Denoising of the Electrocardiogram Signal Based on the Corrupted Noise Estimation. *Computers in Cardiology*, 2005, pp. 1021–1024.
11. Ying-Wen B., Wen-Yang C., Chien-Yu C., Yi-Ting Lee, Yi-Ching T., Cheng-Hung T. Adjustable 60Hz noise reduction by a notch filter for ECG signals. *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No. 04CH37510)*, Como, 2004, vol. 3, pp. 1706–1711.
12. Sameni R. et al. A nonlinear Bayesian filtering framework for ECG denoising. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2007, vol. 54, pp. 2172–2185.
13. Alfaouri, M. and K. Daqrouq, ECG signal denoising by wavelet transform thresholding. *American Journal of applied sciences*, 2008, vol. 5(3), p. 276.
14. Phinyomark A., Limsakul C., Phukpattaranont P. Optimal wavelet functions in wavelet denoising for multifunction myoelectric control. *Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*. ECTI, 2010, vol. 8, pp. 43–52.
15. Benazza-Benyahia A, Ben Jebara S. Multiresolution based reference estimation for adaptive ECG signals denoising. *International Conference on Image and Signal Processing, ICISP'01*, Morocco, 2001, vol. 2, pp. 875–882.

*Received 10 January 2021*

## ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ОБРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

В.Ф. Тележкин<sup>1</sup>, Б.Б. Саидов<sup>1, 2</sup>, П.А. Угаров<sup>1</sup>, А.Н. Рагозин<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

В настоящей работе рассматривается обработка электрокардиосигнала при помощи вейвлет-преобразования. В электрокардиографии для обнаружения, извлечения и анализа различных компонентов электрокардиограммы применяются различные методы обработки цифровых сигналов. Среди них техника вейвлет-преобразования дает многообещающие результаты в анализе частотно-временных характеристик компонент электрокардиограммы. Актуальность решения проблемы повышения качества жизни людей при помощи раннего диагностирования и своевременного лечения различных кардиологических заболеваний является очевидной. Особенно важным является процесс автоматизированного анализа огромной базы электрокардиографических данных. Вейвлет-анализ может успешно использоваться для сглаживания и удаления шума сигнала ЭКГ. Сигнал электрокардиограммы, очищенный от шумовых компонент, выглядит нагляднее, при этом его объем составляет от 10 до 5 % от исходного сигнала, что в большой степени решает проблему хранения кардиозаписей. **Цель исследования:** разработка алгоритма пороговой обработки вейвлет-коэффициентов и фильтрации сигнала электрокардиографии. **Материалы и методы.** Для анализа были взяты кардиограммы. Далее они были оцифрованы и введены в компьютер для обработки. Была написана программа в среде MATLAB, реализующая непрерывное и дискретное вейвлет-преобразование. **Результаты.** В работе показан результат фильтрации сигнала ЭКГ с добавлением шума с отношением сигнал/шум 35 и 45 дБ с использованием уровней разложения  $N=2$ ,  $N=3$ ,  $N=4$ . **Заключение.** На основе анализа полученных данных можно сделать вывод, что второй уровень разложения наиболее оптимален для фильтрации ЭКГ-сигнала. С увеличением уровня разложения выходное отношение уменьшается, на уровне  $N=4$  выходное отношение почти не превышает входное, следовательно, фильтрация становится неэффективной. Коэффициент корреляции к четвертому уровню значительно снижается, что означает значительное повышение искажений, вносимых алгоритмом фильтрации.

*Ключевые слова:* электрокардиосигнал, вейвлет-преобразование, алгоритм фильтрации, разработка алгоритма.

В процессе экспериментальных исследований принимала участие студентка группы КЭ-658 Чупина Анастасия Денисовна.

**Тележкин Владимир Федорович**, д-р техн. наук, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; telezhkinvf@susu.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, saidovb@susu.ru.

**Угаров Павел Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Pavel@rts.susu.ac.ru.

**Рагозин Андрей Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ragozinaan@susu.ru.

*Поступила в редакцию 10 января 2021 г.*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Wavelet-Conversion in Electrocardio Signal Processing / V.F. Telezhkin, B.B. Saidov, P.A. Ugarov, A.N. Ragozin // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 70–79. DOI: 10.14529/ctcr210107

### FOR CITATION

Telezhkin V.F., Saidov B.B., Ugarov P.A., Ragozin A.N. Wavelet-Conversion in Electrocardio Signal Processing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 70–79. DOI: 10.14529/ctcr210107

# Управление в социально-экономических системах

УДК 004.942

DOI: 10.14529/ctcr210108

## РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАУЧНОГО РАЗВИТИЯ ЖУРНАЛОВ

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

В настоящее время актуальным является вопрос определения рейтинга и научной значимости журналов. Выполнен обзор способов оценки качества российских и зарубежных журналов. **Цель работы.** Целью исследования является разработка математических моделей, позволяющих моделировать и прогнозировать динамику интегрального показателя научного развития журнала. **Материалы и методы.** Определен комплекс наукометрических показателей для оценки научной значимости журналов. Независимость факторов исследована с помощью матрицы парных коэффициентов корреляции. Предложен способ получения математической зависимости, отражающей связь между выбранными наукометрическими индикаторами и интегральным показателем, основанный на применении метода многомерной средней. Ранжирование факторов выполнено экспертным методом. Расчет весовых коэффициентов осуществлен методом Фишберна. В качестве исходных данных использовалась доступная информация научной электронной библиотеки *e-library*. **Результаты исследования.** С применением полученного выражения по исходным данным вычислены значения интегрального показателя за 7 лет на примере Журнала 1. По аналогичной методике выведена зависимость интегрального показателя от ключевых показателей Журнала 2, для которого не определен показатель *Science Index*. Выполнен прогноз библиометрических показателей (факторов) и интегрального показателя Журнала 2 на последующие три года. Для прогнозирования характера изменения факторов (числа цитирований) выбрана квадратичная и кубическая зависимость. Исследовано влияние совместного изменения факторов на интегральный показатель. **Обсуждение и заключение.** Разработанные математические модели могут использоваться для анализа изменения комплекса наукометрических показателей во времени при разработке стратегии развития научных журналов и принятии управленческих решений.

*Ключевые слова:* журнал, наукометрические показатели, интегральный показатель, научная значимость, многомерная средняя, моделирование, прогнозирование.

### Введение

Высокий рейтинг научного журнала в реферативной и библиографической базе данных вызывает его востребованность научным сообществом. Рейтинг научных журналов определяется на основе информации о цитировании опубликованных статей.

Для журналов, индексируемых в международных реферативных базах данных, рейтинг оценивается путем определения квартиля ( $Q1-Q4$ ), то есть ранга научного журнала, зависящего от его цитируемости. Для базы данных *Web of Science (WoS)* квартиль определяется импакт-фактором *Journal Citation Reports (JCR)*, а для *Scopus* – показателем *SCImago Journal Rank (SJR)*.

Рейтинг российских журналов определяется различными показателями. Наукометрические показатели приведены на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ) *eLIBRARY.RU* в разделе «Анализ публикационной активности журнала». Важным показателем является импакт-фактор Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). На сегодня существует несколько его видов. Этот показатель может сопровождаться высоким коэффициентом самоцитирования или ин-

дексом Херфиндаля по цитирующим журналам, небольшим числом статей. В этом случае основная часть ссылок на статьи поступает из этого же журнала или ограниченного числа других журналов. В РИНЦ применяется интегральный показатель *Science Index (SI)*. Одна из основных задач данного рейтинга – дать возможность сравнивать между собой журналы, относящиеся к различным дисциплинам [1].

Формула расчета интегрального показателя *SI* учитывает небольшое число наукометрических показателей (среднее число ссылок в списках цитируемой литературы на статьи в журналах РИНЦ; доли ссылок, попадающих на пятилетний период; пятилетний импакт-фактор с учетом самоцитирования; индекс Херфиндаля по цитирующим журналам). Информация о численном значении *SI* за прошедший год появляется в РИНЦ не сразу, а только через несколько месяцев в следующем году. Кроме этого, данный показатель рассчитывается не по всем научным журналам. Для более полной оценки научной значимости журнала необходимо учитывать совместное влияние ряда дополнительных библиометрических показателей.

Для автора, решившего опубликовать результаты своих научных исследований, при выборе журнала важными факторами являются рейтинг журнала, соответствие статьи тематике журнала, сроки и качество рецензирования, время от подачи статьи в редакцию до ее публикации, платность статей. При длительном сроке публикации возможно снижение актуальности работы. Наличие наукометрических показателей журналов способствует правильному выбору журнала.

Для авторов при выборе журнала при опубликовании статьи, для редакционных коллегий научных журналов при разработке стратегии развития журнала может быть полезен анализ изменения комплекса наукометрических показателей во времени.

С этой целью предлагается один из возможных способов анализа данных с применением математической зависимости, отражающей связь между выбранными наукометрическими показателями. Предлагаемый интегральный критерий можно просто вычислить на основе обработки информации, приведенной в РИНЦ.

## 1. Обзор литературы

Впервые анализ цитируемости был применен для решения проблемы комплектования в 1927 г. библиотекарями химического колледжа П. Гросс и Е. Гросс [2, 3]. Анализ основан на предположении, что согласно количеству ссылок на научную работу можно сделать вывод о степени ее влияния на научное сообщество [4].

Способам оценки качества журналов и описанию наукометрических показателей, сравнительным особенностям российских и зарубежных журналов, особенностям публикаций по областям знаний и территориям посвящено большое число работ [5–7]. В основном все существующие методики оценки научных журналов можно разделить на 2 группы: библиометрические показатели и экспертные методы.

В [8] на основе индекса цитирования *Science Index* и импакт-фактора выполнен анализ рейтинга основных российских журналов, специализирующихся на проблемах безопасности, защиты окружающей среды и экологии. В [9] планируется разработка методики расчета интегрального показателя журналов медицинского профиля, основанной на международных показателях (*SNIP (Source Normalised Impact per Paper), Stability intervals*).

В ряде зарубежных работ также рассмотрены наукометрические показатели (импакт-фактор, число цитирований и др.) для оценки качества научного журнала [10, 11]. В работе [12] выполнена библиометрическая оценка научной литературы в области образования за период 2004–2014 гг. Приведено сравнение значений импакт-фактора журналов, а также количество цитирований публикаций для нескольких университетов и исследовательских центров с применением инструмента *InCites Database*.

## 2. Материалы и методы

Для нахождения выражения, связывающего наукометрические показатели и интегральный показатель научного развития журнала, воспользуемся многомерными методами анализа данных. К таким методам относятся, например, метод главных компонент, многомерной средней, кластерный анализ [13] и др. Выбран метод многомерной средней из-за простоты реализации. Метод применяется с целью группировки объектов, характеризующихся большим количеством призна-

ков. Многомерной средней называется средняя величина нескольких признаков для одной единицы совокупности.

Выбраны следующие наукометрические показатели журнала:

- X1 – двухлетний коэффициент самоцитирования, %;
- X2 – пятилетний коэффициент самоцитирования, %;
- X3 – пятилетний индекс Херфиндаля по цитирующим журналам;
- X4 – индекс Херфиндаля по организациям авторов;
- X5 – индекс Джини;
- X6 – общее число цитирований журнала в текущем году;
- X7 – среднее число ссылок в списках цитируемой литературы;
- X8 – число новых авторов;
- X9 – средний индекс Хирша авторов;
- X10 – число просмотров статей за год;
- X11 – пятилетний импакт-фактор РИНЦ;
- X12 – двухлетний импакт-фактор РИНЦ;
- X13 – число ссылок на самую цитируемую статью;
- X14 – десятилетний индекс Хирша;
- X15 – число статей, опубликованных за предыдущие два года;
- X16 – число цитирований статей предыдущих двух лет из журналов;
- X17 – число самоцитирований статей предыдущих двух лет;
- X18 – число статей, опубликованных за предыдущие 5 лет;
- X19 – число цитирований статей предыдущих 5 лет;
- X20 – число самоцитирований статей предыдущих 5 лет;
- X21 – число статей за текущий год.

Найдем выражение, связывающее вышеприведенные факторы и интегральный показатель. Однако прежде чем перейти к этому этапу, надо оценить, как выбранные факторы взаимосвязаны. Если парная корреляция между двумя рядами факторов высока, то один из рядов должен быть исключен. При исключении надо учитывать и важность фактора по смыслу, так как величина взаимного влияния факторов может зависеть, например, от объема выборки [14].

Примем, если значение парного коэффициента корреляции больше  $|0,8|$ , то факторы считаются зависимыми [15]. Показатели X15–X21 носят справочный характер и участвуют в формировании других показателей, поэтому в дальнейшем рассматриваем 14 основных показателей X1–X14.

Исходные данные (14 отобранных наукометрических показателей за период 2012–2018 гг.) представим в виде таблицы, где строка соответствует значениям разных наукометрических показателей (признаков) за один год, а столбец содержит значения по одному признаку за разные годы. Нормировка данных осуществляется по каждому из столбцов путем деления на соответствующее среднее значение по признаку.

Многомерная средняя определяется из относительных (нормированных) величин, рассчитанных по этим признакам, следующей формулой<sup>1</sup>

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^m P_{ij}}{m} = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{x_{ij}}{x_j}}{m} = \frac{\sum \tilde{X}_{ij}}{m}, \quad (1a)$$

где  $i$  – номер единицы совокупности (год);  $j$  – номер признака (наукометрического показателя),  $j = 1 \dots m$ ;  $P_i$  – многомерная средняя для  $i$ -й единицы совокупности (года);  $m$  – число признаков,  $m = 14$ ;  $x_{ij}$  – значение признака  $x_j$  для  $i$ -й единицы;  $\bar{x}_j$  – среднее значение признака  $x_j$ , рассчитанное по всей совокупности единиц;  $\tilde{X}_{ij}$  – нормированное значение признака  $x_j$ .

Заметим, что большее значение показателей X6–X14 приводит к увеличению интегрального критерия, а увеличение значений показателей X1–X5 снижает критерий. Чтобы все признаки были равнонаправленными, перейдем к противоположным величинам показателей X1–X5. Для этого

<sup>1</sup>Капралова Е.Б. Статистика. Практикум: электронное учебное пособие. URL: [http://eos.ibi.spb.ru/umk/8\\_1/15/15\\_P1\\_R1\\_T2.html](http://eos.ibi.spb.ru/umk/8_1/15/15_P1_R1_T2.html).

определяем величины, равные разности между максимальными значениями (в нашем случае они известны) и определенными значениями показателей:

$$X1' = 100 - X1; X2' = 100 - X2; X3' = 10\,000 - X3; X4' = 10\,000 - X4; X5' = 1 - X5.$$

### 3. Результаты исследования

Приведем последовательность построения зависимости интегрального критерия от наукометрических показателей по формуле (1а) и возможные варианты ее преобразования. В качестве исходных данных для примера использовалась доступная информация НЭБ РИНЦ по журналу «Журнал 1», относящемуся к разделу «Автоматика. Вычислительная техника».

С учетом формулы (1а) интегральный показатель для выбранных 14 наукометрических показателей имеет следующий вид:

$$P_i = 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{1_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{2_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{3_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{4_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{5_i} + \dots + \\ + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{6_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{7_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{8_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{9_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{10_i} + \dots + \\ + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{11_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{12_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{13_i} + 0,0714 \cdot \tilde{X}'_{14_i}.$$

Однако здесь приняты равные веса для всех отобранных факторов, так как считается, что признаки равной значимости. В нашем случае считаем, что признаки (факторы, наукометрические показатели) отличаются значимостью. Для определения ранга каждого наукометрического показателя выбран экспертный метод. В качестве экспертов выступили преподаватели и сотрудники вуза, имеющие опыт написания и опубликования научных статей в журналах. В результате обработки данных наукометрические показатели расположились в следующей последовательности по убыванию их значимости:  $X_6, X_{11}, X_{12}, X_2, X_1, X_3, X_4, X_5, X_{13}, X_{10}, X_{14}, X_9, X_8, X_7$ .

Затем определяем вес каждого признака с помощью метода Фишберна [16]:

$$w_j = \frac{2(m-j+1)}{m(m+1)}, \quad j = 1 \dots m,$$

где  $j$  – ранг наукометрического показателя.

С учетом рассчитанных весов наукометрических показателей формула (1а) преобразуется к следующему виду

$$P_i = \sum_{j=1}^m w_j \tilde{X}'_{ij}. \quad (16)$$

Тогда по формуле (16) интегральный критерий определяется следующим образом:

$$P_i = 0,0952 \cdot \tilde{X}'_{1_i} + 0,1048 \cdot \tilde{X}'_{2_i} + 0,0857 \cdot \tilde{X}'_{3_i} + 0,0762 \cdot \tilde{X}'_{4_i} + 0,0667 \cdot \tilde{X}'_{5_i} + \dots + \\ + 0,1333 \cdot \tilde{X}'_{6_i} + 0,0095 \cdot \tilde{X}'_{7_i} + 0,0190 \cdot \tilde{X}'_{8_i} + 0,0286 \cdot \tilde{X}'_{9_i} + 0,0476 \cdot \tilde{X}'_{10_i} + \dots + \\ + 0,1143 \cdot \tilde{X}'_{11_i} + 0,1238 \cdot \tilde{X}'_{12_i} + 0,0571 \cdot \tilde{X}'_{13_i} + 0,0381 \cdot \tilde{X}'_{14_i}. \quad (2)$$

С применением выражения (2) по исходным данным вычислены значения интегрального показателя Журнала 1 за 7 лет (2012–2018 гг.,  $i = 1 \dots 7$ ). Полученные результаты представлены на рис. 1.

Выражение (2) позволяет оценить независимое или совместное влияние отдельных показателей (факторов) на уровень научного развития журнала в динамике. Например, используя прогнозы отдельных показателей, можно выявить, как изменится интегральный показатель (2) в будущие периоды.

Интегральный показатель по выражению (2) возможно определить и для журналов из других разделов. Кроме этого, возможны случаи, когда в РИНЦ для научного журнала приведены наукометрические показатели за определенный период, но показатель *Science Index* не определен. Соответственно, журнал нельзя найти в списке рейтинга как в общем, так и по отдельным направлениям. Примером такого журнала является журнал «Журнал 2». Покажем последовательность применения зависимости (2) для названного издания. Отобрано 14 факторов (наукометрических показателей) за период 2012–2018 гг.

Рассчитанные значения парных коэффициентов корреляции наукометрических показателей журнала «Журнал 2» приведены в табл. 1.

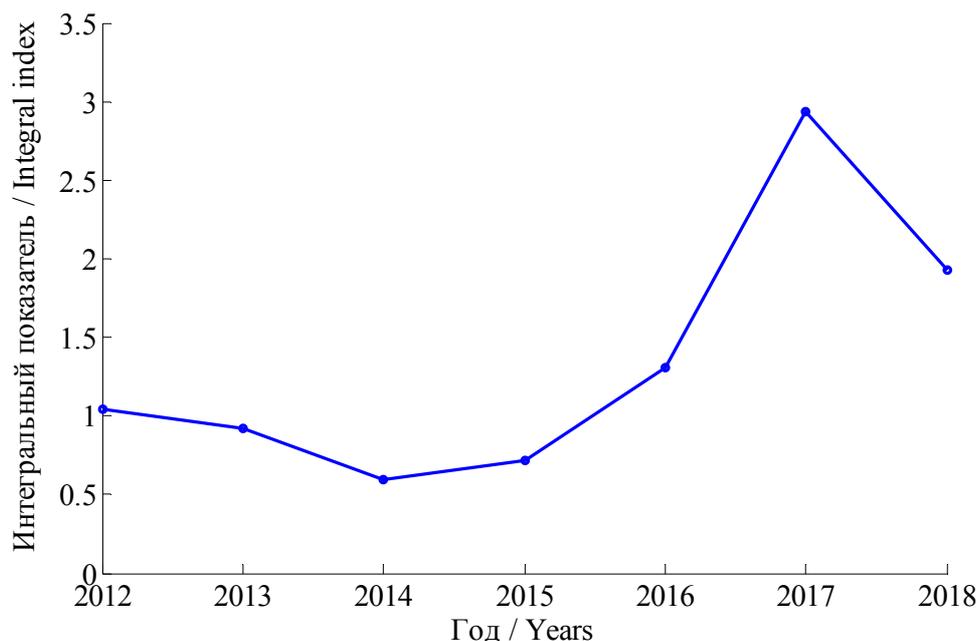


Рис. 1. Показатели журнала «Журнал 1»  
Fig. 1. Indicators of the journal "Journal 1"

Таблица 1

Матрица парных коэффициентов корреляции

Table 1

Matrix of paired correlation coefficients

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
X1	1,000	0,431	-0,319	-0,381	-0,198	0,787	0,776	-0,240	0,695	0,390	0,730	0,815	-0,033	0,616
X2	0,431	1,000	0,615	-0,063	-0,280	0,347	0,295	0,297	0,683	-0,003	-0,034	-0,004	0,542	0,182
X3	-0,319	0,615	1,000	0,372	0,086	-0,424	-0,344	0,112	-0,001	-0,640	-0,723	-0,778	0,466	-0,550
X4	0,381	0,063	0,372	1,000	0,383	0,664	0,803	-0,129	-0,570	-0,692	-0,313	-0,481	0,320	-0,747
X5	0,198	0,280	0,086	0,383	1,000	0,025	0,298	-0,581	-0,081	-0,112	-0,260	-0,267	-0,745	-0,143
X6	0,787	0,347	0,424	0,664	0,025	1,000	0,914	-0,045	0,823	0,778	0,739	0,814	-0,320	0,831
X7	0,776	0,295	-0,344	-0,803	0,298	0,914	1,000	-0,215	0,807	0,650	0,554	0,707	-0,392	0,788
X8	-0,240	0,297	0,112	-0,129	-0,581	-0,045	-0,215	1,000	0,181	0,348	-0,151	-0,071	0,674	0,279
X9	0,695	0,683	-0,001	-0,570	-0,081	0,823	0,807	0,181	1,000	0,632	0,314	0,539	0,098	0,797
X10	0,390	-0,003	-0,640	-0,692	-0,112	0,778	0,650	0,348	0,632	1,000	0,560	0,738	-0,224	0,930
X11	0,730	-0,034	-0,723	-0,313	-0,260	0,739	0,554	-0,151	0,314	0,560	1,000	0,899	-0,317	0,544
X12	0,815	-0,004	-0,778	-0,481	-0,267	0,814	0,707	-0,071	0,539	0,738	0,899	1,000	-0,225	0,804
X13	-0,033	0,542	0,466	0,320	-0,745	-0,320	-0,392	0,674	0,098	-0,224	-0,317	-0,225	1,000	-0,079
X14	0,616	0,182	-0,550	-0,747	-0,143	0,831	0,788	0,279	0,797	0,930	0,544	0,804	-0,079	1,000

Из табл. 1 видим, что для нескольких показателей коэффициент превышает пороговое значение, но в нашем случае примем, что все показатели важны.

Для того чтобы получить значение интегрального показателя не только за выбранный период, но и в будущие периоды, выполним прогнозирование наукометрических показателей.

Для показателей, характеризующих число цитирований за 2 предыдущих года X16 и за 5 предыдущих лет X19, определена аппроксимирующая квадратичная зависимость (рис. 2):

$$X_j(t) = a_0 + a_1 \cdot t^2, \tag{3a}$$

где  $t$  – время, год;  $X_j$  – прогнозируемый фактор ( $j = 16, 19$ );  $a_0, a_1$  – коэффициенты.

Для показателя, характеризующего общее число цитирований X6, определена аппроксимирующая кубическая зависимость (см. рис. 2):

$$X_j(t) = a_2 + a_3 \cdot t^3, \tag{3б}$$

где  $X_j$  – прогнозируемый фактор ( $j = 6$ );  $a_2, a_3$  – коэффициенты.

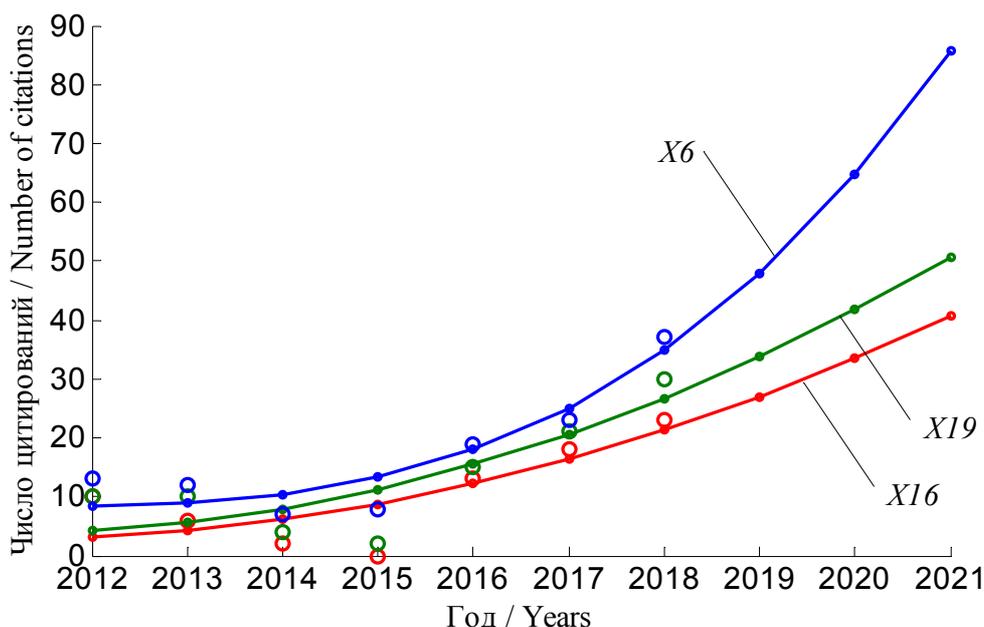


Рис. 2. Аппроксимация числа цитирований  
Fig. 2. Approximation of the number of citations

Получены следующие значения коэффициентов:

для X16:  $a_0 = 2,6951$ ;  $a_1 = 0,3795$ ;

для X19:  $a_0 = 3,7719$ ;  $a_1 = 0,4686$ ;

для X6:  $a_2 = 8,3228$ ;  $a_3 = 0,0775$ .

По аппроксимирующим зависимостям (3а), (3б) определены прогнозируемые значения факторов X6, X16, X19 на период 2019–2021 гг. Число статей за каждый год примем  $X_{21} = 31$ . С учетом этого находим число статей X15 и X18. Полученные результаты объединены в табл. 2. Остальные наукометрические показатели на прогнозируемый период определены на уровне средних значений за моделируемый период.

Прогнозируемые показатели журнала «Журнал 2»

Таблица 2

Forecast indicators of the journal "Journal 2"

Table 2

Показатель / Indicator	2019	2020	2021	
X21	30	30	30	
X6	48	65	85	
X16	27	33	40	
X15	67	62	62	
$X_{12} = \frac{X_{16}}{X_{15}}$	0,4028	0,5393	0,6556	
$X_1 = \frac{X_{17}}{X_{16}} \cdot 100$	$X_{17_{2018}} = 8$	29,6460	23,9255	19,6811
	$X_{17_{SR}} = 2$	7,4115	5,9814	4,9203
X19	34	42	50	
X18	141	166	162	
$X_{11} = \frac{X_{19}}{X_{18}}$	0,2394	0,2514	0,3125	
$X_2 = \frac{X_{20}}{X_{19}} \cdot 100$	$X_{20_{2018}} = 13$	38,5082	31,1568	25,6781
	$X_{20_{SR}} = 3$	8,8865	7,1900	5,9257

В 2018 г. возросло число самоцитирований статей предыдущих 5 лет  $X_{20}$  и предыдущих 2 лет  $X_{17}$ , также увеличилось значение пятилетнего индекса Херфиндаля по цитирующим журналам  $X_3$ . При этом общее число цитирований  $X_6$ , число цитирований за 2 года  $X_{16}$ , число цитирований за 5 лет  $X_{19}$  увеличивается, возрастает двухлетний импакт-фактор  $X_{12}$  и пятилетний импакт-фактор  $X_{11}$ .

На рис. 3 приведены значения интегрального показателя за моделируемый (2012–2018 гг.) и прогнозируемый (2019–2021 гг.) период.

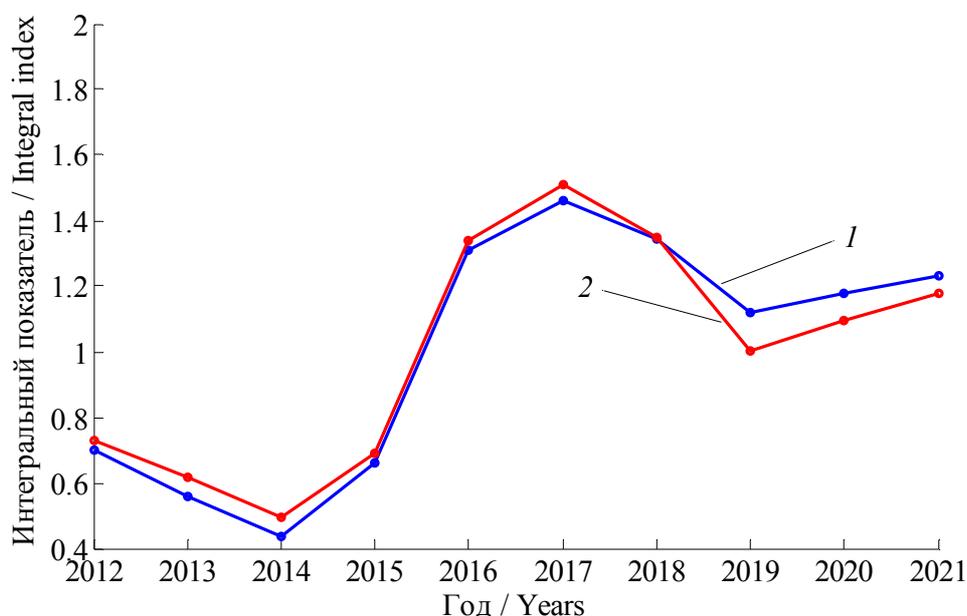


Рис. 3. Интегральный показатель при разном числе самоцитирований  
Fig. 3. Integral indicator for different number of self-citations

График 1 соответствует варианту, когда прогнозируемое число самоцитирований принято на уровне среднего значения за моделируемый период ( $X_{17_{SR}}$ ,  $X_{20_{SR}}$ ), график 2 соответствует прогнозируемому числу самоцитирований на уровне значения 2018 г. ( $X_{17_{2018}}$ ,  $X_{20_{2018}}$ ). Прогнозируемые значения интегрального показателя по варианту 1 выше, так как число самоцитирований в этом случае ниже.

Меняя значения различных влияющих факторов, можно строить различные сценарии научного развития журнала.

### Обсуждение и заключение

Для анализа научного развития журнала необходимо применение методов количественной оценки. Важным этапом формирования такой оценки является выбор влияющих наукометрических показателей (факторов).

С применением метода многомерной средней получена зависимость интегрального показателя научного развития журнала от выбранных факторов. Она позволяет определить динамику интегрального показателя при совместном или независимом изменении наукометрических показателей. Анализ такого влияния поможет выбрать варианты решений при формировании стратегии развития определенного научного журнала.

Редакционная коллегия, рецензенты – управляющая часть социально-научной системы, которая может влиять на изменение основных показателей (факторов). Задавая различные значения факторов в будущем, можно посмотреть, как будет меняться интегральный критерий, то есть выполнять прогнозирование. По результатам можно принимать различные меры для улучшения общего научного состояния журнала, корректировать требования к авторам и т. д. Например, для улучшения индекса Херфиндаля и, соответственно, повышения значения критерия, возможно, приветствуется соавторство ученых, работающих в разных организациях. Для снижения коэффициента самоцитирования, соответственно, повышения значения критерия, возможно, назначается

ограничение доли самоцитирования статей журнала в структуре списка литературы, требуется улучшение качества цитирования и т. п.

Автор является управляемой частью социально-научной системы. При написании статьи автор сначала выбирает несколько журналов, которые, предположительно, публикуют статьи по его тематике. В дополнение к информации, приведенной на сайте журнала, рекомендациям коллег автор может определиться с выбором журнала с помощью расчета интегрального критерия. Для этого на сайте *e-library* можно открыть раздел «Анализ публикационной активности журнала», посмотреть его показатели, скопировать нужные, определить значение критерия. Проанализировать, какая динамика (положительная, стабильная, отрицательная), сравнить значения критерия по разным журналам. Если, например, очень высокое значение, то это может соответствовать высоким требованиям к статьям, высокой доле отказов, долгому ожиданию публикации и т. п. Если сравнительно малое значение – тоже не очень хорошо. В результате автор выбирает журнал, который подходит для осуществления его целей.

### Литература

1. Григорьева, Е.И. Хороши ли журналы, в которых размещены ваши статьи? / Е.И. Григорьева, З.Р. Зарипова, К.П. Кокарев // *Полис. Политические исследования*. – 2015. – № 3. – С. 147–159.

2. Gross, P.L.K. *College libraries and chemical education* / P.L.K. Gross, E.M. Gross // *Science*. – 1927. – Vol. 66, no. 1713. – P. 385–389.

3. Гуреев, В.Н. Использование библиометрии для оценки значимости журналов в научных библиотеках (Обзор) / В.Н. Гуреев, Н.А. Мазов // *Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы*. – 2015. – № 2. – С. 8–19.

4. Стерлигов, И. Наукометрический минимум для ученого. Инструменты для оценки деятельности учёных и организаций / И. Стерлигов, А. Еникеева // *Академическая среда*. – 2015. – Т. 37, № 6. – С. 1–4.

5. Истомин, И.А. Сравнительные особенности отечественных и зарубежных научных журналов / И.А. Истомин, А.А. Байков // *Международные процессы*. – 2015. – Т. 13, № 41. – С. 114–140.

6. Москалева, О.В. Научные публикации как средство коммуникации, анализа и оценки научной деятельности / О.В. Москалева // *Руководство по наукометрии: индикаторы развития науки и технологии: моногр.* – Екатеринбург: ИПЦ «Издательство УРФУ», 2014. – Гл. 3. – С. 110–163.

7. Еременко, Т.В. Сравнительный анализ вклада региональной периодики в систему современного российского научного знания (на примере научных журналов Рязанской области) / Т.В. Еременко // *Научные и технические библиотеки*. – 2018. – № 11. – С. 34–51.

8. Девисилов, В.А. Рейтинги российских научных журналов, специализирующихся на проблемах безопасности, защиты окружающей среды и экологии / В.А. Девисилов // *Безопасность в техносфере*. – 2014. – Т. 3, № 1. – С. 77–82.

9. Разработка полезной модели «Аналитическая система оценки результативности и потенциала научно-инновационной деятельности университета медицинского профиля» / А.И. Вялков, Е.А. Глухова, А.С. Бастрон, С.А. Мартынич // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2015. – № 10-4. – С. 634–637.

10. Aksnes, D.W. Citations, citation indicators, and research quality: An overview of basic concepts and theories / D.W. Aksnes, L. Langfeldt, P. Wouters // *Sage Open*. – January-March 2019. – P. 1–17. DOI: 10.1177/2158244019829575

11. Bornmann, L. Measuring impact in research evaluations: A thorough discussion of methods for effects and problems with impact measurements / L. Bornmann // *High Education*. – 2017. – Vol. 73. – P. 775–787.

12. *Bibliometric evaluation of scientific literature in the area of research in education using InCites Database of Thomson Reuters* / M. Panczyk, M. Woynarowska-Soldan, J. Belowska et al. // *9th International Technology, Education and Development Conference, At Madrid, Spain, March, 2015*. – P. 487–496.

13. Многомерные статистические методы анализа экономических процессов: учеб. // Ю.В. Сажин, Ю.В. Сарайкин, В.А. Басова, А.В. Катень. – Саранск: Изд-во Мордов. гос. ун-та им. Н.П. Огарева, 2008. – 288 с.

14. Затонский А.В. Моделирование объектов управления в MatLab: учеб. пособие / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова. – СПб.: Лань, 2019. – 144 с.

15. Затонский, А.В. Управление атмосферной колонной малого нефтеперерабатывающего завода с применением динамической модели / А.В. Затонский, Л.Г. Тугашова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 1. – <http://naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf>.

16. Сурков, А.А. Объединение экономических прогнозов с использованием экспертной информации / А.А. Сурков // Статистика и экономика. – 2019. – Т. 16, № 5. – С. 4–14.

**Тугашова Лариса Геннадьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и информационных технологий, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск; [tugashova@yandex.ru](mailto:tugashova@yandex.ru).

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; [z Xenon@narod.ru](mailto:z Xenon@narod.ru).

*Поступила в редакцию 28 декабря 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210108

## DEVELOPING AN INTEGRAL INDICATOR OF SCIENTIFIC JOURNALS DEVELOPMENT

**L.G. Tugashova**<sup>1</sup>, [tugashova@yandex.ru](mailto:tugashova@yandex.ru),  
**A.V. Zatonskiy**<sup>2</sup>, [z Xenon@narod.ru](mailto:z Xenon@narod.ru)

<sup>1</sup> *Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russian Federation,*

<sup>2</sup> *Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation*

Currently, the issue of determining the rating and scientific significance of journals remains very important. It provides a review of the methods for assessing the quality of Russian and foreign journals. **Purpose of work.** The aim of the study is to develop mathematical models allowing to simulate and predict the dynamics of an integral indicator of the scientific development of a journal. **Materials and methods.** The paper defines the set of scientometric indicators for assessing the scientific significance of journals. The independence of factors was investigated using a matrix of matching correlation coefficients. A method for obtaining a mathematical dependence that reflects the relationship between the selected scientometric indicators and the integral indicator, based on the application of the multidimensional average method, is proposed. The ranking of factors is performed by the expert method. The weight coefficients were calculated using the Fishburne method. As the source data, we used available information from the scholarly *e-library*. **The results of the study.** Using the formula obtained, the values of the integral indicator for 7 years have been calculated from the source data using the example of the Journal 1. Using a similar technique, we derived the dependence of the integral indicator on key indicators of the Journal 2, for which the Science Index indicator has not been defined. The forecast of bibliometric indicators (factors) and the integral index of the journal for the next three years is made. To predict the nature of the change in factors (number of citations), anquadratic and cubic dependence is selected. The influence of joint change of factors on the integral indicator is investigated. **Discussion and conclusions.** The developed mathematical models can be used to analyze changes in the complex of scientometric indicators over time when designing a development strategy for scientific journals and making managerial decisions.

*Keywords: journal, scientometric indicators, integral indicator, scientific significance, multidimensional average, modeling, forecasting.*

## References

1. Grigor'eva E.I., Zaripova Z.R., Kokarev K.P. [Are the magazines in which your articles are placed Good?]. *Polis. Political studies*, 2015, no. 3, pp. 147–159. (in Russ.)
2. Gross, P.L.K., Gross E.M. College Libraries and Chemical Education. *Science*, 1927, no. 1713, pp. 385–389.
3. Gureev V.N., Mazov N.A. [The use of bibliometry to assess the importance of journals in scientific libraries (Review)]. *Scientific and technical information. Series 1: Organization and methodology of information work*, 2015, no. 2, pp. 8–19. (in Russ.)
4. Sterligov I., Enikeeva A. [Scientometric minimum for a scientist. Tools for assessing the activities of scientists and organizations]. *Academic environment*, 2015, no. 37, pp. 1–4. (in Russ.)
5. Istomin I.A., Bajkov A.A. [Comparative features of domestic and foreign scientific journals]. *International processes*, 2015, no. 41, pp. 114–140. (in Russ.)
6. Moskaleva O.V. [Scientific publications as a means of communication, analysis and evaluation of scientific activity]. *Guide to scientometry: indicators of science and technology: monograph*. Ekaterinburg, Publishing house of Ural Federal University, 2014, chap. 3, pp. 110–163. (in Russ.)
7. Eremenko T.V. [Comparative analysis of the contribution of regional periodicals to the system of modern Russian scientific knowledge (on the example of scientific journals of the Ryazan region)]. *Scientific and technical libraries*, 2018, no. 11, pp. 34–51. (in Russ.)
8. Devisilov V.A. [Ratings of Russian scientific journals specializing in the problems of safety, environmental protection and ecology]. *Safety in the technosphere*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 77–82. (in Russ.)
9. Vyalkov A.I., Gluhova E.A., Bastron A.S., Martynchik S.A. [Development of a useful model “Analytical system for evaluating the effectiveness and potential of scientific and innovative activity of the University of medical profile”]. *International journal of applied and fundamental research*, 2015, no. 10-4, pp. 634–637. (in Russ.)
10. Aksnes D.W., Langfeldt L., Wouters P. Citations, citation indicators, and research quality: An overview of basic concepts and theories. *Sage Open*, January–March 2019, pp. 1–17. DOI: 10.1177/2158244019829575.
11. Bornmann L. Measuring impact in research evaluations: A thorough discussion of methods for, effects and problems with impact measurements. *High Education*, 2017, vol. 73, pp. 775–787.
12. Panczyk M., Woynarowska-Soldan M., Belowska J., Zarzeka A., Gotlib J. Bibliometric evaluation of scientific literature in the area of research in education using InCitesDatabase of Thomson Reuters. *9th International Technology, Education and Development Conference*. Madrid, Spain, 2015, pp. 487–496.
13. Sazhin Yu.V., Sarajkin Yu.V., Basova V.A., Katyn' A.V. *Mnogomernyye statisticheskiye metody analiza ekonomicheskikh protsessov: ucheb.* [Multidimensional statistical methods of analysis of economic processes: textbook]. Saransk, Publishing House of National Research OgarevMordovia State University, 2008. 288 p. (in Russ.)
14. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. *Modelirovaniye ob'yektov upravleniya v MatLab: ucheb. posobiye* [Modelling of control objects in MatLab: a tutorial]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019. 144 p. (in Russ.)
15. Zatonskiy A.V., Tugashova L.G. [Control of the atmospheric column of a small oil refinery using a dynamic model]. *Internet journal “Naukovedenie”*, 2017, vol. 9, no. 1. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/71TVN117.pdf>. (in Russ.)
16. Surkov A.A. [The combination of the economic forecasts using expert information]. *Statistics and Economics*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 4–14. (in Russ.)

Received 28 December 2020

## ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Тугашова, Л.Г. Разработка интегрального показателя научного развития журналов / Л.Г. Тугашова, А.В. Затонский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 80–89. DOI: 10.14529/ctcr210108

## FOR CITATION

Tugashova L.G., Zatonskiy A.V. Developing an Integral Indicator of Scientific Journals Development. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 80–89. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210108

## МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ КРИЗИСА НА ДОХОДЫ РЕГИОНАЛЬНОГО БЮДЖЕТА: АНАЛИЗ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

О.И. Дранко<sup>1</sup>, О.В. Логиновский<sup>2</sup>, С.А. Приказчиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия,

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

Экономический кризис, вызванный пандемией COVID-19, приводит к значительному падению базы начисления налогов и доходов бюджета. Рассматривается экспресс-моделирование доходов регионального бюджета в зависимости от глубины кризиса. Делается оценка по одному из регионов – Челябинской области. **Цель исследования.** Построение механизма экспресс-оценки доходной части регионального бюджета на основании доступных статистических данных. Разработка комплексной модели прогнозирования показателей финансовой отчетности предприятий региона с последующим прогнозом доходной части регионального бюджета. **Материалы и методы.** Используются имитационные модели макроэкономических показателей доходов бюджета региона в увязке с моделью финансового прогнозирования показателей предприятий. Для обработки финансовой информации предприятий региона используются методы обработки больших массивов данных. **Результаты.** Построена модель, увязывающая изменение показателей финансовой отчетности предприятий с динамикой доходных статей регионального бюджета. На основании сценарных допущений проведены расчеты изменения показателей финансовой отчетности, налогооблагаемой базы предприятий региона, а также их вклада в региональный бюджет. Разработанная модель позволила сформировать прогноз доходной части бюджета в условиях коронакризиса. **Заключение.** Данный подход позволяет объединить мезо- и микроэкономические подходы и проводить моделирование экономического развития региона как многоуровневой системы. Предложенная модель является типовой и может применяться для анализа развития других регионов страны.

*Ключевые слова:* многоуровневая система управления развитием, имитационное моделирование, бюджет, развитие предприятий, региональное развитие, коронакризис, большие массивы данных, гиперкубы.

### Введение

Моделирование последствий экономического кризиса, вызванного пандемией COVID-19 (далее – коронакризис), является сложной задачей. Для снижения скорости распространения пандемии весной 2020 г. были предприняты беспрецедентные меры по самоизоляции населения, практически остановлены многие виды деятельности [1]. Это привело к одновременному искусственному ограничению спроса и предложения, что характеризует уникальную природу именно этого кризиса [2]. После летнего снижения заболеваемости и частичного восстановления экономики в конце сентября 2020 г. началась вторая волна распространения вируса, приведшая на этот раз к менее радикальным, но также весьма существенным ограничениям социально-экономической активности. Теперь ключевым фактором стало снижение спроса: в условиях неопределенности, на фоне падения доходов население стало сокращать потребление, бизнес стал пересматривать инвестиционные планы. Ряд «пострадавших» отраслей – туризм, транспорт, особенно авиационный, HoReCa (Hotel, Restaurant, Cafe), индустрия развлечений и пр. – вновь был вынужден искусственно ограничить свою деятельность. Еще одним значимым фактором стал обвал рынка нефти, произошедший в марте 2020 г. и приведший к падению как цен на энергоносители, так и физических объемов продаж. Поскольку нефтегазовый сектор формирует львиную долю экспортных доходов России, в нем сложилась непростая ситуация, которая не могла не отразиться на состоянии смежных отраслей и доходах федерального бюджета. Резюмируя, можно сказать, что изменение выручки предприятий Челябинской области в условиях коронакризиса

находится в сложной зависимости от колебаний спроса и предложения внутри самого региона, страны в целом, а также от конъюнктуры внешних рынков.

### 1. Общая постановка задачи

Оценим влияние экономического кризиса, вызванного пандемией COVID-19, на доходы регионального бюджета. Решение поставленной задачи лежит в сфере применения теории управления развитием крупномасштабных систем [3], так как здесь моделируются связанные системы различного уровня, с привлечением факторов мезоэкономики и политик развития организаций.

В рамках более общей многоуровневой модели анализа экономики и управления «страна – регион – предприятие – проект» рассмотрим задачу прогнозирования доходов регионального бюджета с учетом падения экономической активности предприятий. В дальнейшем целесообразно выработка рекомендаций по мерам поддержки предприятий и их влиянию как на предприятие, так и на бюджет.

Оценка и прогнозирование проводились в экспресс-режиме, с помощью укрупненных показателей бюджета и предприятий. С учетом специфики отраслевой структуры и концентрации бизнеса в основных отраслях региона были учтены сценарии влияния кризиса на отдельные крупные или системообразующие предприятия.

Отметим, что данная задача является частным случаем более общей задачи ускоренного развития регионов, которая рассматривается в работах [4–9]. Она также тесно примыкает к задаче оптимизации развития предприятия, описанной в [10–12], поскольку в данном случае внимание сфокусировано на взаимосвязи показателей бюджета региона и результатов финансовой деятельности отдельных предприятий этого региона.

### 2. Приоритетные отрасли и доходы бюджета Челябинской области

Челябинская область входит в Уральский федеральный округ (УФО) и является одним из наиболее значимых в экономическом отношении регионов России. Согласно информации Росстата, ВРП (валовой региональный продукт) Челябинской области<sup>1</sup> составил в 2018 г. 1474 млрд руб. (табл. 1). По этому показателю область находится на 11-м месте среди регионов России.

Ниже (см. рисунок) представлена структура ВРП Челябинской области<sup>2</sup>. Лидером развития экономики региона выступает обрабатывающая промышленность (более одной трети ВРП). В свою очередь основу обрабатывающей промышленности составляют предприятия черной металлургии (по этому показателю Челябинская область занимает первое место в России). Доля металлургии и производства готовых металлических изделий составляет почти 60 % от суммарной выручки предприятий обрабатывающей промышленности региона.

ВРП отдельных регионов России, текущие цены, млрд руб.  
(курсивом выделены регионы УФО)

Таблица 1

GRP of different Russian regions, current prices, bln rub.  
(Regions from Ural federal district italicized)

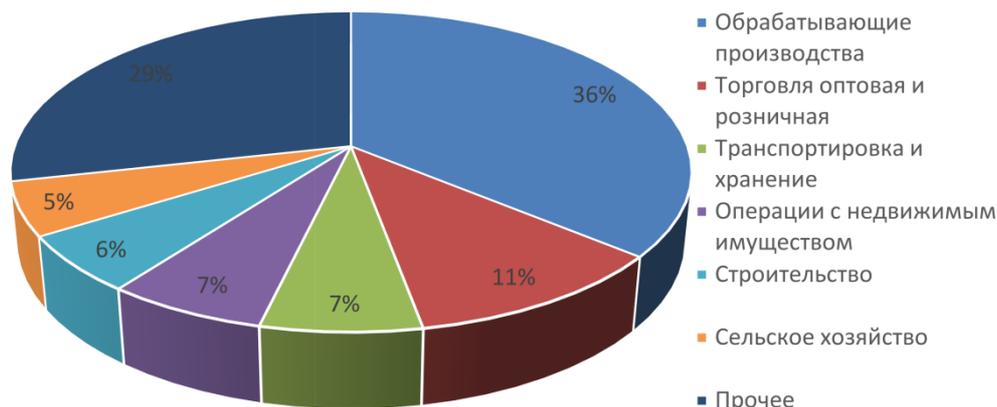
Table 1

	Показатель	2018 г.
	Валовой региональный продукт по субъектам Российской Федерации	84 977
1	г. Москва	17 882
2	<i>Тюменская область</i> <sup>3</sup>	8790
3	Московская область	4202
4	г. Санкт-Петербург	4193
8	<i>Свердловская область</i>	2278
11	<i>Челябинская область</i>	1474

<sup>1</sup> Валовой региональный продукт, в основных ценах. URL: <https://gks.ru/storage/mediabank/VRP98-18.xlsx>.

<sup>2</sup> <http://mininform74.ru/Upload/files/СТРАТЕГИЯ%20ИТОГ.pdf>, с. 312.

<sup>3</sup> Тюменская область вместе с ХМАО и ЯНАО.



Структура ВРП Челябинской области, 2018 г.  
Chelyabinsk region GRP structure, 2018

Значимую роль (в порядке убывания) играют торговля, операции с недвижимым имуществом, транспорт и связь, строительство, сельское хозяйство. Доли этих отраслей в ВРП колеблются между 11,1 и 5,4 % и существенно уступают обрабатывающей промышленности. Стратегия социально-экономического развития Челябинской области на период до 2035 г. [13, с. 311] предусматривает изменение структуры ВРП в пользу более сложных обрабатывающих производств и сферы услуг за счет металлургии и торговли. Таким образом, основным источником наполнения бюджета региона и роста средней зарплаты является реальный сектор экономики, и такая ситуация сохранится в будущем.

Рассмотрим структуру доходной части консолидированного бюджета Челябинской области. Она состоит из налоговых и неналоговых доходов, а также безвозмездных поступлений. В табл. 2 представлена структура доходной части бюджета за 2015–2019 гг. с усредненными за указанный период долями статей доходов.

Доходы консолидированного бюджета Челябинской области, млрд руб.

Таблица 2

Revenues of Chelyabinsk region's consolidated budget, bln rub

Table 2

Источник	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	Средняя доля, %
<b>ВСЕГО ДОХОДОВ</b>	154	163	178	206	215	100,0
<b>НАЛОГОВЫЕ ДОХОДЫ</b>	119	131	144	169	168	79,7
Налог на прибыль организаций	33	37	45	55	49	24,0
Налог на доходы физических лиц	51	55	58	69	73	33,4
Акцизы	6	9	8	9	12	4,8
Налог, взимаемый в связи с применением упрощенной системы налогообложения	5	5	6	8	9	3,6
Налог на имущество организаций	13	13	13	16	12	7,4
Транспортный налог	3	3	3	3	3	1,7
Земельный налог	4	4	4	4	4	2,3
Прочие	4	5	7	5	6	2,3
<b>НЕНАЛОГОВЫЕ ДОХОДЫ</b>	9	8	7	8	9	4,4
<b>БЕЗВОЗМЕЗДНЫЕ ПОСТУПЛЕНИЯ</b>	26	24	27	29	39	15,9

Так, налоговые доходы составили 79,7 % от совокупных поступлений, неналоговые – 4,4 %, а безвозмездные поступления – 14,1 %. В дальнейшем вынесем межбюджетные взаимоотношения за рамки текущего рассмотрения.

В свою очередь в структуре налоговых доходов наибольшую долю (в порядке убывания) составляют налог на доходы физлиц (33,4 %), налог на прибыль (24,0 %), налог на имущество орга-

низаций (7,4 %) и акцизы (4,8 %); в сумме это основная доля доходов регионального бюджета. Эти статьи доходов бюджета являются целевыми для моделирования.

Для характеристики доходной части бюджета Челябинской области следует упомянуть о том, что более четверти поступлений приходится на 10 крупнейших предприятий и организаций<sup>4</sup>. Это, с одной стороны, говорит о значительной концентрации капитала, прежде всего в обрабатывающей промышленности (металлургии и металлообработке), а с другой – делает доходную часть бюджета чувствительной к результату финансовой деятельности небольшого числа налогоплательщиков. Важно отметить, что во время экономического кризиса 2008–2009 гг. Челябинская область оказалась в числе регионов, бюджет которых наиболее пострадал в основном за счет сокращения прибыльности предприятий [14, с. 64].

### 3. Исходные данные

В качестве входящей информации для математической модели использовались данные из следующих источников:

- данные по финансовой отчетности по предприятиям Челябинской области (выборка открытых данных Росстата);
- оперативные данные по выручке предприятий в разрезе видов деятельности по России в целом;
- закон о бюджете Челябинской области на 2020, 2021 и 2022 гг.;
- отчеты об исполнении консолидированного бюджета Челябинской области за 2019–2020 гг.

#### 3.1. Исходные данные по предприятиям Челябинской области

В качестве исходных данных по предприятиям использовалась информация финансовой (бухгалтерской) отчетности организаций согласно открытым данным Росстата за 2012–2018 гг. [15]. Эта информация была сгруппирована и обработана с целью выявления многолетних трендов по предприятиям региона в целом.

Технологической основой, позволившей провести данные расчеты, является построение гиперкуба финансовой отчетности. По техническим возможностям установлено ограничение по выручке – более 100 млн руб. С помощью методов обработки больших массивов данных OLAP (On Line Analytical Processing) исходная финансовая информация была сгруппирована по размеру предприятий и видам деятельности.

В Челябинской области в 2018 г. насчитывалось 2928 предприятий с выручкой более 100 млн руб.<sup>5</sup>. Суммарная выручка этих предприятий в 2018 г. составила 3094 млрд руб. (табл. 3).

Показатели организаций Челябинской области по видам деятельности, 2018 г.

Таблица 3

Activity-based indicators of enterprises of Chelyabinsk region, 2018

Table 3

Вид деятельности	Доля ВРП, %	Величина ВРП, млрд руб.	Кол-во организаций, ед.	Выручка, млрд руб.	Чистая прибыль, млрд руб.	Активы, млрд руб.
1	2	3	4	5	6	7
Общий итог	95,4	1405	2928	3094	156	2413
С. Обрабатывающие производства	36,0	531	575	1467	120	1429
Г. Торговля	11,1	163	1527	1108	15	403
М. Научная деятельность	3,5	52	59	61	2	124
Ф. Строительство	5,8	85	269	127	2	124
А. Сельское хозяйство	5,4	79	49	64	4	95

<sup>4</sup> Бюджет для граждан. URL: <https://zs74.ru/sites/default/files/n/page/28529/upload/itogi-2018.pdf>, с.7. Дата обращения: 15.12.2020.

<sup>5</sup> Организации по виду деятельности «Раздел К. Деятельность финансовая и страховая» не были включены в анализ из-за изменения учетной политики по выручке в 2018 г.

1	2	3	4	5	6	7
Д. Обеспечение электроэнергией	3,0	45	54	69	1	62
В. Добыча полезных ископаемых	2,6	39	41	48	5	56
Л. Недвижимое имущество	6,6	97	78	25	1	57

Примечание. Наименования видов деятельности упрощены для представления в таблице.

На основании анализа и обработки исходных данных по предприятиям Челябинской области были получены следующие результаты.

1. Подготовлены исходные данные для последующей оценки поквартальной выручки предприятий региона в 2019–2020 гг. и прогноза на 2021 г.

2. Произведена оценка налоговой базы по важнейшим налогам, а именно: по налогу на прибыль организаций, налогу на доходы физических лиц, налогу на имущество организаций.

3. Рассчитана зависимость суммарных затрат предприятий от суммарной выручки. Применение методов регрессионного анализа позволило получить разбивку затрат предприятий региона на переменную и постоянную части:

$$З_{74} = \text{Пер}З_{74} + \text{Пост}З_{74} = K_{\text{пер}74} \cdot В_{74} + \text{Пост}З_{74}, \quad (1)$$

где  $В_{74}$  – совокупная выручка предприятий региона;  $\text{Пер}З_{74}$  – суммарные переменные затраты;  $\text{Пост}З_{74}$  – суммарные постоянные затраты;  $K_{\text{пер}74}$  – доля переменных затрат в выручке. Обработка данных за 6 лет (2013–2018 гг.) методом наименьших квадратов (линейная регрессия с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9953$ ) дала результат

$$K_{\text{пер}74(12-18)} = 0,887. \quad (2)$$

Аналогично по данным предыдущих лет рассчитаны другие коэффициенты.

4. Усредненная эффективная ставка налога на прибыль за 2013–2018 гг. составила

$$K_{\text{пр}74(12-18)} = 23,78 \%. \quad (3)$$

5. Усредненная доля фонда оплаты труда (ФОТ) в выручке за 2015–2018 гг. составила

$$K_{\text{ФОТ}74(15-18)} = 18,20 \%. \quad (4)$$

6. Усредненная эффективная ставка налога на имущество за 2015–2018 гг. составила

$$K_{\text{им}74(15-18)} = 3,14 \%. \quad (5)$$

### 3.2. Прочие источники информации

Ежемесячная оперативная статистика о выручке предприятий по видам деятельности по России в целом<sup>6</sup> опубликована Росстатом. Поскольку официальные итоговые цифры по регионам (выручка, национальные счета) публикуются с задержкой, оперативная статистика позволяет определить параметры сценария изменения выручки, сделать предварительную оценку динамики изменений по отраслям месяц к месяцу в рамках одного года и год к году на помесечной основе.

Министерством финансов Челябинской области опубликована информация о законах о бюджете и поправках к нему<sup>7</sup>. Эта информация дает возможность оценить динамику исполнения бюджета по доходам в сравнении с планом.

Ежеквартальные отчеты об исполнении бюджета<sup>8</sup>, опубликованные Минфином региона, позволяют проследить многолетние тренды по динамике доходной части и оценить эффективные налоговые ставки по важнейшим доходным статьям бюджета.

<sup>6</sup> Оборот организаций по видам экономической деятельности. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/UN8h3wSe/oborot\\_mes.xls.xls](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/UN8h3wSe/oborot_mes.xls.xls). Дата обращения: 14.12.20.

<sup>7</sup> Законы об областном бюджете. URL: <https://minfin74.ru/mBudget/law>. Дата обращения: 14.12.20.

<sup>8</sup> Годовая отчетность об исполнении бюджета. URL: <https://minfin74.ru/mBudget/execution/annual>. Дата обращения: 15.12.2020.

#### 4. Сценарий по изменению выручки при коронакризисе

Модель прогнозирования финансового состояния предприятий и доходной части бюджета существенно зависит от внешнего параметра – изменения выручки организаций, которое является сложной функцией колебания спроса и предложения внутри региона, России, а также от конъюнктуры внешних рынков.

Изменение выручки в 2020 г. по кварталам характеризуется значительным падением выручки отдельных видов деятельности по сравнению с аналогичным кварталом предыдущего года. В частности, выручка по добыче полезных ископаемых уменьшилась на 37 %, по гостиничной деятельности и общепиту (HoReCa) – на 47 %, но увеличилась в области информации и связи на 7 %. Суммарная выручка за 2 кв. 2020 г. уменьшилась на 8,9 % по сравнению с аналогичным периодом предыдущего года.

Детальный прогноз предполагает наличие нескольких сценариев (например, базового, оптимистического и пессимистического) и, соответственно, нескольких матриц коэффициентов, на основании которых проводится свой модельный расчет. В рамках данной статьи рассмотрен базовый сценарий.

В модельной части эти оценки правильно назвать экспертными, так как дополнительных моделей по их расчету на текущий момент не выявлено, только экспертные содержательные обоснования, базирующиеся на анализе фактической динамики выручки предприятий каждой отрасли в условиях разворачивающегося коронакризиса, наряду с учетом инерционного тренда отрасли.

Сценарий изменений выручки на последующие периоды в форме матрицы коэффициентов представлен ниже (табл. 4). Следует отметить, что со 2 кв. 2021 г. намечен восстановительный рост по сравнению со 2 кв. 2020 г.

Базовый коэффициент снижения выручки применен к деятельности гостиниц и предприятий общественного питания, транспортной отрасли. Повышающие коэффициенты были применены к выручке предприятий сельского хозяйства, информации и связи, здравоохранения и социальных услуг, образования. Прогнозирование существенного уменьшения выручки в 1 кв. 2021 г. обусловлено высокой базой докризисного 1 кв. 2020 г.

Таблица 4

Сценарий изменения выручки предприятий Челябинской области,  
проценты к аналогичному кварталу предыдущего года

Table 4

Change of Chelyabinsk region enterprises sales scenario,  
percentage to similar quarter of previous year

Виды деятельности	4 кв. 2020	1 кв. 2021	2 кв. 2021	3 кв. 2021	4 кв. 2021
A. Сельское хозяйство	14,3	10,0	10,0	10,0	10,0
B. Добыча полезных ископаемых	-12,9	-12,9	10,0	5,0	5,0
C. Обрабатывающие производства	-1,1	-7,0	5,0	5,0	5,0
D. Обеспечение электроэнергией	3,3	7,0	3,0	3,0	3,0
E. Водоснабжение	10,4	5,0	5,0	5,0	5,0
F. Строительство	9,2	-5,0	-2,0	-2,0	-2,0
G. Торговля	7,0	5,0	7,0	7,0	7,0
H. Транспортировка и хранение	-13,5	-7,0	5,0	5,0	5,0
I. Деятельность гостиниц...	-22,6	-22,6	10,0	10,0	10,0
J. Информация и связь	16,2	15,0	15,0	15,0	15,0
M. Наука	2,7	0,0	5,0	5,0	5,0
N. Деятельность административная	7,0	5,0	5,0	5,0	5,0
P. Образование	6,2	10,0	5,0	5,0	5,0
Q. Здравоохранение и социальные услуги	-4,2	-4,2	5,0	5,0	5,0
R. Культура, спорт, досуг и развлечения	6,6	6,6	7,0	7,0	7,0
S. Предоставление прочих видов услуг	-20,0	-20,0	30,0	10,0	10,0

### 5. Математическая модель

Моделирование проводится в рамках следующих основных предположений.

- Выручка учитывается в текущих ценах.
- Рассматривается консолидированный бюджет региона и муниципальных образований.
- Налоги оплачиваются в текущем периоде. Для модели бюджета не различаются начисления и оплата.
- Доля неуплаты налогов одинаковая для всех налогов.
- Оценки налоговых баз по видам налогов по бухгалтерскому и налоговому учету одинаковы.
- Эффективные налоговые ставки неизменны.
- Квартальная разбивка годовой выручки предприятий Челябинской области по видам деятельности в 2018 г. совпадает с соответствующей разбивкой выручки предприятий по России в целом.
- Динамика поквартальной выручки предприятий Челябинской области по видам деятельности в 2019–2020 гг. совпадает с соответствующей разбивкой выручки предприятий по России в целом.

Запишем доходы консолидированного регионального бюджета в следующем виде:

$$BI = \sum_i \sum_k d_k B_{ik} r_k \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $BI$  – доходы бюджета;  $B_{ik}$  – налоговая база;  $r$  – ставка налогов;  $d$  – доля налогов, зачисляемая в консолидированный региональный бюджет;  $i$  – индекс предприятия;  $k$  – индекс вида налогов.

Будем считать, что налоговая база по каждому налогу определяется по финансовой отчетности как некоторая функция

$$B_{ik} = F_{ik}(PL, BS, Oth), \quad (7)$$

где  $F$  – функция определения налоговой базы;  $PL$  – отчет о финансовых результатах (доходах/расходах);  $BS$  – баланс;  $Oth$  – другие источники определения налоговой базы.

В условиях кризиса оценка доходов бюджета составляет новую, уменьшенную величину из-за уменьшения деловой активности и налоговой базы:

$$BI^f = \sum_i \sum_k d_k B_{ik}^f r_k, \quad (8)$$

где  $BI^f$  – прогнозные доходы бюджета в условиях кризиса;  $B_{ik}^f$  – прогнозная налоговая база в условиях кризиса.

### 6. Результаты расчетов

Алгоритм моделирования влияния коронакризиса на доходы регионального бюджета можно разбить на следующие шаги:

- 1) прогнозирование выручки предприятий;
- 2) оценка и прогнозирование налоговой базы предприятий и эффективных ставок по ключевым налогам – доходным статьям консолидированного регионального бюджета;
- 3) оценка и прогнозирование динамики наполнения доходных статей консолидированного регионального бюджета;
- 4) прогноз величины недополученных доходов бюджета.

#### 6.1. Прогнозирование выручки предприятий

Основным объектом прогнозирования выступает динамика выручки предприятий, которая зависит от двух факторов: инерционного тренда и внешнего воздействия.

Внешнее воздействие может быть обусловлено важными управленческими решениями, направленными на изменение сложившегося тренда (стратегии развития региона, отрасли, предприятия, важные инвестиционные решения и пр.) или форс-мажорными обстоятельствами (экономическими кризисами, природными катаклизмами и пр.). В нашем случае в роли такого внешнего воздействия выступает коронакризис.

Поскольку регулярные отчеты об исполнении бюджета ведутся поквартально, целесообразно произвести оценку и спрогнозировать динамику поквартальной выручки предприятий региона в разрезе видов деятельности.

Так как представление отчетности предприятий и бюджетов происходит с некоторой задержкой, используем в данном анализе следующие термины: 2018 г. – предбазовый период, 2019 г. – базовый период, 2020–2021 – прогнозный период. Открытые данные Росстата обеспечивают информацию о финансовой отчетности организаций за предбазовый период, поэтому необходимы дополнительные расчеты по оценке показателей в базовом периоде.

**Шаг 1.** Сгруппируем данные о месячной выручке предприятий по России в целом за предбазовый период для каждого вида деятельности поквартально. На основании соотношения поквартальной выручки выведем весовые коэффициенты (доли, коэффициенты сезонности) для каждого квартала. В соответствии с этими долями разобьем годовую выручку предприятий Челябинской области за предбазовый период по каждому виду деятельности на кварталы.

**Шаг 2.** Далее сгруппируем месячную выручку предприятий по России в целом по видам деятельности за базовый период поквартально. На основании соотношения «квартал к соответствующему кварталу прошлого года» рассчитаем набор коэффициентов, характеризующий изменение выручки поквартально. Последовательно применим данный набор коэффициентов к исходной оценке поквартальной выручки предприятий региона по видам деятельности за предбазовый период и получим оценку поквартальной выручки предприятий региона за базовый период.

**Шаг 3.** Спрогнозируем поквартальную выручку по предприятиям Челябинской области по видам деятельности на прогнозный период в соответствии с матрицей прогнозных коэффициентов.

### **6.2. Оценка и прогнозирование налоговой базы предприятий и эффективных ставок по ключевым налогам – доходным статьям консолидированного регионального бюджета**

Основную долю в доходной части консолидированного бюджета Челябинской области составляют налоговые поступления, среди которых важнейшую роль играют налог на прибыль, налог на доходы физлиц, акцизы и налог на имущество. Проиллюстрируем алгоритм прогнозирования на примере налога на прибыль.

Для оценки налоговой базы предприятия по налогу на прибыль используем следующую упрощенную модель

$$\text{НП}_{t+1} = \text{НП}_t + K_{\text{пр}74} \cdot (V_{t+1} - V_t) \cdot (1 - K_{\text{пер}74}), \quad (9)$$

где НП – налог на прибыль; V – суммарная выручка предприятий региона;  $K_{\text{пр}74}$  – эффективная ставка налога на прибыль;  $K_{\text{пер}74}$  – доля переменных затрат в выручке; «74» – индекс региона.

Полученная рекурсивная формула позволяет рассчитать прогнозную величину совокупного налога на прибыль в последующем периоде в зависимости от величины налога в текущем периоде, динамики совокупной выручки, эффективной налоговой ставки и доли переменных затрат в выручке.

Расчет налога на прибыль скорректирован на его изменение для крупных региональных налогоплательщиков.

Действуя по аналогии, спрогнозируем динамику налоговой базы по прочим крупным статьям, к числу которых отнесем:

- налог на доходы физлиц;
- акцизы;
- налог на имущество.

Прогноз прочих доходных статей бюджета формируется по данным базового периода.

### **6.3. Оценка доходных статей регионального бюджета**

В результате постатейного прогнозного расчета наполнения статей консолидированного бюджета региона<sup>9</sup> получены следующие данные (табл. 5).

<sup>9</sup> Без учета межбюджетных трансфертов.

Прогноз доходной части консолидированного бюджета  
Челябинской области, млн руб.

Table 5

Chelyabinsk region consolidated budget revenues forecast, mln rub.

Показатель	4 кв. 2020 г.	1 кв. 2021 г.	2 кв. 2021 г.	3 кв. 2021 г.	4 кв. 2021 г.
НАЛОГОВЫЕ И НЕНАЛОГОВЫЕ ДОХОДЫ	53 030	40 777	42 005	44 539	53 612
НАЛОГОВЫЕ ДОХОДЫ	51 100	39 069	40 554	42 936	51 682
Налог на прибыль организаций	13 106	9988	12 200	10 598	14 499
Налог на доходы физических лиц	22 078	18 660	18 126	21 016	23 306
Акцизы	3213	2704	2414	3063	3213
Налог, взимаемый в связи с применением упрощенной системы налогообложения	2069	1764	2282	2306	2069
Единый налог на вмененный доход	232	274	194	158	232
Единый сельскохозяйственный налог	6	79	10	28	6
Патентная система	51	53	13	9	51
Налог на имущество физических лиц	688	81	48	87	688
Налог на имущество организаций	5415	3376	3376	3376	3376
Транспортный налог	2004	504	326	423	2004
Земельный налог	1287	868	768	898	1287
Налог на добычу полезных ископаемых	598	430	541	638	598
Иные налоговые доходы	353	288	256	337	353
НЕНАЛОГОВЫЕ ДОХОДЫ	1930	1708	1451	1603	1930

#### 6.4. Прогноз величины недополученных доходов бюджета

Ежегодно принимаемый законодательным собранием региона и утверждаемый губернатором Закон о бюджете на 3 года содержит информацию о сводных данных. В ежемесячном отчете об исполнении годового консолидированного бюджета содержится постатейная разбивка на текущий год.

Сравнение плановой суммы доходов регионального бюджета без трансфертов (179 059 млн руб.) с прогнозной (170 665 млн руб.) дает основание предположить, что в 2020 г. бюджет региона недополучит около 5 % доходов.

Задача анализа дефицита регионального бюджета и источников его покрытия может быть рассмотрена в последующих работах.

#### Заключение

В работе поставлена задача анализа и прогнозирования взаимосвязанного экономического развития страны, регионов и предприятий.

Конкретный вид модели разработан для прогноза доходов регионального бюджета в условиях коронакризиса. Рассмотрены две связанные модели: доходы бюджета и развития организаций. Основным влияющим фактором рассмотрено падение деловой активности, вызванной самоизоляцией в условиях коронакризиса.

Проведен прогноз доходов регионального бюджета с учетом изменения налоговой базы предприятий.

Дополнительной возможностью для последующих расчетов является оценка влияния мер по поддержке бизнеса, принятых федеральным и региональным правительствами [16].

Данная работа предполагает развитие и расширение как по охвату уровней управления, так и с точки зрения рассматриваемых регионов, отраслей, предприятий.

### Литература

1. Зубаревич, Н.В. Пандемия и регионы: итоги января-августа 2020 г. / Н.В. Зубаревич // *Экономическое развитие России*. – 2020. – Т. 27, вып. 11. – С. 91–95.
2. Зубаревич, Н.В. Регионы России в острой фазе коронавирусного кризиса: отличия от предыдущих экономических кризисов 2000-х. / Н.В. Зубаревич, С.Г. Сафронов // *Региональные исследования*. – 2020. – № 2. – С. 4–17. DOI: 10.5922/1994-5280-2020-2-1
3. *Управление развитием крупномасштабных систем (Современные проблемы. Вып. 3)* / под науч. ред. А.Д. Цвиркуна. – М.: Физматлит, 2018. – 528 с.
4. Логиновский, О.В. Формирование стратегии социально-экономического развития субъекта РФ в современных условиях / О.В. Логиновский, С.А. Золотых, А.С. Халдин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 96–103. DOI: 10.14529/ctcr200310
5. Дранко, О.И. Подход к повышению эффективности управления экономическим развитием регионов России на примере Челябинской области / О.И. Дранко, С.А. Приказчиков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 93–104. DOI: 10.14529/ctcr200209
6. Ириков, В.А. Целостная система государственно-частного управления инновационным развитием как средство удвоения темпов выхода России из кризиса и посткризисного роста / В.А. Ириков, Д.А. Новиков, В.Н. Тренёв. – М.: ИПУ РАН, 2009. – 220 с.
7. Переход региона на инновационное развитие: пример проекта системы управления инновационным развитием Владимирской области / В.Н. Бурков, А.В. Боровкова, В.В. Веретенников и др.; под ред. В.А. Ирикова. – М.: ИПУ РАН, 2011. – 126 с.
8. Ириков, В.А. Практические предложения по получению социально-экономических результатов прорывного развития за 2-3 года / В.А. Ириков. – М.: Первый Том, 2018. – 184 с.
9. Нижегородцев, Р.М. Прогнозирование показателей социально-экономического развития региона / Р.М. Нижегородцев, Е.И. Пискун, В.В. Кудревич // *Экономика региона*. – 2017 – Т. 13, вып. 1 – С. 38–48. DOI: 10.17059/2017-1-4
10. Ковалев, В.В. Финансовый менеджмент: теория и практика / В.В. Ковалев. – М.: Проспект, 2014. – 1094 с.
11. Брейли, Р. Принципы корпоративных финансов: пер. с англ. / Р. Брейли, С. Майерс. – 7-е изд. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2017. – 1008 с.
12. Дранко, О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций / О.И. Дранко // *Проблемы управления*. – 2007. – № 1. – С. 37–40.
13. *Стратегия социально-экономического развития Челябинской области на период до 2035 года*. – <http://mininform74.ru/Upload/files/стратегия%20итог.pdf> (дата обращения: 10.12.2020).
14. Зубаревич, Н.В. Регионы России: неравенство, кризис, модернизация / Н.В. Зубаревич. – М.: Независимый институт социальной политики, 2010. – 160 с.
15. *Бухгалтерская (финансовая) отчетность предприятий и организаций за 2018 год*. – Москва, 2020. – <https://www.gks.ru/opendata/7708234640-7708234640bdb002018> (дата обращения: 10.11.2020).
16. Дранко, О.И. Многоуровневая система моделирования доходов регионального бюджета в условиях коронакризиса / О.И. Дранко // *Труды 13-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2020)*. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 30–36.

**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.

**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; loginovskiiov@susu.ru.

**Приказчиков Сергей Александрович**, младший научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва; prikazchikovs@yandex.ru.

Поступила в редакцию 20 декабря 2020 г.

## MODELING OF IMPACT OF THE CRISIS ON REGIONAL BUDGET REVENUES: ANALYSIS OF CHELYABINSK REGION

O.I. Dranko<sup>1</sup>, olegdranko@gmail.com,  
O.V. Loginovskiy<sup>2</sup>, loginovskiiiov@susu.ru,  
S.A. Prikazchikov<sup>1</sup>, prikazchikovs@yandex.ru

<sup>1</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

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

The economic crisis caused by the COVID-19 pandemic leads to a significant drop in incomes and tax payments. We consider express modeling of regional budget revenues depending on the depth of the crisis. The assessment is made for one of the Russian regions – the Chelyabinsk region. **Purpose of the study.** To build a mechanism based on available statistics for express estimation of the regional budget revenues. The comprehensive model for forecasting the region's enterprises' financial results, followed by a forecast of the regional budget revenues, was worked out. **Materials and methods.** Simulation models of macroeconomic indicators of the region's budget revenues are used in conjunction with enterprises' financial forecasting models. Big Data Analytics was applied to process financial statement data of the regional enterprises. **Results.** The model links the change in enterprises' financial results with the regional budget revenue dynamics. Based on scenario assumptions, the calculation of the change in financial results and tax bases of regional enterprises was made and the estimation of their contribution to the regional budget. The model allowed to form a forecast of revenues of the budget in the COVID-19 pandemic conditions. **Conclusion.** This approach combines meso- and microeconomics approaches and simulates the region's economic development as a multilevel system. The proposed model is universal and can be applied to consider the development of any Russian region.

*Keywords: multilevel growth management system, simulation modeling, enterprise development, regional development, COVID-19 pandemic, Big Data, OLAP.*

### References

1. Zubarevich N.V. [Pandemic and Regions: January-August 2020 Results]. *Russian Economic Development*, 2020, vol. 27, no. 11, pp. 91–95. (in Russ.)
2. Zubarevich N.V., Safronov S.G. [Russian Regions in the Acute Phase of the Coronavirus Crisis: Differences from Previous Economic Crises of the 2000s]. *Regional Research of Russia*, 2020, vol. 10, no. 4, pp. 443–453. (in Russ.) DOI: 10.5922/1994-5280-2020-2-1
3. Tsvirkun A.D. (ed.). *Upravleniye razvitiyem krupnomasshtabnykh sistem (Sovremennyye problemy. Vyp. 3)* [Management of the development of large-scale systems (Modern problems. Issue 3)]. Moscow, Fizmatlit, 2018. 528 p.
4. Loginovskiy O.V., Zolotykh S.A., Khaldin A.S. [Formation of the Strategy of Socio-Economic Development of the Subject of Russian Federation in Modern Conditions]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 96–103. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200310.
5. Dranko O.I., Prikazchikov S.A. [Approach to Improving the Effectiveness of Managing the Economic Development of the Regions of Russia on the Example of the Chelyabinsk Region]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 93–104. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200209
6. Irikov V.A., Novikov D.A., Trenev V.N. *Tselostnaya sistema gosudarstvenno-chastnogo upravleniya innovatsionnym razvitiyem kak sredstvo udvoeniya tempov vykhoda Rossii iz krizisa i postkrizisnogo rosta* [A Holistic System of Public-Private Management of Innovative Development as a Means of Doubling the Pace of Russia's Exit from the Crisis and Post-Crisis Growth]. Moscow, Publishing House of the Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, 2009. 220 p.

7. Burkov V.N., Borovkova A.V., Veretennikov V.V. et al.; Irikov V.A. (ed.). *Perekhod regiona na innovatsionnoye razvitiye: primer proyekta sistemy upravleniya innovatsionnym razvitiyem Vladimirskoy oblasti* [Transition of a region to innovative development: an example of a project for a management system for innovative development of the Vladimir region]. Moscow, IPU RAN, 2011. 126 p.

8. Irikov V.A. *Prakticheskiye predlozheniya po polucheniyu sotsial'no-ekonomicheskikh rezul'tatov proryvnogo razvitiya za 2-3 goda* [Practical proposals for obtaining socio-economic results of breakthrough development in 2-3 years]. Moscow, First Volume Publ., 2018. 184 p.

9. Nizhegorodtsev R.M., Piskun E.I., Kudrevich V.V. [The Forecasting of Regional Social and Economic Development]. *Economy of Region*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 38–48. (in Russ.) DOI: 10.17059/2017-1-4

10. Kovalev V.V. *Finansovyy menedzhment: teoriya i praktika* [Financial management: theory and practice]. Moscow, Prospect Publ., 2014. 1094 p.

11. Brealey R., Meyers S. *Printsipy korporativnykh finansov* [Principles of Corporate Finance]. Moscow, Olymp-Business, 2017. 1008 p.

12. Dranko O.I. [A Financial Prediction Model and Home Investment scenarios]. *Control Sciences*, 2007, no. 1, pp. 37–40. (in Russ.)

13. *Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Chelyabinskoy oblasti na period do 2035 goda* [The Strategy of Socio-Economic Development of the Chelyabinsk Region for the Period until 2035 Year]. Available at: <http://mininform74.ru/Upload/files/стратегия%20итор.pdf> (accessed 10.12.2020).

14. Zubarevich N.V. *Regiony Rossii: neravenstvo, krizis, modernizatsiya* [Regions of Russia: inequality, crisis, modernization]. Moscow, Independent Institute for Social Policy, 2010. 160 p.

15. *Bukhgalterskaya (finansovaya) otchetnost' predpriyatiy i organizatsiy za 2018 god* [Accounting (Financial) Statements of Enterprises and Organizations for 2018]. Moscow, 2020. Available at: <https://www.gks.ru/opendata/7708234640-7708234640bdboo2018> (accessed 03.12.2020).

16. Dranko O.I. *Mnogourovnevaya sistema modelirovaniya dokhodov regional'nogo byudzheta v usloviyakh koronakrizisa* [A Multilevel System for Modeling Regional Budget Revenues in the Context of a Coronavirus Crisis]. *Proceedings of the 13th International Conference "Managing the Development of Large-Scale Systems" (MLSD'2020)*. Moscow, ICS RAS, 2020, pp. 30–36. (in Russ.)

**Received 20 December 2020**

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дранко, О.И. Модель влияния кризиса на доходы регионального бюджета: анализ Челябинской области / О.И. Дранко, О.В. Логиновский, С.А. Приказчиков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 90–101. DOI: 10.14529/ctcr210109

#### FOR CITATION

Dranko O.I., Loginovskiy O.V., Prikazchikov S.A. Modeling of Impact of the Crisis on Regional Budget Revenues: Analysis of Chelyabinsk Region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 90–101. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210109

# СИТУАЦИОННО-ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ АВИАПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**В.В. Антонов<sup>1</sup>, К.А. Конев<sup>1</sup>, В.А. Суворова<sup>1</sup>, Г.Г. Куликов<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния» холдинга «Технодинамика», г. Уфа, Россия

В настоящей статье предлагается усовершенствованная методология разработки систем поддержки принятия решений, разработанная на основе ситуационной схемы решения человеком поведенческих задач. В предлагаемой методологии предлагается подход к решению задачи поддержки принятия решений на основе онтологической модели организации (бизнес-процесса), содержащей информацию о типовых ситуациях, их признаках, вариантах (сценариях) решений и показателях для выбора этих решений. Разработан интеллектуальный механизм «узнавания» состояний типовых ситуаций на основе категоризации и использования полученной иерархии их состояний и признаков. Предложен общий подход к поддержанию онтологической модели в актуальном состоянии. Рассмотрены примеры применения методологии для предприятия авиаприборостроения.

*Ключевые слова:* принятие решений, онтологическая модель, ситуационное моделирование, категоризация, типовая ситуация, сценарий решения, бизнес-процесс.

## Введение

Мировой кризис, связанный с приближающейся сменой одной разновидности капитализма на другую, неизбежно ставит вопрос о новых подходах не только в общественной, но и в производственной сферах, поскольку время перемен всегда предоставляет окно возможностей для инноваций и свежих идей. При этом, несмотря на небывалое распространение информационных технологий и связанных с ними высокотехнологичных методов обработки информации, важнейшие решения на всех уровнях управления до сих пор принимаются с опорой главным образом на интуицию конкретного индивида. Эта проблема проистекает из чрезвычайной сложности, а значит, и дороговизны существующих интеллектуальных инструментов, требующих как дорогостоящего аппаратного и программного обеспечения, так и, что ещё важнее, очень высококомпетентного персонала. Такой подход никогда не найдёт достаточной поддержки ни у финансистов, диктующих сегодня экономическую моду, ни у управленцев, которые не склонны доверять запутанным алгоритмам больше, чем собственному опыту. Поэтому необходима интеллектуальная методология принятия решений, которая будет дружественна к ЛПП, позволит сохранять опыт экспертов, но будет иметь внутренние механизмы, позволяющие её оценить.

В настоящей статье, пользуясь классическими кибернетическими принципами, мы попытались на основе принципов принятия решений в результате восприятия окружающей обстановки человеком предложить подход к построению структуры и основных компонентов системы поддержки принятия решений, которая станет более удобной для ЛПП и экспертов.

## 1. Ситуационная схема принятия решений человеком

Механизм познания мира человеком более-менее известен. Сначала человек оценивает ситуацию и подсознательно производит категоризацию всех её элементов по известным ему типам: по степени важности, по опасности, положению в пространстве и т. д. В результате человек может понять, где он, когда и что с ним происходит. Затем человек формирует варианты реакции на ситуацию (действия). Если время для реакции очень ограничено, то реализуется наиболее типичное для данного человека действие, отражающее его темперамент (паника, агрессия, бездействие,

истерика и т. д.) [5, 16]. Если ситуация не слишком динамичная, то человек может сформировать и оценить алгоритмы вариантов своих действий (сценарии), которые можно интерпретировать как план или проект. При изменении ситуации и появлении новых её элементов, которые меняют её понимание человеком, может изменяться и набор вариантов реагирования, а также их приоритеты, о чём писал ещё Д.А. Пospelov [13] (рис. 1).

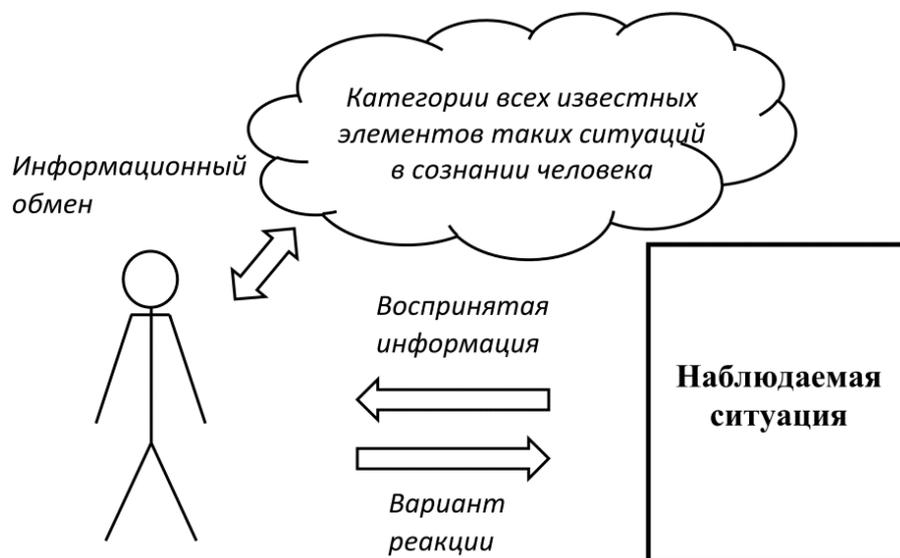


Рис. 1. Упрощённая ситуационная схема решения поведенческих задач человеком  
Fig. 1. Simplified situational scheme for solving behavioral tasks by a person

Подобная схема взаимодействия с окружающим миром хорошо изучена и давно реализуется в робототехнике. Однако современные роботы способны главным образом на примитивные механические действия и реакции. Восприятие ими реальности крайне примитивно, не формирует целостной картины мира, поэтому оно ещё очень далеко от когнитивных возможностей человека [14, 18]. Поэтому в организационных управленческих процессах роль интеллектуального центра безоговорочно передаётся человеку, а интеллектуальные системы используются в основном как советующий сервис.

В рамках разрабатываемого подхода предлагается сделать ведущей для интеллектуальных систем не только советующую, но также и верифицирующую функцию. Например, при принятии решений чиновником о распределении ресурсов, интеллектуальная система может сначала предложить ему оптимальный вариант решения, а в случае выбора иного – сообщить об этом в надзорные органы с тем, чтобы он объяснил на фактах, почему его выбор лучше, чем у беспристрастной программы, учитывающей множество факторов и параметров, а также совершенно не подверженной коррупции.

Основу интеллектуального механизма методологии предлагается построить на механизме категоризации. Категоризация – это процесс отнесения познаваемого объекта к некоторому классу, в качестве которого могут выступать не только названия материальных предметов, но и сенсорные и перцептивные образцы, социальные стереотипы, эталоны поведения – в целом, обобщения, несущие в себе совокупный общественный опыт [1]. Пример категоризации для несколько иной предметной области приведён, например в [12].

Предлагается осуществлять категоризацию в два этапа, по известной со времён Древней Греции двухтактной схеме «анализ – синтез», но в привязке к организационному управлению и на основе интеллектуальных методов сбора, анализа и обработки данных с выходом на конкретные алгоритмы построения системы поддержки принятия решений для конкретного типа ситуации, что и отличает предлагаемую методологию от известных и позволяет обосновать её практическую значимость.

Отметим, что предлагаемая методология наиболее эффективна для применения к типовым ситуациям принятия решений, для которых определён примерный перечень основных участни-

ков ситуации и их состояний. Это ограничение, которое несколько снижает возможности применения предлагаемой методологии для малоизученных, обладающих значительной неопределённостью ситуаций. Однако для неопределённых ситуаций возможно привлечение экспертов (созыв совещания, проведение мозгового штурма и т. д.) и формирование описания ситуации на основе экспертной оценки, после чего она становится такой же «типовой», как все остальные. Естественно, для менеджеров, которые постоянно работают в обстановке существенной неопределённости (например, высший менеджмент организации), данная методология в её нынешнем виде может быть не эффективна.

### 2. Анализ и синтез управленческих ситуаций

На начальном (аналитическом) этапе категоризации наблюдаемых в ситуации принятия решений элементов производится анализ состояния ситуации, т. е. формирование машинного «узнавания» – выбора категории, к которой относится каждый объект в ситуации, например, в следующих срезах:

- типизация объектов, процессов или явлений;
- ранжирование их в рамках ситуации;
- отсечение малозначимых;
- типизация состояний значимых объектов, процессов или явлений.

Для каждой типовой ситуации формируется ситуационная модель, которая описывает множество типов участвующих объектов, процессов или явлений (элементов), которые имеют измеримые признаки или явные идентификаторы, однозначно относящие их к категории по четырём базовым элементам: функции, ресурсы, правила и цели. Кроме того, для каждого элемента формируется перечень свойств, измеримый набор значений которых позволяет с высокой вероятностью по каждой комбинации значений свойств элемента относить его к некоторым состояниям. Причём типизация элемента производится итерационно: сначала анализируется набор базовых свойств, который делит элементы на классы, например, на объекты, процесс, явления, затем свойств классов, которые определяют важные свойства для, например, объектов (живой, имеет явные границы, способен к самодвижению и т. д.) и так далее до нужного уровня детализации.

Следует определиться с понятием типовой ситуации. С точки зрения учебника [15], ситуация – одноактность и неповторимость возникновения множества событий, стечения всех жизненных обстоятельств и положений, открывающихся восприятию и деятельности человека. Из данного определения понятие «типовая ситуация» кажется неологизмом. Однако если для взаимодействующих в процессе реализации деятельности (выполнения функций) ресурсов, реализующихся по определённым правилам для достижения определённых организационных целей, определить некоторый набор внешних и внутренних условий, то при воспроизведении данных условий для схожего набора функций, ресурсов, правил и целей с высокой долей вероятности будет воспроизведена и сложившаяся ситуация. Например, ситуация согласования документа конкретным руководителем может воспроизводиться с точностью до фраз, которые он произносит в процессе общения с просителем, и все варианты её развития могут быть просчитаны. Иными словами, типовая ситуация – это наблюдаемое состояние ситуации на объекте управления, которое характеризуется набором известных параметров и которое можно повторить. В контексте обсуждения технологического механизма решения задачи принятия решения грамотнее говорить «состояние типовой ситуации», а при описании совокупности состояний ситуации определённого типа условимся называть это «типовая ситуация».

Обратим внимание, что типовую ситуацию необходимо отличать от функции. Хотя структура функциональной деятельности как совокупности работ (операций) и структура ситуации во многом совпадают, их физический смысл соответственно в функциональной и ситуационной моделях различен. Ситуация существует во времени, её состояния достаточно жестко детерминированы шкалой времени. Для функционального описания время учитывается опционально и не является обязательным параметром. Именно вопрос учёта времени делает ситуации неповторимыми. Но если рассматривать время не абсолютно, а по интервальной шкале (за час, за день, за месяц и т. д.), то уникальная в конкретный момент времени ситуация становится типовой на некоторой выборке по времени и может наблюдаться несколько раз в день, в месяц и т. д.

Если перенести ситуационную схему решения поведенческих задач человеком (см. рис. 1) в термины принятия решений, то получим укрупнённую схему принятия решения на основе анализа типовых ситуаций (рис. 2).

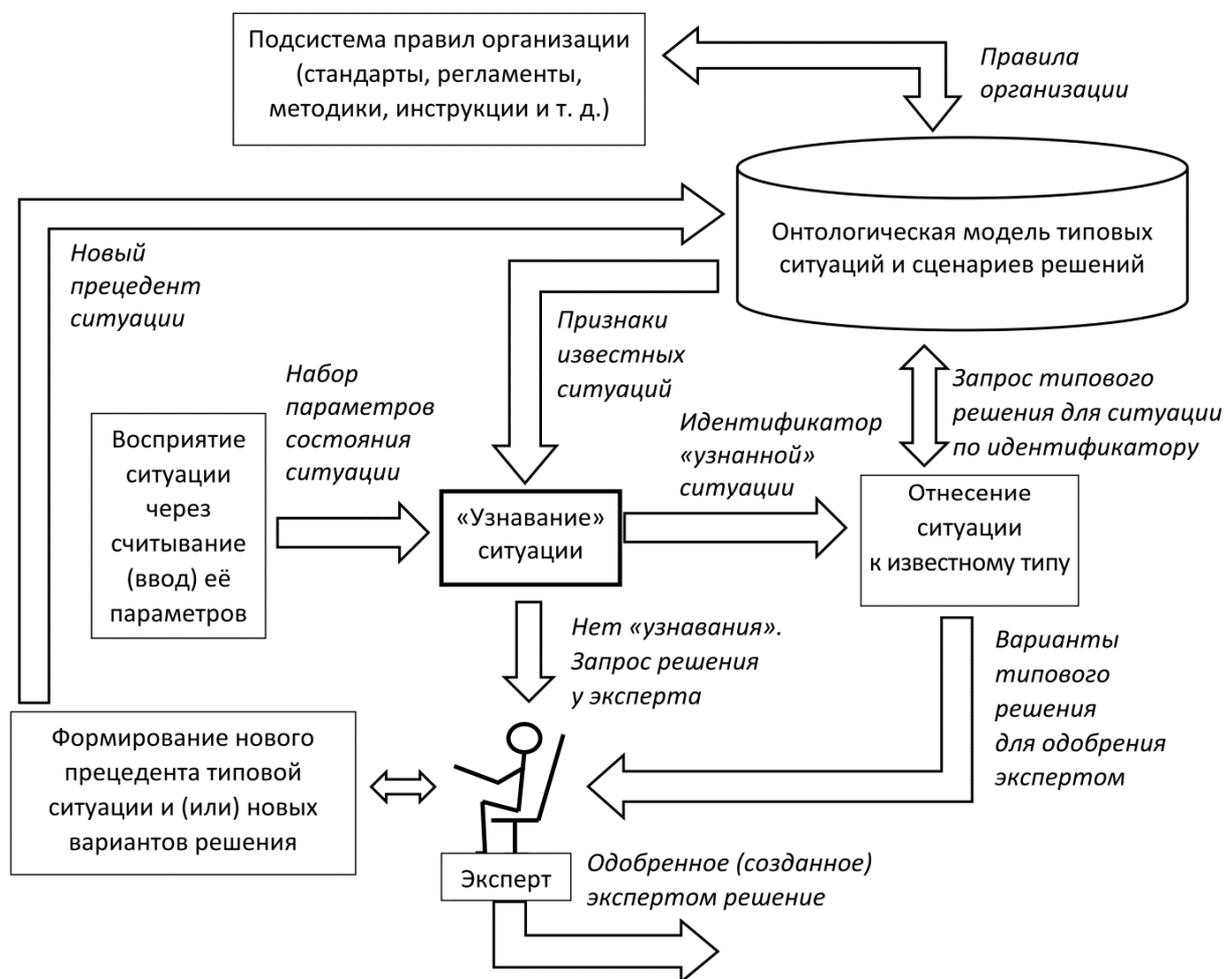


Рис. 2. Укрупнённая схема принятия решения на основе анализа типовых ситуаций  
Fig. 2. An enlarged decision-making scheme based on the analysis of typical situations

Если элементы в ситуации практически постоянны, то «узнавание» может ограничиваться двумя итерациями:

- идентификация типа элемента;
- идентификация значимых свойств элемента.

В любом случае, сколько бы уровней дерево не включало, на каждом уровне должен быть вариант – новый элемент, который позволит расширить знания о ситуации, формируя уровень обучения системы.

Например, для ситуации, когда нужно принять решение о том, что надеть для выхода на улицу, для простоты примем, что человек может использовать два типа свойств: свойства сохранять температуру и свойства соответствия заданному стилю. Упростим ситуацию и допустим, что погода меняется не очень сильно и человек рассматривает только 2 типа вещей ( $T$ ): теплые и легкие, каждый из которых делится на защищающие от дождя и не защищающие.

$$T = \{W_1, W_2\}, \quad (1)$$

где  $W_i$  – типы одежды по защите от холода, причём

$$W = \{R_1, R_2\}, \quad (2)$$

где  $R_j$  – типы одежды по защите от дождя.

Допустим человек использует 3 вида стиля ( $St$ ): парадный, деловой и повседневный. Каждый стиль выбирается для определённого типа мероприятий. Для праздников или важных дат – парадный, для работы или серьёзных встреч – деловой, для похода по магазинам или прогулок – повседневный.

$$St = \{st_k\}, \quad (3)$$

где  $st_k$  – вид мероприятия.

Каждое утро после завтрака человек будет собирать информацию о дне недели, о намечающихся мероприятиях, о состоянии погоды и на основе анализа этих данных формировать «портрет» ситуации ( $M$ ), который подскажет, какого рода стиль и из каких вещей ему выбрать.

$$M = \{T, St\}, \quad (4)$$

Если задать количественные параметры на каждую рассмотренную характеристику, например, показания термометра или день недели, то можно получить автоматическое определение нужного стиля и типа вещей.

Аналогично рассмотренному примеру можно разработать механизм распознавания состояния для поддержки принятия решений в типовой ситуации для практически любого организационного процесса.

### 3. Метод «узнавания» состояния типовой ситуации

Для наглядности рассмотрим ситуацию обслуживания в отделении банка, оснащённого системой электронной очереди. Прежде чем получить возможность пообщаться с сотрудником банка, мы должны зарегистрировать заявку, но для этого следует выбрать нужный тип запроса («банковские карты», «кредиты», «справки» и т. д.), а после того, как очередь подошла, сотрудник банка задаёт несколько вопросов, чтобы окончательно уточнить параметры ситуации, с которой ему придётся разбираться и принимать какие-то решения. Таким образом, типовая управленческая ситуация может иметь очень сложную систему признаков, которые следует категоризировать в виде дерева, число уровней которого может быть различным для различных ситуаций (рис. 3).

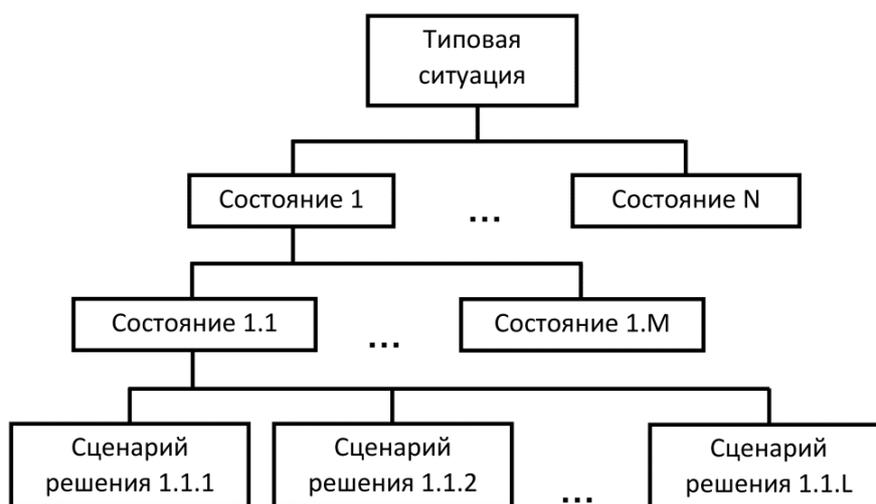


Рис. 3. Схема «дерева узнавания»  
Fig. 3. The scheme of the “Recognition Tree”

Следовательно, этап узнавания может быть очень простым, как в примере с погодой, а может потребовать формирования иерархии категорий – дерева, по которому необходимо пройти для нахождения нужного состояния ситуации (нужной конфигурации).

Обобщая сделанные выше рассуждения, можно предложить следующую графическую модель как концептуальную схему функционирования механизма «узнавания» типовой ситуации (рис. 4).

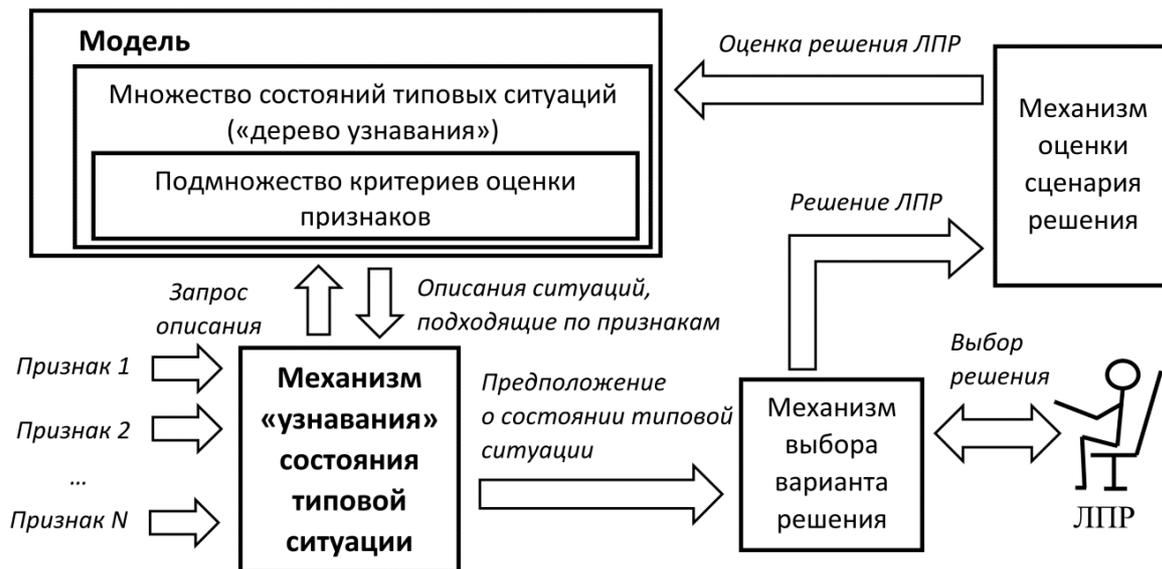


Рис. 4. Концептуальная схема функционирования механизма «узнавания» состояния типовой ситуации  
Fig. 4. Conceptual scheme of the functioning of the mechanism of recognition of the state of a typical situation

Чтобы построить «дерево узнавания», сформировать структуру признаков, да и просто корректно описать нужный бизнес-процесс, необходимо построить модель бизнес-процесса, в рамках которого выполняется принятие решения [4, 17]. Такая модель, очевидно, будет разнородной, т. е. будет содержать различное описание на различных уровнях, поскольку бизнес-процесс, процесс категоризации состояний ситуации и процесс оценивания затруднительно описать в одной и той же нотации [8]. Следовательно, необходимо строить некоторую нотацию для использования нотаций, т. е. метамодель, а сама модель будет обладать признаками онтологической [10]. При этом под онтологической моделью будем понимать не просто набор взаимосвязанных понятий, но и правила, ассоциированные с этими понятиями, которые после внедрения интегрируются в нормативно-методологический базис организации.

Для разрабатываемой онтологической модели организации рассмотрим все моделируемые объекты как совокупность базовых элементов: выполняемых функций ( $F$ ), по преобразованию ресурсов ( $R$ ), на основе некоторых правил ( $N$ ) с некоторыми целями ( $G$ ), продиктованными их назначением. Каждый из перечисленных базовых элементов представляет собой множество, внутри которого можно выделить подмножества, причём, возможно, больше, чем одного уровня. Поэтому в рамках формирования конкретной модели типовой ситуации их следует категоризовать, т. е. привязывать к конкретным значимым для ситуации характеристикам. Это означает разработку категорий оценочных признаков. В рассмотренном в п. 2 примере было разработано две категории оценки ситуации «степень сохранения тепла вещью» и «необходимый стиль в одежде». Первая категория привязана к функции «одеваться», ресурсам «термометр», «шкаф с одеждой», правилам «инструкция по хранению и носке вещей» и цели – «соответствовать погоде», а вторая также связана с функцией «одеваться», ресурсом «шкаф с одеждой», правилами «бытового дресс-кода» и целью «соответствовать стилю». Сформулируем описание механизма «узнавания» состояния типовой ситуации в более формализованном виде. Для начала определим, что множество категорий ( $C$ ), которое затем будет преобразовано в один или несколько оценочных признаков, непосредственно зависит от множеств базовых элементов:

$$K = \langle F, R, N, G \rangle, \quad (5)$$

На следующем этапе сформируем множество признаков для оценки ситуации ( $S$ ), которые будут формироваться как зависимости от элементов  $F, R, N, G$  и будут принадлежать категориям  $C$ , что можно представить выражением

$$S_i = f(F, R, N, G), \text{ причём } S_i \in C_j, \quad (6)$$

где  $S_i \in S$  – некоторый  $i$ -й элемент множества признаков;

$C_j \in C$  – некоторый  $j$ -й элемент множества категорий.

Понятно, что признаки имеют смысл только при наличии критериев их оценивания. Множество критериев соответствует множеству состояний типовой ситуации. Нюансы оценивания по критериям могут быть различными: попадание в диапазон, точное соответствие некоторому значению, превышение заданного значения и т. д., поэтому условимся считать, что каждому признаку  $S_i$  будет соответствовать некоторое множество критериев  $\{Cr_i\}$ , являющееся подмножеством множества критериев в категории  $j$  ( $Cr_j$ ), что можно представить выражением

$$S_i \Leftrightarrow Cr_i, \text{ причём } Cr_i \in Cr_j \text{ и } Cr_j \in C_j. \quad (7)$$

На следующем этапе каждому состоянию типовой ситуации (критерию) ставится в соответствие один или несколько (множество) вариантов решения в этой ситуации ( $V$ ), которые, собственно, и будут представлены ЛПР:

$$V \in Cr_i. \quad (8)$$

Отметим, что приведённые выше множества можно хранить в связанных таблицах реляционной базы данных, что позволит организовать их корректное хранение и своевременный доступ к ним при необходимости. Таблица «Категория» будет подчинена таблице «Признак», которая, в свою очередь, будет главной для таблицы «Критерий». Наконец, таблица «Вариант решения» будет последней в иерархии и будет подчинена таблице «Критерий».

Укрупнённый алгоритм «узнавания» состояния типовой ситуации показан на рис. 5.

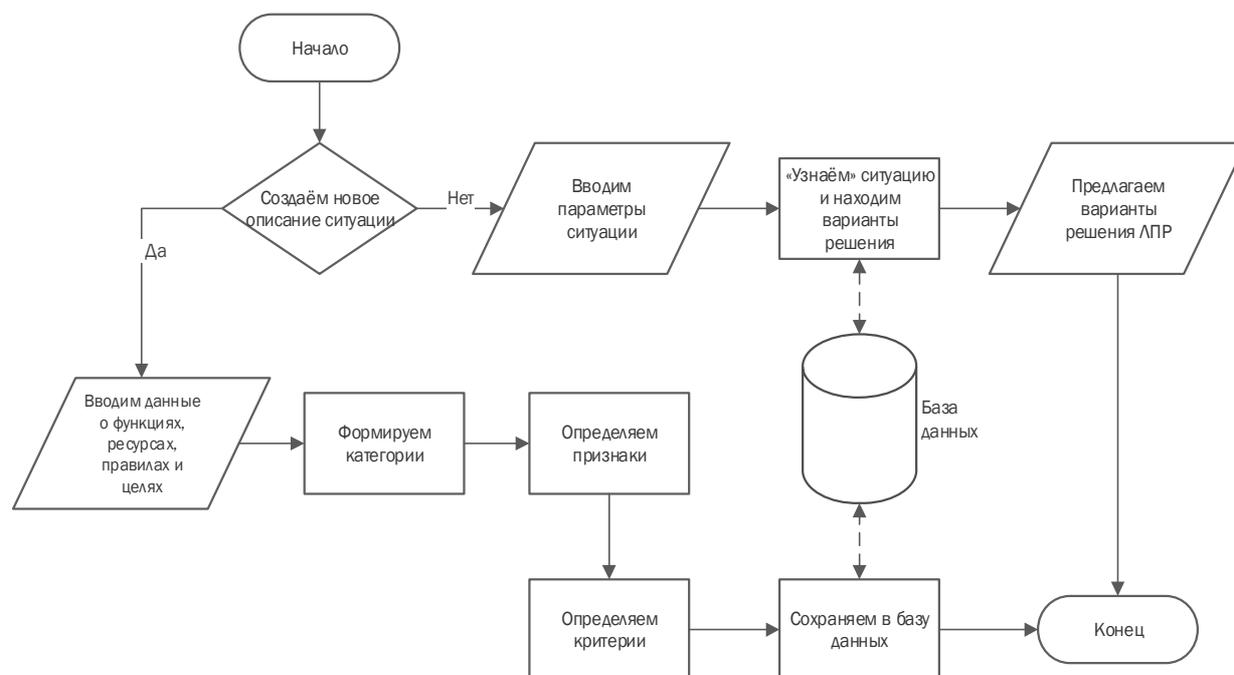


Рис. 5. Алгоритм «узнавания» состояния типовой ситуации  
Fig. 5. Algorithm of “recognition” of the state of a typical situation

После сбора, категоризации и параметризации данных о состояниях типовой ситуации задача её узнавания становится технической задачей, которая распадается на задачу организации ввода переменных параметров и задачу автоматического соотнесения рассчитанных значений выражений для признаков с критериями, позволяющими определять нужный один или несколько вариантов решения. При наличии нескольких вариантов решения они должны быть ранжированы. Подробнее данную задачу можно описать только для конкретной предметной области.

#### 4. Онтологическая модель как источник знаний для принятия решений

На следующем этапе (синтетическом) формируется реакция на «узнавание» – «действие», зависящее от «узнанных» элементов и «узнанных» состояний типовой ситуации. В предыдущем разделе мы условились обозначать эти действия или варианты как  $V$ . Для каждого состояния ти-

повой ситуации может быть сформирован некоторый набор (сценарий) действий. В рассмотренном в п. 2 примере с подбором гардероба в качестве «действий» могут быть рассмотрены варианты наборов одежды на каждый вариант «узнанного» состояния ситуации. Если часть гардероба недоступна по причине загрязнения или порчи, то может предлагаться иной набор или отдельный элемент. Таким образом, система будет снимать проблему самостоятельного поиска и подбора вариантов, сразу предлагая наиболее оптимальный согласно заданным заранее параметрам.

Онтологическая модель, которая в процессе реализации должна вылиться в предметно-ориентированную базу знаний, должна быть с нею ассоциирована и находится в постоянном развитии, поскольку устаревание значимой информации сделает её предложения ложными. Для решения данной задачи в онтологической модели следует предусмотреть специальные вершины – «новая категория» и «новые характеристики», которые будут принимать значения, если в них будут вводиться новые данные (рис. 6). На концептуальном уровне связь онтологических моделей и принятия решений рассмотрена в [5].

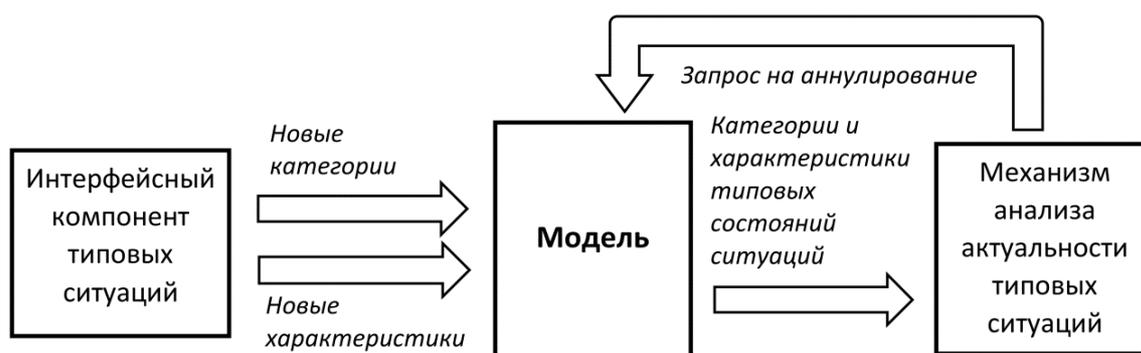


Рис. 6. Концептуальная схема адаптации онтологической модели  
Fig. 6. Conceptual scheme of adaptation of the ontological model

Предлагаемый подход позволяет создать открытую, а потому гибкую систему. Онтология каждой типовой ситуации сможет развиваться, т. е. дополняться новыми категориями, новыми измеримыми или перечислимыми характеристиками и новыми правилами, что позволит ей адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования бизнес-процесса в организационной системе. Например, в рассмотренном выше примере с выбором гардероба могут появляться новые вещи, которые могут соединяться в новые наборы, а старые вещи и наборы, напротив, выводиться из оборота, а также могут появляться новые ограничения (правила), например, на ношение валенок как немодной одежды и т. д. Кроме того, с течением жизни человека могут возникать новые стили и типы одежды. А, например, понятие «тёплая погода» вполне может сместиться вверх на 3–5 градусов ближе к пожилому возрасту.

Рассмотренный механизм обеспечения адаптации онтологии позволит решить одну из важнейших проблем информационных систем, связанных с организационными процессами – постоянное быстрое устаревание отдельных форм и процессов и, как следствие, потеря всей системой адекватности решаемым задачам.

Если реализовать такой подход в организационной системе, то время на принятие решений в повторяющихся типовых ситуациях может быть радикально сокращено, а качество решений, напротив, повысится. По крайней мере, субъективность оценок и коррупционный компонента в значительной мере исключаются, поскольку решение, принятое вопреки накопленному опыту, будет привлекать излишнее внимание к эксперту.

Следует отметить, что ситуации управления предполагают несколько вариантов. Выделим, например, следующие наиболее популярные типы ситуаций:

- поиск причины имевшего место явления (обычно негативного);
- выбор поставщика для закупки;
- близкий предыдущему выбор объекта для инвестирования;

- классификация чего-либо (дефектов, типов товаров, наблюдений и т. д.) по характеристикам;
- отбор кандидатов на должность;
- согласование документа на основе экспертизы заданного типа (технологической, метрологической, редакторской, на соответствие определённому нормативу);
- согласование стадии проекта по разработке;
- формирование бюджета (расстановка приоритетов по статьям);
- близкое предыдущему определению стратегии развития (выбор сферы для инвестиций и приложения сил);
- определение оптимальной конфигурации или структуры продукта, подразделения;
- оценка достоверности полученных данных (отчёты, слухи, суждения) и т. д.

Отметим, что каждый вариант, ассоциированный с состоянием типовой ситуации, должен проходить верификацию в ходе последующего использования, в результате чего уровень его ответственности этому состоянию будет оценен более точно. Подробному механизму верификации выбранного варианта решения будет посвящена одна из следующих статей.

### **5. Пример построения «дерева узнавания» типовой ситуации для авиаприборостроительного предприятия**

Рассмотрим применение предложенной методологии для предприятия отдельных бизнес-процессов обеспечения качества предприятия авиационного приборостроения.

#### *Процесс внутреннего аудита договорной деятельности*

Рассмотрим процесс внутреннего аудита [2], как один из бизнес-процессов, в котором принимается множество небольших решений в типовых ситуациях [6, 11]. Для обеспечения предметности рассмотрения выберем для проверки договорную деятельность приборостроительного предприятия в части правильности оформления договоров. Поскольку предприятие занимается очень широким кругом задач, то и классификация договоров имеет несколько важнейших категорий, которые существенно изменяют требования к особенностям их оформления. Рассмотрим верхний уровень данной классификации:

#### 1. По виду договоров:

- договоры на оказание услуг;
- договоры на поставку;
- договоры на разработку\*.

#### 1.1. Вид услуги:

- проведение испытаний;
- проведение настройки оборудования;
- обслуживание после гарантийного срока;
- продление ресурса;
- авторский надзор, где он не предусмотрен договором на разработку продукции.

#### 1.2. Виды продукции для поставки:

- товары народного потребления;
- компоненты для гражданской продукции;
- компоненты для продукции двойного назначения;
- компоненты для специальной продукции.

#### 1.2.3. Уровень приёмки для продукции двойного назначения

- приёмка ОТК;
- приёмка военного представителя;
- приёмка независимой инспекции.

На основе данной классификации можно построить «дерево узнавания» типовой ситуации (рис. 7).

---

\* Договоры на разработку детально не рассмотрены по просьбе предприятия.



Рис. 7. «Дерево узнавания» для типовой ситуации внутреннего аудита договорной деятельности авиаприборостроительного предприятия  
Fig. 7. "Recognition Tree" for a typical situation of internal audit of contractual activities of an aircraft instrument-making enterprise

Здесь следует отметить, что, например, договоры на приёмку ОТК также можно ещё глубже классифицировать по типу оформляемого при приёмке документа (паспорт на агрегаты или этикетка на компоненты) и т. д. по другим категориям [7]. Все эти особенности предполагают особые требования в стандарте на оформление договоров. В результате задача принятия решения для эксперта-аудитора сводится к правильному выбору состояния типовой ситуации, «узнаванию» её, а затем решение о соответствии установленным требованиям принимается путём проверки наличия необходимых полей в договоре и за счёт оценки корректности их заполнения (отсутствие фактологических, орфографических ошибок и т. д.).

#### **Процесс анализа и выбора нового поставщика для новых поставок или взамен ненадёжного**

Бизнес-процесс анализа и выбора поставщика, требование к которому явно установлено в ГОСТ Р ИСО 9001 [3], осуществляет служба снабжения во взаимодействии со службой менеджмента качества, которая отвечает за критерии выбора, поскольку в противном случае выбор всегда будет в пользу поставщика, предлагающего наименьшую цену, что для авиаприборостроения не всегда правильно. В рамках бизнес-процесса не рассматривается непосредственно сам процесс закупок, а только анализ и выбор, которые осуществляются на основе доступной информации о поставщике до начала поставок.

Классификация состояний типовой ситуации по данному бизнес-процессу начинается с типа поставщика: поставщик материалов и компонентов или поставщик услуг. Для простоты далее рассмотрим только поставщиков материалов и компонентов. На следующем уровне оценивается соответствие формальным требованиям, т. е. проверки наличия необходимых для работы в отрасли сертификатов и лицензий. Далее производится не классификация, а свёртка по параметрам, т. е. характеризуется качество, сроки поставок, цена, сервис и логистическая эффективность поставщика. Эти характеристики важные в относительно равной степени для принятия решения о

возможности закупки у поставщика, поэтому по ним формируется оценка, которая уже служит в качестве оснований для классификации поставщиков на «надёжных», «достаточно надёжных», «условно надёжных» и «ненадёжных». Если представить данную классификацию в виде «дерева узнавания», то получим следующее представление (рис. 8).

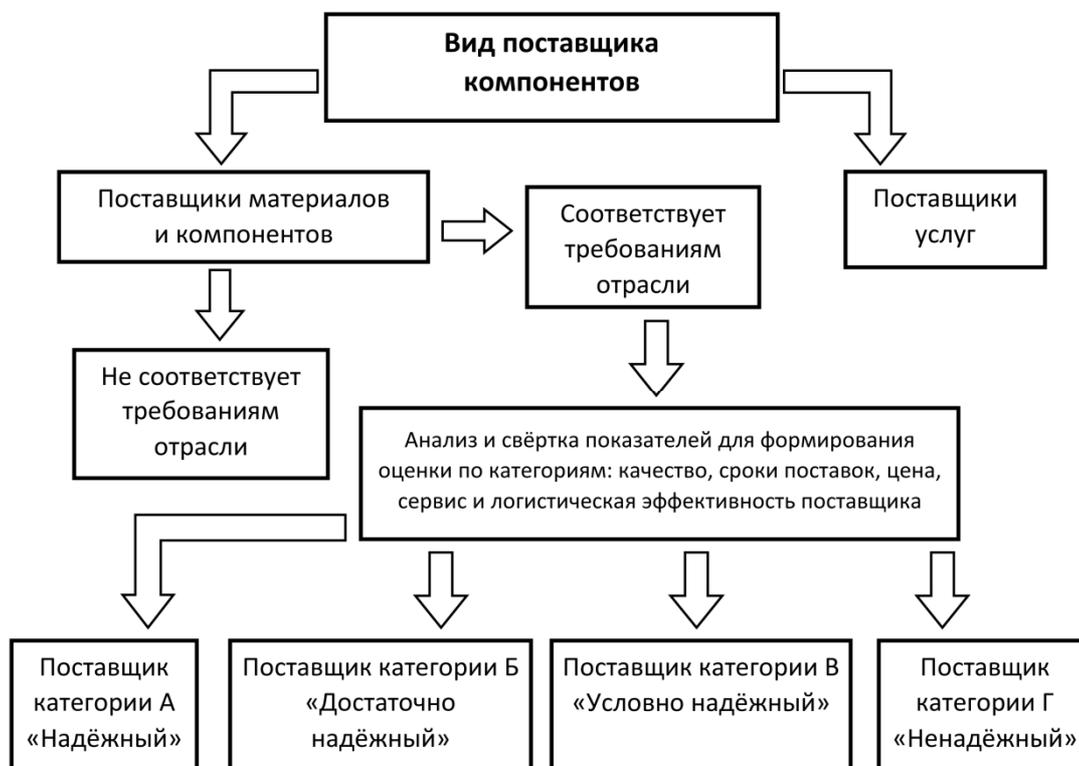


Рис. 8. «Дерево узнавания» для типовой ситуации анализа и выбора нового поставщика авиаприборостроительного предприятия

Fig. 8. "Recognition tree" for a typical situation of analysis and selection of a new supplier of an aircraft instrument manufacturing enterprise

После формирования категории поставщика данная информация включается в тендерную документацию, и наличие категории Г и даже В может быть основанием для отказа от закупки. Иными словами, выбор поставщика – это не решение, а определение состояния типовой ситуации. Само решение принимается позже на основании иных процедур.

Аналогично можно рассмотреть значительное число типовых бизнес-процессов, выявить в них типовые ситуации, связанные с принятием решений, и сформировать для них «дерево узнавания» состояния ситуации. Следует заметить, что в ходе исследования выявился тот факт, что особенно хорошо ложится предложенная методология на ситуации, в которых присутствуют определённые риски [9], такие как планирование проектов или процессов, приёмка продукции, проверки, поверки, анализ, оценки и т. д.

Таким образом, достаточно большой пласт задач принятия решения на предприятии решается за счёт правильного «узнавания» состояния типовых ситуации, при котором дальнейший акт принятия решения становится во многом технической задачей.

### Заключение

Решение задач на основе интуиции привело человечество к тем вершинам, которых достигла цивилизация. Однако данный способ принятия решений постепенно должен уступить место быстрым, надёжным и высокоэффективным в плане результативности способам осуществления этой деятельности. Несомненно, время, когда принимать решения станут неодушевлённые машины, придёт ещё не скоро. Тем не менее, уже сегодня есть все возможности значительно повысить интеллектуальные способности человека, решающего данную задачу. В статье рассмотрены

концептуальные подходы к принятию решений на основе онтологической модели бизнес-процесса организации. Предложено рассмотрение типовой ситуации на объекте управления как двухтактный механизм «узнавания» состояния ситуации и выбора варианта решения. Введено понятие категории для обеспечения возможности задавать иерархию состояний типовой ситуации («дерево узнавания») любой сложности. Рассмотрен алгоритм «узнавания» типовой ситуации. Предложена концептуальная схема адаптации онтологической модели к изменениям бизнес-процесса и его характеристик.

**Исследование проводится при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках основной части государственного задания высшим учебным заведениям № FEUE-2020-0007.**

### Литература

1. Горбачев, В.В. Концепция современного естествознания / В.В. Горбачев. – М.: ОНИКС 21 век: Мир и образование, 2003. – 592 с.
2. ГОСТ Р ИСО 19011–2012. Руководящие указания по аудиту систем менеджмента. – М.: Стандартинформ, 2018. – 75 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Система менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 24 с.
4. Громов, А.И. Управление бизнес-процессами: современные методы: моногр. / А.И. Громов, А. Фляйшман, В. Шмидт. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 367 с.
5. Конев, К.А. Онтологическая концепция решения задач в прикладных научных исследованиях / К.А. Конев // Информатизация образования и науки. – 2016. – № 1 (29). – С. 147–155.
6. Конев, К.А. Повышение объективности экспертов при принятии решений в области аудита качества / К.А. Конев // Менеджмент качества. – 2018. – № 1. – С. 14–25.
7. Конев, К.А. Повышение результативности принятия решений при устранении несоответствий и их причин / К.А. Конев // Методы менеджмента качества. – 2016. – № 11. – С. 34–40.
8. Конев, К.А. Принятие решений в сложных социально-экономических системах / К.А. Конев // Методы менеджмента качества. – 2018. – № 1. – С. 30–36.
9. Конев, К.А. Ситуационный подход к управлению риском при обеспечении качества на предприятии авиационного приборостроения / К.А. Конев, А.А. Булычёва, К.А. Каримова // Качество. Инновации. Образование. – 2014. – № 5 (108). – С. 42–46.
10. Конев, К.А. Метаситуационное моделирование поддержки принимаемых решений / К.А. Конев, Г.Р. Шакирова // Информатизация образования и науки. – 2014. – № 4 (24). – С. 137–150.
11. Крышкин, О.В. Настольная книга по внутреннему аудиту. Риски и бизнес-процессы / О.В. Крышкин. – М.: Альпина Паблишер, 2018. – 478 с.
12. Куликов, Г.Г. Кластерное программное обеспечение автоматизированной информационной системы / Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, К.А. Конев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 19–28. DOI: 10.14529/ctcr180202
13. Поспелов, Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 138 с.
14. Потапов, А.С. Искусственный интеллект и универсальное мышление / А.С. Потапов. – М.: Политехника, 2012. – 711 с.
15. Росс, Л. Человек и ситуация. Уроки социальной психологии / Л. Росс, Р. Нисбетт. – М.: Аспект-Пресс, 1999. – 429 с.
16. Ступницкий, В.П. Психология: учеб. для бакалавров / В.П. Ступницкий, О.И. Щербакова, В.Е. Степанов. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2014. – 520 с.
17. Тельнов, Ю.Ф. Инжиниринг предприятия и управление бизнес-процессами. Методология и технология: учеб. пособие / Ю.Ф. Тельнов, И.Г. Федоров. – М.: Юнити, 2017. – 304 с.
18. Тимофеев, А.В. Роботы и искусственный интеллект / А.В. Тимофеев. – М.: Наука, 1978. – 191 с.

**Антонов Вячеслав Викторович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; antonov.v@bashkortostan.ru.

**Конев Константин Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; sireo@rambler.ru.

**Суворова Вероника Александровна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; milana\_da@mail.ru.

**Куликов Григорий Геннадьевич**, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния» холдинга «Технодинамика», г. Уфа; grigmolniya@gmail.com.

*Поступила в редакцию 18 ноября 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210110

## SITUATION AND ONTOLOGICAL DECISION-MAKING METHODOLOGY ON THE EXAMPLE OF BUSINESS PROCESSES OF AN AIRCRAFT ENTERPRISE

**V.V. Antonov<sup>1</sup>**, antonov.v@bashkortostan.ru,

**K.A. Konev<sup>1</sup>**, sireo@rambler.ru,

**V.A. Suvorova<sup>1</sup>**, milana\_da@mail.ru,

**G.G. Kulikov<sup>2</sup>**, grigmolniya@gmail.com

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

<sup>2</sup> JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya” of the holding “Tekhnodinamika”, Ufa, Russian Federation

This article proposes an improved methodology for the development of decision support systems, developed on the basis of a situational scheme for solving behavioral problems by a person. The proposed methodology proposes an approach to solving the problem of decision support based on the ontological model of an organization (business process), containing information about typical situations, their features, options (scenarios) of decisions and indicators for choosing these decisions. An intelligent mechanism for “recognition” of the states of typical situations has been developed on the basis of categorization and the use of the obtained hierarchy of their states and features. A general approach to keeping the ontological model up to date is proposed. The examples of the application of the methodology for the enterprise of the aircraft industry are considered.

*Keywords: decision making, ontological model, situational modeling, categorization, typical situation, decision scenario, business process.*

**The study is carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the main part of the state assignment to higher educational institutions No. FEUE-2020-0007.**

### References

1. Gorbachev V.V. *Kontseptsiya sovremennogo estestvoznaniya* [The concept of modern natural science]. Moscow, ONIKS 21 vek Publ., Mir i obrazovaniye Publ., 2003. 592 p.
2. *GOST R ISO 19011–2012*. [Guidelines for auditing management systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 75 p. (in Russ.)
3. *GOST R ISO 9001–2015*. [Quality Management System. Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 24 p. (in Russ.)

4. Gromov A.I., Fleishman A., Schmidt V. *Upravleniye biznes-protsessami: sovremennyye metody: monogr.* [Business process management: modern methods. Monograph]. Lyubertsy, Yurayt Publ., 2016. 367 p.
5. Konev K.A. [Ontological concept of problem solving in applied scientific research]. *Informatization of education and science*, 2016, no. 1 (29), pp. 147–155. (in Russ.)
6. Konev K.A. [Improving the objectivity of experts when making decisions in the field of quality audit]. *Quality management*, 2018, no. 1, pp. 14–25. (in Russ.)
7. Konev K.A. [Improving the effectiveness of decision-making while eliminating inconsistencies and their causes]. *Methods of quality management*, 2016, no. 11, pp. 34–40. (in Russ.)
8. Konev K.A. [Decision making in complex socio-economic systems]. *Methods of quality management*, 2018, no. 1, pp. 30–36. (in Russ.)
9. Konev K.A., Bulycheva A.A., Karimova K.A. [The situational approach to risk management in ensuring quality for the enterprise of aviation devices]. *Quality. Innovation. Education*, 2014, no. 5 (108), pp. 42–46. (in Russ.)
10. Konev K.A., Shakirova G.R. [Metasituational modeling of decision support]. *Informatization of education and science*, 2014, no. 4 (24), pp. 137–150. (in Russ.)
11. Kryshkin O.V. *Nastol'naya kniga po vnutrennemu auditu. Riski i biznes-protsessy* [Internal Audit Handbook. Risks and business processes]. Moscow, Al'pina Publisher, 2018. 478 p.
12. Kulikov G.G., Antonov V.V., Konev K.A. Cluster Software of Automated Information System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 19–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180202
13. Pospelov D.A. *Situatsionnoye upravleniye: teoriya i praktika* [Situational management: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 138 p.
14. Potapov, A.S. *Iskusstvennyy intellekt i universal'noye myshleniye* [Artificial intelligence and universal thinking]. Moscow, Politekhnik Publ., 2012. 711 p.
15. Ross L., Nisbett R. *Chelovek i situatsiya. Uroki sotsial'noy psikhologii* [Man and the situation. Social psychology lessons]. Moscow, Aspect-Press, 1999. 429 p.
16. Stupnitskiy V.P., Shcherbakova O.I., Stepanov V.E. *Psikhologiya: ucheb. dlya bakalavrov* [Psychology: Textbook for bachelors]. Moscow, Publishing and trade corporation "Dashkov and K°", 2014. 520 p.
17. Telnov Yu.F., Fedorov I.G. *Inzhiniring predpriyatiya i upravleniye biznes-protsessami. Metodologiya i tekhnologiya: ucheb. posobiye* [Enterprise engineering and business process management. Methodology and technology: Textbook]. Moscow, Yuniti Publ., 2017. 304 p.
18. Timofeev A.V. *Roboty i iskusstvennyy intellekt* [Robots and artificial intelligence]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 191 p.

*Received 18 November 2020*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ситуационно-онтологическая методология принятия решений на примере бизнес-процессов авиаприборостроительного предприятия / В.В. Антонов, К.А. Конеv, В.А. Суворова, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 102–115. DOI: 10.14529/ctcr210110

#### FOR CITATION

Antonov V.V. Konev K.A. Suvorova V.A. Kulikov G.G. Situation and Ontological Decision-Making Methodology on the Example of Business Processes of an Aircraft Enterprise. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 102–115. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210110

## РАЗВИТИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ И КОРПОРАТИВНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ

О.В. Логиновский<sup>1</sup>, А.А. Максимов<sup>2</sup>, С.А. Золотых<sup>1, 3</sup>, В.О. Логиновская<sup>1, 4</sup>

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

<sup>2</sup> Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VII созыва, г. Москва, Россия,

<sup>3</sup> Министерство информационных технологий, связи и цифрового развития Челябинской области, г. Челябинск, Россия,

<sup>4</sup> Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, г. Москва, Россия

Анализ современных технологий, методов и моделей, используемых в различного рода организационных и корпоративных структурах, убедительно доказывает, что совершенствование подготовки и принятия решений по управлению этими структурами осуществляется в настоящее время в основном на базе зачастую устаревших и не вполне соответствующих современным возможностям вычислительной техники, а также информационного, программного и математического обеспечения разработок. В статье показано, что в современных условиях глобальной нестабильности в мире возникает необходимость использования адекватных методов анализа данных и подготовки принятия управленческих решений по развитию организационных и корпоративных структур. Представлены предложения и рекомендации по совершенствованию процессов аналитической обработки данных, извлечения полезной информации из больших объемов данных, находящихся в соответствующих организационных и корпоративных системах, а также предложены адекватные математические модели и алгоритмы, которые с успехом могут быть использованы для повышения качества управленческих решений руководством компаний. **Целью исследования** является формирование методов и моделей анализа стратегических альтернатив по развитию организационных и корпоративных систем с использованием концепции больших данных, технологий извлечения необходимой информации из имеющихся банков данных и др. **Материалы и методы.** Методы исследования базируются на современных информационно-аналитических технологиях, методах data science и разработанных авторами моделях анализа стратегических альтернатив по развитию организационных и корпоративных систем. **Результаты.** Представленные в статье научные положения и разработки можно использовать для повышения эффективности управления в различных информационно-аналитических системах для разнообразных управленческих структур. **Заключение.** Результаты исследования, изложенные в данной статье, дают возможность производить качественный анализ данных, моделировать варианты работы организационных и корпоративных структур в оперативном режиме, что позволяет повысить эффективность управления их развитием на основе сравнения альтернативных вариантов управленческих решений.

*Ключевые слова:* информация, анализ данных, принятие управленческих решений, математические методы и модели, альтернативные варианты.

### Введение

Увеличение финансово-экономической нестабильности в мире, принятие различного рода санкций странами Запада по отношению к нашей стране, а также возрастание конкуренции на международных рынках и многие другие факторы, приводящие к увеличению неопределенности в деятельности различных организационных финансово-экономических систем и производственных корпораций еще более повысили значимость проблемы повышения эффективности и гибкости управления в указанных системах. Все это вызывает необходимость разработки новых методов и моделей повышения качества управления в организационных и корпоративных структурах, базирующихся на адекватных математических моделях анализа и выбора вариантов поведения упомянутыми системами.

Очень важно при этом добиться таких алгоритмов выбора стратегических и тактических альтернатив поведения компаний, которые давали бы возможность их руководству в полной мере использовать разработанные математические модели и исходные данные для подготовки принятия управленческих решений.

Если в условиях стабильного развития экономики подобная задача не была столь важна, то при постоянно меняющихся тенденциях и трендах мировых рынков необходимость качественного анализа и обоснованного выбора управленческих альтернатив по развитию организационных и корпоративных систем приобретает ключевое значение.

Следует отметить, что многие математические модели и алгоритмы подготовки управленческих решений, разработанные до недавнего времени, не могут быть использованы в современных условиях политической, экономической, финансовой и социальной нестабильности, как не позволяющие достаточно быстро и обоснованно осуществлять анализ показателей деятельности организационных и корпоративных структур, а также производить оценку и выбор различных альтернатив по их развитию.

### **1. Методы и модели, используемые на практике для повышения эффективности работы организационных и корпоративных систем**

Управление современными организационными и корпоративными системами, функционирующими в условиях глобальной нестабильности, ставит перед их руководителями задачи значительного повышения эффективности и гибкости управления, а также обоснованности принимаемых управленческих решений по их развитию при обеспечении требуемого качества анализа больших объемов информации. Указанные соображения вынуждают руководство указанных структур осуществлять подготовку и принятие управленческих решений на базе реалистически-адекватных математических моделей, методик, технологий увеличения гибкости и новых средств представления данных, а также методов их обработки.

Ряд научных публикаций последних лет в области оптимизации деятельности промышленных предприятий, корпораций и различного рода организационных систем на основе методов математического моделирования, интегрированных в корпоративные информационные системы, подробно рассматривают вопросы оптимизации затрат предприятий или других факторов их функционирования [1–6, 8–15, 17, 18, 20, 22–24, 26–32, 34–37].

Анализ указанных работ показывает, что предложенные в них модели и механизмы повышения эффективности управления базируются, кроме того, на использовании новых информационных технологий, экспертных систем, методов компьютерного имитационного моделирования и т. д.

Использование методов математического моделирования не только оказывает положительное влияние на точность и обоснованность принятия управленческих решений, но и позволяет значительно улучшить гибкость управления в организационных и корпоративных системах, а также скорость реакции его руководства на вновь возникающие факторы, что обеспечивает эффективность работы организации и компании в условиях нестабильности.

Указанные работы вместе с другими теоретическими разработками образуют совокупность современных математических моделей, которые могут быть использованы в практике работы современных организационных и корпоративных структур, в том числе формирующих свои управленческие решения на основе анализа динамики системы показателей деятельности компании и тенденций их изменения на перспективу.

При этом наиболее перспективными системами, предназначенными для внедрения математических моделей оптимизации работы промышленных предприятий, организаций и корпораций, на протяжении последнего десятилетия остаются интегрированные корпоративные системы, комбинирующие различные базы данных и вычислительные инструменты предприятия в единый механизм, такие как, например, системы класса ERP.

Тем не менее развитие информационных технологий и унификация методов проектирования систем, интерфейсов интеграции и подходов к разработке программного обеспечения значительно упрощают как использование имеющихся, так и разработку новых специализированных модулей, направленных на решение конкретных управленческих задач с использованием уникальных методик и математических инструментов.

При этом важно осуществлять доработку интегрированных систем организаций и предприятий. Это в свою очередь требует качественного методического обеспечения всех соответствующих процессов и процедур.

Следует отметить, что для многих формализованных моделей разработанные методики их использования в ряде случаев не вполне могут быть адаптированы для практического применения для конкретных управленческих структур, а аспекты их внедрения могут основываться лишь на экспертных оценках.

Одним из примеров таких моделей являются когнитивные карты – субъективные представления аналитиков и экспертов о динамике процесса, формализованные в виде знакового графа. Хотя такие системы и создаются методом экспертной оценки, даже длительная их настройка не позволяет повысить точность представления данной субъективной модели реального процесса, что является общей характерной чертой слабо формализованных методов моделирования.

До последнего времени для аналитиков и руководителей организаций и корпораций подобные модели были единственно возможным формализованным представлением о положении дел в компании и тенденциях, позволяющих прогнозировать и анализировать динамику ситуаций.

Однако результаты, полученные с помощью использования данного инструмента, зачастую страдают чрезмерной абстрактностью или противоречивостью и допускают множественные интерпретации. Поэтому такие решения можно принимать лишь в качестве ориентиров, своеобразных маяков в интеллектуально-аналитической деятельности руководителя. Тем не менее и в России, и за рубежом в последние годы разрабатываются информационные системы анализа ситуации и поддержки управленческих решений, использующие подобные и другие слабо формализованные методы моделирования.

С другой стороны, распространение информационных технологий и рост вычислительных мощностей вывел формализованные методы математического моделирования на новый этап развития. Такие методы фокусируются на обработке доступной числовой информации с помощью инструментов статистического анализа, моделей корреляционно-регрессивного анализа, моделей прогнозирования временных рядов, линейного программирования, нелинейного программирования и моделей многокритериальной оптимизации.

В целом интеллектуальные ресурсы и информационно-вычислительная инфраструктура корпорации, как правило, позволяют обеспечить дополнительные преимущества при использовании указанных моделей, в том числе при оперативном применении методов анализа чувствительности ключевых факторов и прогнозов в реальном времени, быстром расчете многомерных управленческих задач с передачей результатов моделирования в другие информационные системы и модули предприятия, а также представлении полученных данных стандартными (уже имеющимися в организации) средствами визуализации информации.

Основным преимуществом данного подхода является обоснованность выбранных оптимальных управленческих альтернатив, которая необходима руководству корпорации при работе в условиях нестабильности мировых рынков. В таких ситуациях значительно возрастает частота использования руководством компаний интуитивных методов управления, особенно в тех случаях, когда процессы, происходящие в компаниях, или тренды показателей их деятельности отличаются своеобразием, неповторимостью или даже уникальностью.

Таким образом, способность используемых математических моделей и методов подстраиваться под конкретную ситуацию и в достаточной мере воспринимать и представлять суждения, критерии и аргументы руководителя компании, формализуя мотивы принятия того или иного управленческого решения, становится ключевым фактором для поддержания взаимопонимания и коммуникации с собственниками, а также внешними агентами и др. [30, 37].

Следует отметить, что в современных организационных и корпоративных системах, когда становится вполне очевидным, что в области управления организациями уделяется явно недостаточно внимания механизмам, моделям и средствам поддержки процесса принятия решений и анализу чувствительности результатов, а также современным методам математического моделирования, необходимо задействовать современные мощные вычислительные комплексы, в том числе с использованием суперкомпьютеров и грид-технологий.

Описанная ситуация показывает, что оценка стратегического развития организаций и принятия соответствующих решений по управлению ими в большей степени концентрируется

на совершенствовании математических методов моделирования и прогнозирования. В то же время явно недостаточно внимания уделяется процессам информационного обмена между лицами, принимающими управленческие решения, и особенно первыми руководителями компаний, а также между разнообразными подсистемами в рамках конкретных управленческих структур.

В результате на сегодняшний день многие крупные компании и корпорации и даже огромные холдинги не имеют инструментов для представления результатов моделирования и их анализа, которые могли бы быть в полной мере использованы не только профессиональными аналитиками, но и менеджерами, принимающими наиболее важные решения.

Другими словами, руководство подавляющего количества организаций не может оперативно воспринимать результаты моделирования и наглядно рассматривать различные допущения, неточности в прогнозах и таким образом уяснить пределы корректной работы той или иной модели оптимизации прибыли (или других показателей деятельности), что зачастую провоцирует топ-менеджеров к фактическому отказу от принятия в расчет результатов моделирования при выборе управленческой альтернативы [15].

Одним из возможных путей, ведущих к решению рассмотренных задач, является создание методики формализации динамики факторов, влияющих на функционирование организационных и корпоративных структур, а также анализа управленческих альтернатив при принятии решений на основе избранных критериев.

Особенно актуальными такие задачи являются для крупных производственных корпораций, реализующих свою продукцию на внешних рынках. В этих случаях количество факторов, влияющих на выбор стратегии поведения компании, достаточно велико, а оказываемое ими воздействие не всегда однозначно. Решение указанной задачи должно базироваться на разработке новой математической модели анализа и выбора управленческих альтернатив по формированию стратегий поведения компании.

Очень важно затронуть еще один аспект, связанный с повышением эффективности деятельности организационных и корпоративных структур, а именно – использование технологий data science для извлечения необходимой информации из больших объемов данных, накопленных в организационных и корпоративных системах.

Как известно, наука о данных (англ. data science; иногда даталогия – datalogy) исследует проблемы анализа, обработки и представления данных в цифровой форме и объединяет методы по обработке данных больших объемов и высокого уровня параллелизма, а также методы интеллектуального анализа данных, статистические методы и технологии искусственного интеллекта для извлечения информации из данных.

С возникновением концепции «больших данных» начиная с 2010-х годов data science становится совершенно необходимой составляющей в процессах анализа данных в организационных и корпоративных системах.

Ключевое значение упомянутые технологии имеют для повышения эффективности инновационной деятельности промышленных корпораций, процессов государственного финансирования инноваций в России и других исследованиях подобного рода [7, 15, 16, 19, 21, 25, 33].

## **2. Необходимость разработки адекватных математических моделей и алгоритмов для повышения эффективности управления организационными и корпоративными системами**

Значительные изменения внешнеэкономической ситуации для нашей страны и ее предприятий и организаций соответственно, вызванные политической и социально-экономической нестабильностью в мире, сделали условия, в которых функционируют современные управленческие структуры, очень сложными и трудно прогнозируемыми.

Оказались нарушенными не только взаимодействия предприятий и корпораций в валютно-финансовой сфере, но и в области производства и потребления товарной продукции самого различного характера. Нарушились годами сложившиеся хозяйственные связи в рамках цепочек производственных компаний и даже отдельных государств.

Все это создало большие сложности для производственных компаний и иных организаций в процессе формирования своих тактических и стратегических императивов. Особые затруднения

вызывает формирование краткосрочных, среднесрочных и особенно долгосрочных стратегических прогнозов.

Оказалось, что в связи с все нарастающей неопределенностью внешней среды разработка упомянутых прогнозов как бы теряет свой смысл, так как сформировать верный прогноз динамики, например, международных рынков, становится крайне трудно. А принимать решения по управлению компаниями и организациями, а тем более решения по их стратегическому развитию все равно необходимо, так как в противном случае предприятия или организации, не понимающие, по какому пути им необходимо следовать, неизбежно столкнутся с трудностями, которые могут привести их к банкротству [15, 30, 37].

Таким образом, любой компании, организации или корпорации совершенно необходимо найти методы и средства, которые помогут им в формировании адекватных прогнозов изменения ситуации во внешней среде, а также в создании моделей и иных средств инструментов и механизмов, которые бы помогли руководству компании такие прогнозы сформировать и на их основе выбрать наиболее оптимальные стратегии своего поведения. Именно решению этой задачи следует уделить особое внимание. Разумеется, что данная задача может успешно решаться только в комплексе с развитыми средствами обработки анализа и представления данных для лиц, принимающих решения (ЛПР).

Как известно, понятие гибкости управления изначально было введено именно в производственном секторе как описание гибкого производственного процесса. Позже эта концепция развилась в дисциплину в области организационного управления, которая соединяла в себе большинство аспектов управления компанией, связанных с адаптацией к изменениям во внешней и внутренней средах компаний. Тем не менее в настоящее время не существует четкого общепринятого определения гибкости управления предприятием или организацией, и большинство из тех, что представлены в работах исследователей, являются лишь обобщенными.

Нестабильность в мировой экономике и быстрое технологическое развитие приводит к значительным изменениям условий, в которых работают современные организации и корпорации. Следовательно, для более успешного и стабильного развития компании необходимо внедрять методы гибкого управления. Тема внедрения этих методов для стратегического уровня управления получила значительное развитие в последние годы [2, 4, 11, 12, 15, 26, 27, 37, 38].

### **3. Модель повышения эффективности управления организационными и корпоративными системами**

Руководителям различного рода организационных и корпоративных структур в процессе анализа имеющейся информации о деятельности организаций, предприятий и корпораций очень важно понимать, что в условиях нарастания глобальной нестабильности при постоянно меняющихся тенденциях и трендах мировых рынков следует обеспечивать повышение качества анализа ситуаций и обоснованного выбора управленческих альтернатив по стратегическому и оперативному развитию предприятий и организаций. Сегодня это приобретает ключевую роль для их выживания и развития.

К сожалению, подавляющее большинство методов, моделей и алгоритмов, ориентированных на повышение эффективности подготовки принятия управленческих решений для предприятий и корпораций, не могут быть использованы в современных условиях политической, экономической, финансовой и социальной нестабильности, так как они не дают возможности достаточно быстро и обоснованно осуществлять анализ показателей деятельности предприятий и организаций, а также производить оценку и выбор различных альтернатив их развития.

Анализ задач и факторов, связанных с формированием управленческих решений, обеспечивающих эффективное функционирование промышленных предприятий и организаций, показывает, что управление разнообразными компаниями в современных условиях ставит перед их руководителями задачи повышения эффективности и гибкости управления, а также обоснованности принимаемых решений при обеспечении требуемого качества обработки больших объемов информации. Указанные соображения вынуждают руководство компаний осуществлять подготовку принятия управленческих решений на базе более адекватных математических моделей, методик, инструментов и технологий увеличения гибкости и эффективности управления, а также современных средств анализа и представления данных.

Одной из таких актуальных задач является задача формализации динамики факторов, влияющих на производственные корпорации и организации, а также анализа и выбора управленческих альтернатив при принятии решений на основе избранных критериев [23, 30]. Особенно актуальными такие задачи являются для крупных промышленных предприятий и корпораций, реализующих свою продукцию на внешних рынках. В этих случаях количество факторов, влияющих на выбор стратегии поведения компании, достаточно велико, а оказываемое ими воздействие на организацию не всегда однозначно.

В результате руководители, принимающие решения, сталкиваются с необходимостью выбирать между субъективными слабо формализованными подходами либо подходами, основывающимися на новых математических моделях выбора вариантов поведения.

Предложим постановку и математическую модель задачи управления процессом выбора вариантов поведения компании на основе прогнозирования динамики ситуаций, разработанную под руководством профессора О.В. Логиновского [21, 23, 30].

Формализация задачи и процесса принятия решений связана при этом с повышением качества процедур обработки оперативной информации, совершенствованием алгоритмов прогнозирования основных факторов, а также определением адекватных целевых функций моделей и критериев их эффективности.

Содержание подобной модели в этой связи включает в себя прогнозирование стоимости каждого вида ресурсов, используемых при производстве готовой продукции, а также многих других факторов, влияющих на работу компании. На этой основе осуществляется оптимизация целевой функции, в качестве которой может быть выбрана максимизация прибыли, получаемой предприятием (организацией) в результате производства и продажи продукции, либо минимизация потерь предприятия в ходе его производственной деятельности и т. п.

Обеспечение гибкости и точности прогнозирования экономических факторов, влияющих на доходы и затраты промышленного предприятия (организации), обеспечивается с помощью вариации подходов для прогнозирования математических рядов. Использование того или иного подхода для прогнозирования определяется аналитическим отделом корпорации на основе исторических данных и экспертной оценки возможной динамики фактора.

Среди разнообразных методов прогнозирования для решения указанной задачи можно использовать как интуитивные, так и формализованные методы.

Как известно, интуитивное прогнозирование применяется тогда, когда математическое моделирование невозможно использовать по различным причинам (высокая сложность формализации, недостаток исходных данных и т. п.). В этих случаях возможно прибегнуть к опросу экспертов. Полученные индивидуальные и коллективные экспертные оценки используются как конечные прогнозы или в качестве исходных данных в комплексных системах прогнозирования.

Формализованные методы прогнозирования обеспечивают построение прогнозов с использованием математического моделирования. Применение этих методов на практике повышает точность прогнозов, ускоряет обработку и визуализацию информации, облегчает оценку результатов.

Методы, используемые в математической модели выбора управленческих альтернатив, можно разделить на несколько групп:

- регрессионные модели прогнозирования: парная регрессия, множественная регрессия, модели дискретного (бинарного или множественного) выбора;
- авторегрессионные модели прогнозирования: ARIMA-модели, GARCH-модели;
- адаптивные методы прогнозирования: экспоненциальное сглаживание, модель Хольта, модель Хольта – Винтерса;
- нейросетевые модели: сети прямого распространения, рекуррентные сети;
- модели на базе цепей Маркова;
- модели на базе классификационно-регрессионных деревьев.

В ряду регрессионных моделей прогнозирования парная регрессия – это уравнение, описывающее корреляционную связь между парой переменных – зависимой переменной (результатом)  $y$  и независимой переменной (фактором)  $x$ :

$$y = f(x).$$

Вариант, в котором рассматривается линейная зависимость результата от фактора, описывается следующим образом:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

где  $y_i$  – значение переменной  $y$  в момент времени  $i$ ;  $x_i$  – значение переменной  $x$  в момент времени  $i$ ;  $\alpha, \beta$  – параметры парной линейной регрессии;  $N$  – объем генеральной совокупности;  $\varepsilon_i$  – возможная ошибка.

Множественная регрессия – уравнение, отражающее корреляционную связь между результатом и несколькими факторами. В общем виде оно может быть записано как

$$y = f(x_1, \dots, x_n),$$

где  $n$  – количество факторов.

В качестве функций множественной регрессии обычно выбирают наиболее простые: линейную, показательную и степенную функции или их комбинации:

$$y = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + e \quad (\text{линейная}); \quad (1)$$

$$y = a \prod_{i=1}^n x_i^{b_i} e \quad (\text{степенная}); \quad (2)$$

$$y = a \prod_{i=1}^n b_i^{x_i} e \quad (\text{показательная}).$$

Для обеспечения достаточной точности получаемых оценок параметров функций требуется, чтобы количество измерений было в 8–10 раз больше, чем количество входящих переменных. Указанная модель может быть использована для выявления или прогнозирования достаточно сложных зависимостей.

*Модель дискретного выбора* представляет собой уравнение зависимости результата  $y$  от факторов  $x_1, \dots, x_n$  вида

$$y = f(x_1, \dots, x_n),$$

где  $n$  – количество факторов, а  $y$  может принимать только дискретные значения.

Простейшим видом модели дискретного выбора является модель бинарного выбора, в которой  $y$  может принимать значения 0 или 1.

*В ряду авторегрессионных моделей прогнозирования*

ARIMA-модели применяются для прогнозирования временных рядов, которые характеризуют зависимость результирующей переменной от значений в предшествующие моменты времени и от ее ошибок в прошлом.

Модель ARIMA( $p, q$ ) представляет собой уравнение вида

$$y_t = \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} + \sum_{i=1}^q b_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t.$$

ARIMAX( $p, d, q$ )-модели – следующий шаг в развитии ARIMA-моделей. Они описываются формулой

$$y_t = AR(p) + \alpha_1 X_1(t) + \dots + \alpha_s X_s(t), \quad (3)$$

где  $\alpha_1, \dots, \alpha_s$  – коэффициенты факторов динамики внешней среды  $X_1(t), \dots, X_s(t)$ . Для прогнозирования  $y_t$  можно воспользоваться моделью авторегрессии, где вводятся дополнительные регрессоры факторов внешней среды  $X_1(t), \dots, X_s(t)$ .

ARIMA-модели применяются для стационарных временных рядов, в которых среднее значение и дисперсия постоянны, то есть не зависят от номера наблюдения. Это означает отсутствие в данных трендов сезонности. Если же временной ряд ими все-таки обладает, то необходимо провести предварительные преобразования данных, чтобы обеспечить сведение ряда к стационарному.

*GARCH-модель* ( $p, q$ ) описывается уравнением вида

$$\sigma_t^2 = \omega + \sum_{j=1}^p \delta_j \sigma_{t-j}^2 + \sum_{j=1}^q \gamma_j \varepsilon_{t-j}^2. \quad (4)$$

Данная модель позволяет отразить зависимость дисперсии ряда от ее прошлых значений и значений ошибок ряда в прошлые периоды.

GARCH-модели могут быть применены для прогнозирования показателей финансового рынка, так как для них характерно изменение дисперсии во времени на конкретные периоды.

*Адаптивные методы прогнозирования*

Экспоненциальное сглаживание описывается уравнением вида:

$$s_t = \begin{cases} x_1, & t=1; \\ s_{t-1} + \alpha(x_t - s_{t-1}), & t > 1, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, заданный экспертным путем  $\alpha \in (0; 1)$ .

Так как указанная формула является рекуррентным уравнением, то можно выразить значение  $s_t$  через прошлые значения переменной  $x_t$ :

$$s_t = \alpha \sum_{i=0}^{t-1} (1-\alpha) x_{t-i}. \quad (6)$$

Приведенная формула наглядно показывает, что  $s_t$  является взвешенной суммой всех прошлых измерений, причем в зависимости от давности наблюдения веса уменьшаются.

Экспоненциальное сглаживание можно использовать при прогнозировании динамически изменяющихся показателей, не обладающих свойствами тренда и сезонности.

*Модель Хольта* является уравнением вида

$$\widehat{y_{t+d}} = a_t + db_t. \quad (7)$$

Модель Хольта является своего рода обобщенным случаем экспоненциального сглаживания с учетом линейного тренда. Вычисление прогнозных значений  $a_t$  и  $b_t$  осуществляется по следующим рекуррентным соотношениям:

$$a_t = \alpha y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} - b_{t-1}); \quad (8)$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1-\beta)b_{t-1}, \quad (9)$$

где  $\alpha, \beta$  – заданные экспертным путем параметры, определяющие чувствительность модели к изменениям.

Данную модель можно применять для краткосрочного прогнозирования временных рядов с линейным трендом, но без сезонности.

*Модель Хольта – Винтерса* описывается рекуррентными соотношениями вида:

$$y_{t+d} = a_t (r_t)^d X_t + (d \bmod s) - s; \quad (10)$$

$$a_t = \alpha \frac{y_t}{X_{t-s}} + (1-\alpha)a_{t-1}r_{t-1}; \quad (11)$$

$$r_t = \beta \frac{a_t}{a_{t-1}} + (1-\beta)r_{t-1}; \quad (12)$$

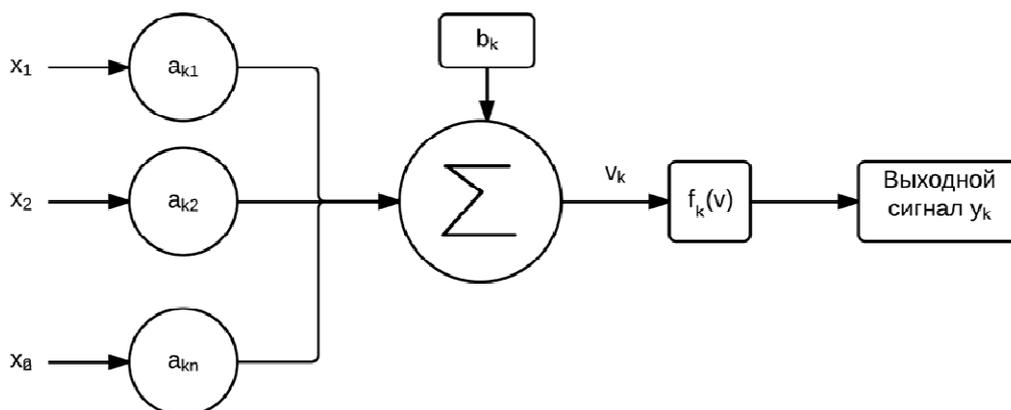
$$X_t = \gamma \frac{y_t}{a_t} + (1-\gamma)X_{t-s}, \quad (13)$$

где  $s$  – период сезонности,  $X_t, i=0, s-1$  – профиль сезонности;  $r_t$  – параметр тренда;  $a_t$  – показатель, очищенный от тренда и сезонности.

*Нейросетевые модели*

Одним из наиболее распространенных методов прогнозирования временных рядов в настоящее время являются нейросетевые модели. Искусственная нейронная сеть – это сеть с конечным числом слоев из однотипных элементов – аналогов нейронов, с различными типами связей между ними. Они обладают рядом преимуществ, которые позволяют использовать их на достаточно широком диапазоне задач, таких как: способность к самообучению; учет нелинейных зависимостей; возможность одновременного прогнозирования нескольких показателей (при наличии соответствующих выходов из нейронной сети).

Классическое представление нейрона представлено на рис. 1.



**Рис. 1. Классическая схема нейрона:**

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – входные данные;  $a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}$  – веса соответствующих показателей в нейроне  $k$ ;  $b_k$  – пороговое значение нейрона  $k$ ;  $f_k(v)$  – функция активации  $k$ -го нейрона;  $y_k$  – выходные данные

**Fig. 1. Classical diagram of a neuron:**

$x_1, x_2, \dots, x_n$  is input data;  $a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}$  – the weights of the corresponding indicators in neuron  $k$ ;  $b_k$  is the threshold value of neuron  $k$ ;  $f_k(v)$  is activation function of the  $k$ -th neuron;  $y_k$  is output data

При прогнозировании значений временного ряда с помощью нейросетевых моделей в качестве входных данных, в первую очередь, используются данные того же ряда за прошлые периоды времени. Одним из основных преимуществ нейросетевых моделей по сравнению с другими является достаточно произвольный характер функции активации, что позволяет моделировать как линейные, так и нелинейные процессы.

Выделяют три основных класса функций активации (с примерами соответствующих функций).

1. Функция единичного скачка (пороговая функция):

$$f(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 0; \\ 0, & v < 0. \end{cases} \quad (14)$$

2. Кусочно-линейная функция:

$$f(v) = \begin{cases} 1, & v \geq 1/2; \\ |v|, & -\frac{1}{2} < v < 1/2; \\ 0, & v \leq -1/2. \end{cases} \quad (15)$$

3. Сигмоидальная функция:

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}}. \quad (16)$$

Все нейросетевые модели можно разделить на следующие классы.

1. Сети прямого распространения: однослойные, многослойные.

2. Рекуррентные сети.

*Сети прямого распространения* состоят из одного или многих слоев нейронов, при этом входными данными слоя  $N$  являются выходные данные слоев с номерами, меньшими  $N$  (как правило, используются сети предыдущего уровня, то есть с номером  $N - 1$ ). При этом входными данными для слоя  $N = 1$  являются данные из внешнего источника. Данный вид нейросетевых моделей, в свою очередь, разделяют на однослойные (при  $N = 1$ ) и многослойные ( $N > 1$ ).

*Рекуррентные сети*, в свою очередь, имеют в своем составе, по крайней мере, одну обратную связь, то есть в числе входных данных одного из нейронов могут использоваться его выходные данные.

*Модели прогнозирования на основе цепей Маркова.* Марковский процесс – случайный процесс, значения которого в момент  $t$  зависят только от значений данного процесса в момент  $t - 1$ . Как правило, в реальных задачах прогнозирования используются марковские процессы с дис-

кретным временем. Основными параметрами марковской цепи является множество возможных состояний и матрица переходных вероятностей. Пример марковской цепи с дискретными временем и состояниями представлен на рис. 2.

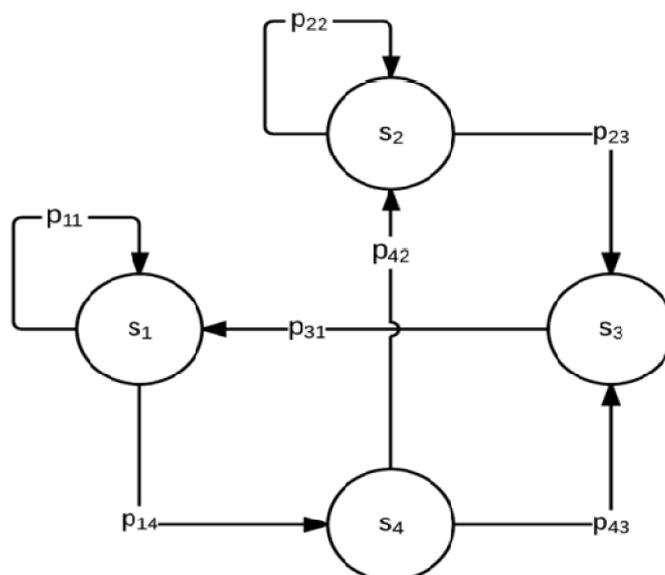


Рис. 2. Марковская цепь с дискретными временем и состояниями:

$s_1, \dots, s_4$  – возможные состояния системы;  $p_{ij}$  – вероятность перехода из состояния  $i$  в состояние  $j$ ,  
 $i = 1, 4, j = 1, 4$

Fig. 2. Markov chain with discrete time and states:

$s_1, \dots, s_4$  – possible states of the system;  $p_{ij}$  – is the probability of transition from state  $i$  to state  $j$ ,  
 $i = 1, 4, j = 1, 4$

Важно отметить, что, несмотря на определение марковского процесса, при прогнозировании определенных показателей в момент  $t$  вполне возможно учитывать состояния в моменты времени в моменты  $t-2, t-3$  и т. д., помимо значений в момент времени  $t-1$ . В таком случае текущее состояние прогнозируемой системы описывается не только значением ее параметров в текущий момент времени, но и в прошлом.

Модели на базе классификационно-регрессионных деревьев (*classification and regression trees, CART*) разработаны для моделирования процессов, на которые оказывают влияние как непрерывные внешние факторы, так и категориальные. Таким образом, в ситуации, когда внешние факторы, оказывающие влияние на процесс  $Y_t$ , непрерывны, используются регрессионные деревья. Когда факторы категориальные, то используют классификационные деревья. В случае необходимости учета факторов обоих типов необходимо применять смешанные классификационно-регрессионные деревья. Согласно упомянутой модели, прогнозное значение временного ряда зависит от предыдущих значений и независимых переменных, как это и отражено на рис. 3: на исходный процесс  $Y_t$  воздействуют внешние дискретные факторы  $X_t$ , а также категориальные факторы  $Z$ .

Предшествующие значения процесса сравниваются с константой  $Y_0$ . В случае, если значение  $Y_{t-1}$  меньше  $Y_0$ , то осуществляется проверка:  $X_t > X_{1,1}$ . Если неравенство не выполняется, то  $Y_{t-1} = P_3$ , иначе проверки продолжают до того момента, пока не будет найден лист дерева, в котором происходит определение будущего значения процесса  $Y_t$ . При определении значения в расчет принимаются как непрерывные переменные  $X_t$ , так и категориальные  $Z$ , для которых проводится проверка наличия значения в одном из заранее определенных подмножеств. Определение значений пороговых констант, например,  $Y_0, X_{1,1}$ , а также подмножеств  $Z_{1,1}, Z_{1,2}$  выполняется на этапе обучения дерева.

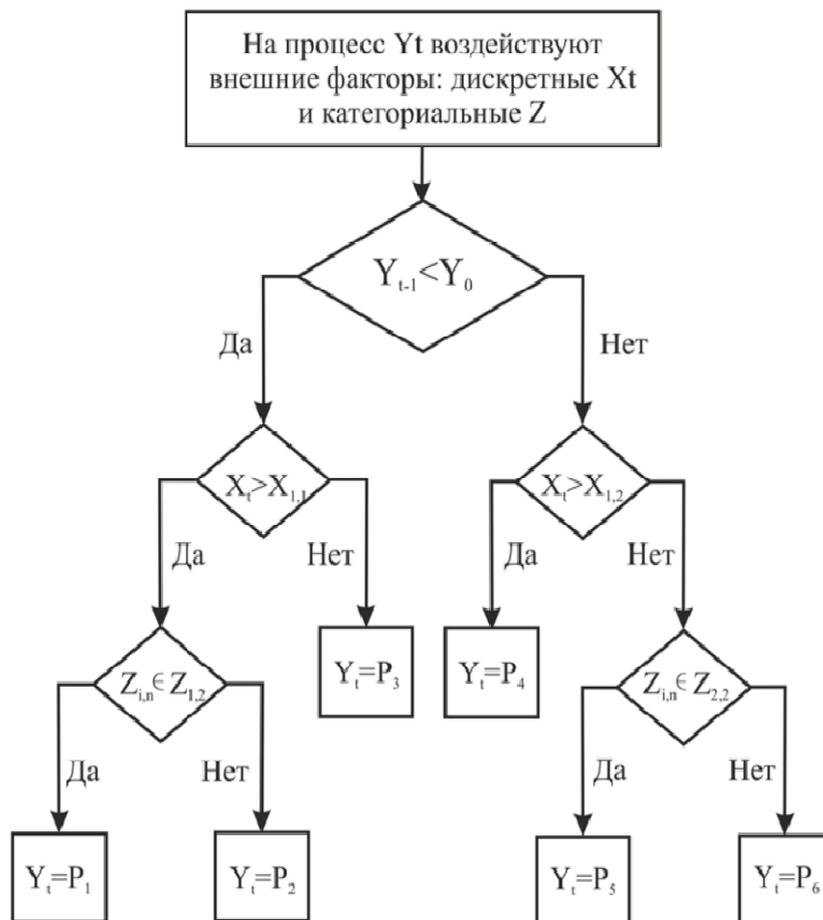


Рис. 3. Бинарное классификационно-регрессионное дерево  
 Fig. 3. Binary classification-regression tree

Модели на базе классификационно-регрессионных деревьев дают возможность промоделировать зависимость будущей величины процесса  $Y_t$  при помощи структуры дерева, а также пороговых констант и подмножеств. Описанные модели составляют базу для математического моделирования трендов различных показателей, которые далее задействуются при формировании целевой функции выбора управленческих альтернатив.

Для формирования прогноза динамики показателей, влияющих на эффективность работы промышленного предприятия или организации, необходимо осуществить выбор адекватной модели прогнозирования. Это возможно осуществить на основе алгоритма, блок-схема которого представлена на рис. 4.

Целесообразность применения различных моделей прогнозирования отражена в табл. 1, значения, приведенные в колонках (0; 0,5; 1), указывают на то, что при имеющихся условиях ту или иную модель применять целесообразно (1), применять ограниченно возможно (0,5), применять нецелесообразно (0).

После того как будут выбраны адекватные модели прогнозирования для всех основных показателей, способных повлиять на результаты работы предприятия (организации), становится возможным осуществить выбор целевых функций и критериев задачи оптимального выбора управленческих альтернатив по стратегическому развитию компании. При этом можно использовать достаточно большой список целевых показателей и применяемых ограничений, например, таких как: максимизация продаж при заданной прибыли; минимизация потерь при заданном объеме производства; минимизация товарного запаса при заданном объеме производства; максимизация прибыли при выполнении производственного плана выпуска продукции.

В общем виде задача оптимизации выбора стратегических управленческих альтернатив развития промышленного предприятия (организации) формулируется следующим образом. Рассмотрим задачу выбора из того или иного альтернативного решения (далее альтернативы), по-

звляющего получить максимальную прибыль промышленного предприятия за заданный горизонт планирования.

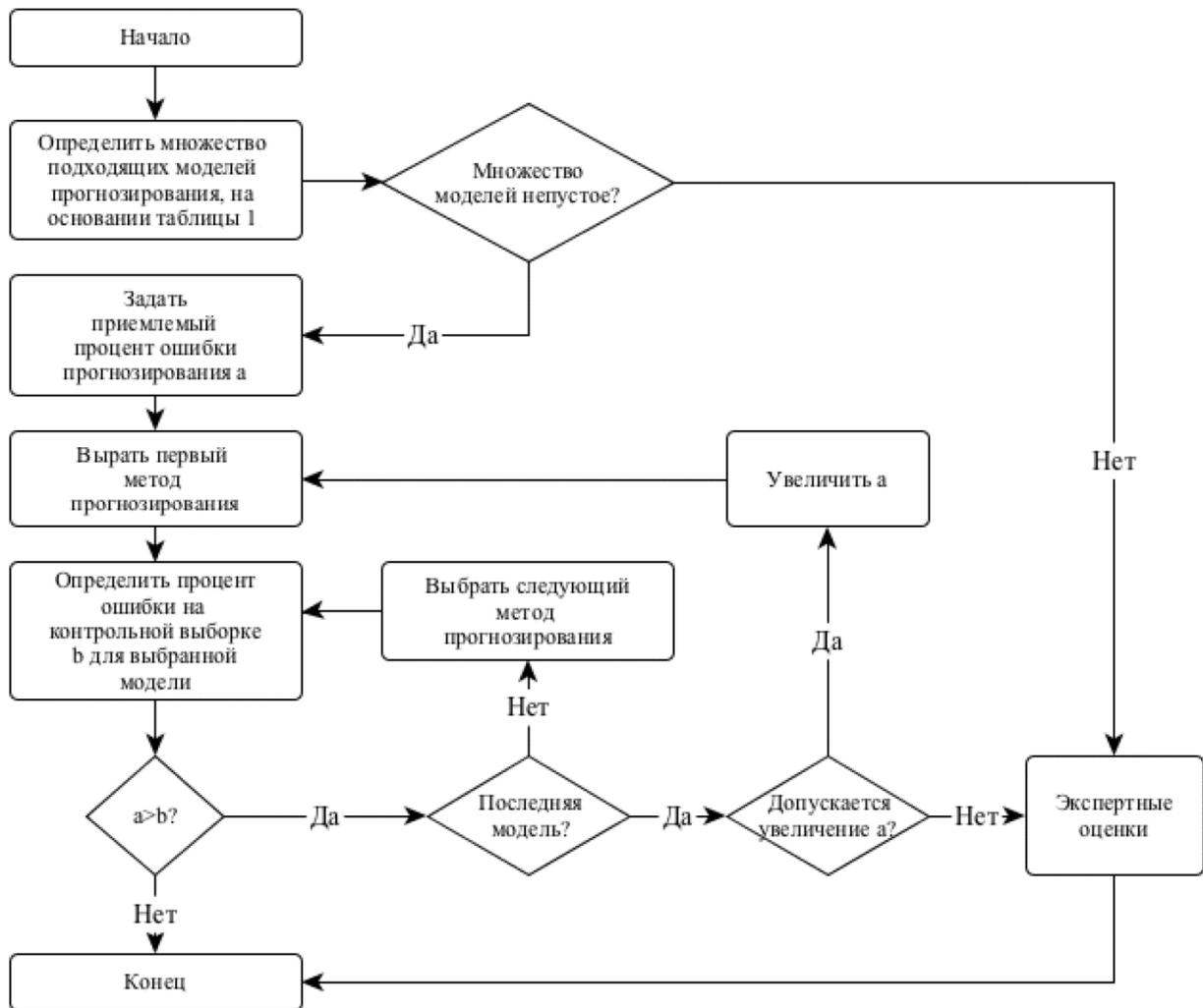


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения модели прогнозирования факторов  
Fig. 4. Block diagram of the algorithm for determining the forecasting model of factors

Целесообразность использования моделей при определенных условиях

Таблица 1

Table 1

Feasibility of using models under certain conditions

Класс моделей	Краткосрочный	Среднесрочный	Долгосрочный	Только линейные процессы	Трудоемкость расчета	Проверяемость поиска решения	Опыт практического применения
Регрессионные модели	0,5	0,5	1	1	0	1	1
Авторегрессионные модели ARIMAX	1	0,5	0	1	0	1	1
Авторегрессионные модели GARCH	1	0,5	0	1	0	1	1
Модели экспоненциального сглаживания	0,5	1	0	0	0	1	1
Нейросетевые модели	1	1	1	0	1	0	1
Модели на базе цепей Маркова	1	1	1	1	1	1	0,5
Модели на базе классификационно-регрессионных деревьев	1	1	1	0	1	0	0,5

Обозначим  $P_a(S)$  – прибыль, полученная в результате реализации альтернативы  $a$  при выбранном сценарии развития  $S$ .

При этом  $P_a(S)$  можно вычислить с помощью выражения

$$P_a(S) = \sum_{i=1}^Z y_{ai}(S) \cdot r_i(S) - \sum_{i=1}^Z \sum_{j=1}^B w_j \cdot x_{aji} \cdot y_{ai}(S) - V_a, \quad (17)$$

где  $F(S, Z)$  – номер альтернативы, которая дает наибольшую прибыль при выбранном сценарии развития  $S$  и избранном горизонте планирования  $Z$ ;  $a$  – количество альтернатив;  $B$  – количество факторов производства, для которых строится прогноз;  $Z$  – количество периодов, на которые строится прогноз показателей;  $x_{ijz}$  – прогноз стоимости фактора  $j$  при выбранной альтернативе  $i$  в год  $z$ ;  $y_{iz}(S)$  – прогноз выпуска продукции при выбранной альтернативе  $i$  в год  $z$ , в зависимости от выбранного сценария развития  $S$  (например: негативный, умеренный, позитивный);  $r_z(S)$  – прогноз стоимости единицы продукции в год  $z$ ;  $V_a$  – постоянные затраты на осуществление альтернативы  $s$ ;  $w_j$  – расход фактора  $i$  в натуральных единицах на выпуск единицы продукции.

Тогда целевая функция определяется нахождением управленческой альтернативы, которая позволит получить в результате ее реализации максимальную прибыль при выбранном сценарии развития  $S$ .

$$\Phi = \max \{P_a(S)\}. \quad (18)$$

Поиск оптимальных решений в указанной ситуации можно осуществить с помощью имитационной модели, блок-схема алгоритма которой приведена на рис. 5. Если рассчитать прибыль для каждой альтернативы и горизонта планирования достаточно большое число раз, можно выбрать оптимальную альтернативу на основе наибольшей средней прибыли или любого другого критерия.

В случае, если вероятность того или иного сценария вычислить или задать экспертно проблематично, можно воспользоваться методами принятия решений в условиях неопределенности. Основные критерии, используемые в процессе принятия решений в условиях неопределенности, представлены ниже.

*Критерий Вальда* (критерий «максимина») характеризуется крайне осторожной позицией относительно неопределенности результата:

$$Z_{MM} = \max_i \{K_i\}, \quad (19)$$

где  $K_i = \min_j \{a_{ij}\}$ ;  $i$  – вариант возможного решения ЛПР ( $i = 1, 2, \dots, m$ );  $j$  – вариант возможной ситуации ( $j = 1, 2, \dots, n$ );  $a_{ij}$  – доход/прибыль ЛПР, если будет принято решение  $i$ , а ситуация сложится  $j$ -я;  $A = (a_{ij})$  – матрица полезностей.

*Критерий «максимакса»* характеризуется крайне оптимистической позицией отношения ЛПР к неопределенности результата:

$$Z_H = \max_i \{K_i\}, \quad (20)$$

где  $K_i = \max_j \{a_{ij}\}$ ;  $i$  – вариант возможного решения ЛПР ( $i = 1, 2, \dots, m$ );  $j$  – вариант возможной ситуации ( $j = 1, 2, \dots, n$ );  $a_{ij}$  – доход/прибыль ЛПР, если будет принято решение  $i$ , а ситуация сложится  $j$ -я;  $A = (a_{ij})$  – матрица полезностей.

*Критерий Гурвица* (критерий «оптимизма-пессимизма» или «альфа-критерий») является взвешенной позицией «пессимизма-оптимизма», отражающей отношение ЛПР к неопределенности экономического результата:

$$Z_{HW} = \max_i \{K_i\}, \quad (21)$$

где  $K_i = c \cdot \min_j \{a_{ij}\} + (1-c) \cdot \max_j \{a_{ij}\}$ ;  $c$  – соответствующий весовой коэффициент выбираемый ЛПР;  $i$  – вариант возможного решения ЛПР ( $i = 1, 2, \dots, m$ );  $j$  – вариант возможной ситуации

( $j = 1, 2, \dots, n$ );  $a_{ij}$  – доход/прибыль ЛПР, если будет принято решение  $i$ , а ситуация сложится  $j$ -я;  
 $A = (a_{ij})$  – матрица полезностей.

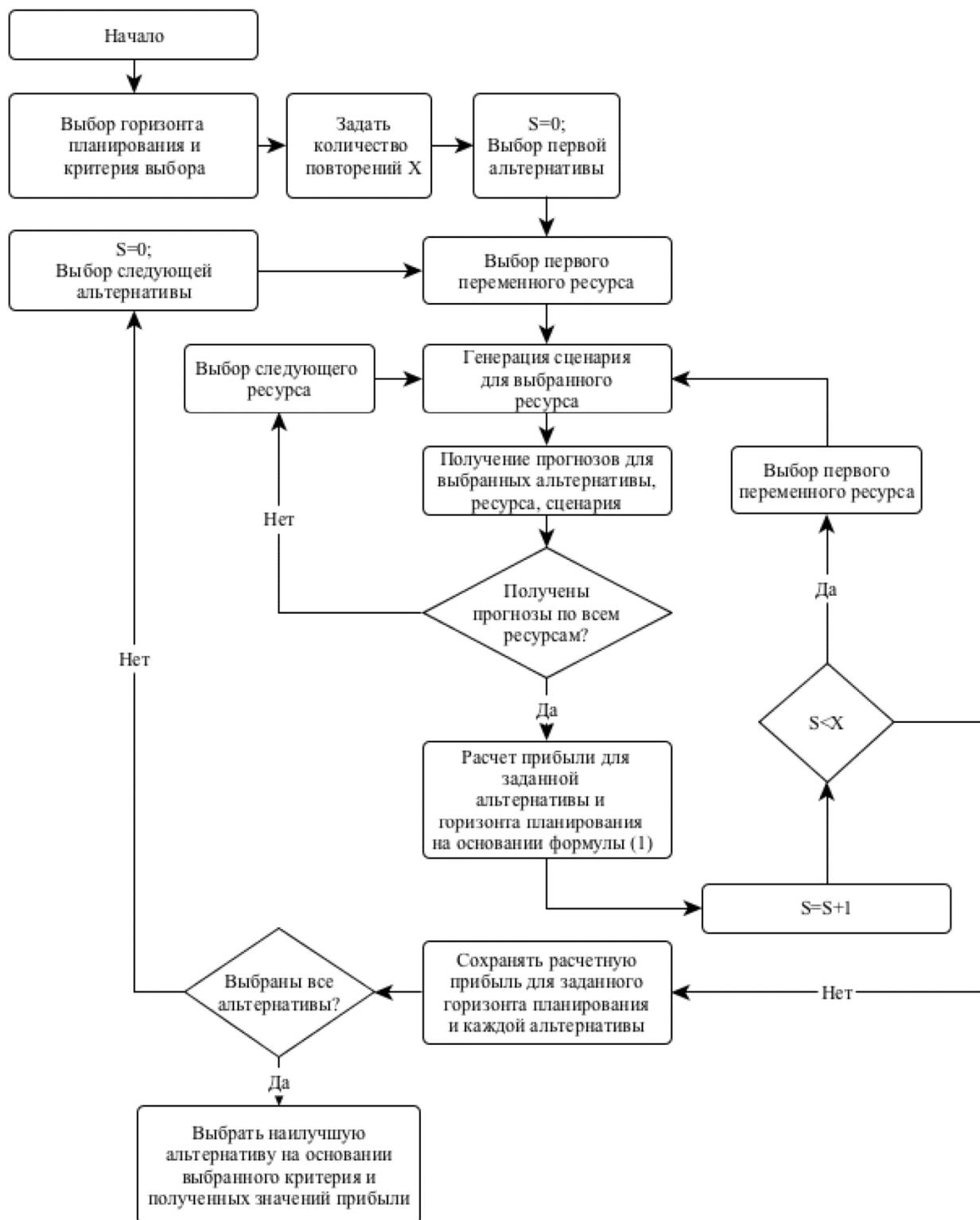


Рис. 5. Блок-схема поиска наилучшей альтернативы для заданного горизонта планирования и критерия выбора оптимального значения

Fig. 5. Block diagram of the search for the best alternative for a given planning horizon and criterion for choosing the optimal value

*Критерий Сэвиджа (критерий потерь от «минимакса»)* характеризуется крайне осторожной (пессимистической) позицией отношения ЛПР к возможным потерям из-за отсутствия достоверных сведений о том, какая из ситуаций, влияющих на результат, будет иметь место в конкретном случае:

$$Z_s = \min_i \{K_i\}, \quad (22)$$

где  $K_i = \max_j \{l_{ij}\}$ ,  $l_i = \max_j \{a_{ij}\} - a_{ij}$ ;  $c$  – соответствующий весовой коэффициент, выбираемый ЛПР;  $i$  – вариант возможного решения ЛПР ( $i = 1, 2, \dots, m$ );  $j$  – вариант возможной ситуации ( $j = 1, 2, \dots, n$ );  $a_{ij}$  – доход/прибыль ЛПР, если будет принято решение  $i$ , а ситуация сложится  $j$ -я;  $A = (a_{ij})$  – матрица полезностей;  $L = (l_{ij})$  – соответствующая матрица потерь и рисков.

Описанная математическая модель задачи реализована в виде обособленной информационно-аналитической системы или отдельного программного модуля, который может быть встроен в соответствующую информационно-вычислительную систему промышленного предприятия или организации.

### Заключение

Рассмотренные в статье вопросы показывают, что развитие организационных и корпоративных систем в условиях нарастающей нестабильности в мире должно базироваться на использовании адекватных математических методов и моделей, информационных технологиях, продвинутых системах анализа и обработки данных, а также технологиях извлечения необходимой информации из больших объемов данных и др.

Особое значение имеет то, что достоинствами предложенного в статье алгоритма модели повышения эффективности управления организационными и корпоративными системами является возможность использования вариативных методов прогнозирования и способность подстраиваться под сложность и частоту необходимости решения той или иной управленческой задачи. Например, сценарии среднесрочного и долгосрочного развития компании могут оцениваться с использованием более совершенных прогностических моделей, а также подвергаться разностороннему анализу чувствительности на основе изменения горизонта прогнозирования или планирования, изменения веса каждого фактора, оценки влияния точности прогноза и возможных отклонений. В этом случае применение описанной модели поможет ЛПР в существенной мере формализовать свой подход, что даст возможность обосновать решение высокоуровневой задачи перед собственниками компании или, например, перед кредитной организацией.

Применение на практике представленной модели анализа и выбора управленческих альтернатив на основе прогнозирования динамики ситуаций обеспечивает столь необходимые в современных условиях деятельности промышленных предприятий и организаций гибкость и оперативность принятия управленческих решений.

### Литература

1. Бурков, В.Н. Введение в теорию управления организационными системами / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков; под ред. Д.А.Новикова. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 264 с.
2. Бурков, В.Н. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль: учеб. пособие / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко; под ред. Д.А. Новикова. – М.: Ленанд, 2013. – 216 с.
3. Бурков, В.Н. Модели и методы управления организационными системами / В.Н. Бурков, В.А. Ириков. – М.: Наука, 1994. – 532 с.
4. Бушуева, Н.С. Модели и методы проактивного управления программами организационного развития: моногр. / Н.С. Бушуева. – Киев: Наук. світ, 2007. – 200 с.
5. Венцель, Е.С. Исследование операций: Задачи, принципы, методология / Е.С.Венцель. – М.: Высшая школа, 2008. – 208 с.
6. Гельруд, Я.Д. Управление проектами: методы, модели, системы: моногр. / Я.Д. Гельруд, О.В. Логиновский; под ред. д-ра техн. наук проф. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2015. – 330 с.

7. Голлай, А.В. Формирование системы взаимосвязанных показателей промышленного предприятия в рамках управления его технологическим развитием / А.В. Голлай, О.В. Логиновский // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2019. – С. 3104–3109.
8. Голлай, А.В. Управление проектами по развитию промышленного предприятия в рамках адаптивно-технологического подхода / А.В. Голлай, О.В. Логиновский // Теория активных систем – 50 лет. Материалы международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 360–375.
9. Губко, М.В. Модель формирования бизнес-схем в транснациональных корпорациях / М.В. Губко // Системы управления и информационные технологии. – 2003. – № 1-2 (12). – С. 44–48.
10. Губко, М.В. Теория игр / М.В. Губко, Д.А. Новиков. – М.: Синтез, 2002. – 744 с.
11. Ириков, В.А. Целостная система государственно-частного управления инновационным развитием как средство удвоения темпов выхода России из кризиса и посткризисного роста: моногр. / В.А. Ириков, Д.А. Новиков, В.Н. Тренев. – М.: ИПУ РАН, 2009. – 228 с.
12. Коренная, К.А. Интегрированные информационные системы промышленных предприятий: моногр. / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. д-ра техн. наук проф. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – 315 с.
13. Коренная, К.А. Управление промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности: моногр. / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. д.т.н., проф. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – 403 с.
14. Логиновский, О.В. Государственное управление промышленностью в регионах РФ: науч. изд. / О.В. Логиновский, И.П. Болодурина – М.: Машиностроение, 2003. – 368 с.
15. Логиновский, О.В. Корпоративное управление: науч. изд. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение, 2007. – Т. 2. – 624 с.
16. Логиновский, О.В. Построение современных корпоративных информационных систем / О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков, А.А. Шинкарев // Управление большими системами: сб. тр. – 2019. – № 81. – С. 113–146.
17. Логиновский, О.В. Управление группой предприятий / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2008. – 480 с.
18. Логиновский, О.В. Управление развитием региона: науч. изд. / О.В. Логиновский, Н.М. Рязанов. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 3. – 560 с.
19. Логиновский, О.В. Жизненный цикл современных корпоративных приложений и управление на основе потока событий / О.В. Логиновский, А.А. Шинкарев // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2019. – С. 2958–2962.
20. Логиновский, О.В. Стратегическое управление регионами: от сложившихся подходов к учету современных реалий / О.В. Логиновский, А.А. Максимов // Проблемы управления. – 2017. – № 6. – С. 19–31.
21. Логиновский, О.В. Стратегическое управление корпорациями в современных условиях ведения бизнеса / О.В. Логиновский, А.Л. Шестаков, А.А. Шинкарев // Экономика и менеджмент систем управления. – 2019. – № 2-1 (32). – С. 152–169.
22. Логиновский, О.В. Управление промышленным предприятием: науч. изд. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 1. – 576 с.
23. Логиновский, О.В. Управление процессом выбора вариантов поведения компании на основе прогнозирования динамики ситуаций / О.В. Логиновский, А.В. Зимин // Динамика сложных систем. – 2015. – № 1. – С. 15–22.
24. Максимов, А.А. Адаптивное управление промышленной корпорацией в условиях неопределенности (на примере ферросплавных производств) / А.А. Максимов, К.А. Коренная, О.В. Логиновский // Проблемы теории практики управления. – 2012. – № 9–10. – С. 145–150.
25. Манишин, С.А. Формирование финансового механизма стимулирования инновационной деятельности промышленных корпораций в условиях цифровой экономики / С.А. Манишин // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 5. – С. 15–19.
26. Новиков, Д.А. Рефлексия и управление: математические модели / Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2013. – 412 с.

27. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. – 604 с.
28. Рогов, С.Ф. Математические модели в теории принятия решений / С.Ф. Рогов. – М.: Компания Спутник+, 2007. – 428 с.
29. Стронгин, Р.Г. Исследование операций. Модели экономического поведения / Р.Г. Стронгин. – Интернет Университет информационных технологий БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. – 208 с.
30. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, В.Н. Бурков, И.В. Буркова, Я.Д. Гельруд, К.А. Коренная, А.А. Максимова, А.Л. Шестаков; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.
31. Черноруцкий, И.Г. Методы оптимизации в теории управления / И.Г. Черноруцкий. – СПб.: Питер, 2004. – 104 с.
32. Чхартишвили, А.Г. Теоретико-игровые модели информационного управления / А.Г. Чхартишвили. – М.: ПМСОФТ, 2004. – 227 с.
33. Шестак, В.П. Стимулирующее финансирование инновационной деятельности / В.П. Шестак // Финансы: теория и практика. – 2017. – Т. 21, вып. 5. – С. 40–49.
34. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко, А.Л. Шестаков, А.А. Шинкарев; под ред. О.В. Логиновского. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 450 с.
35. Burkov, V. Introduction to theory of control in organizations / V. Burkov, M. Goubko, N. Korgin, D. Novikov. – Boca Raton, USA: CRC Press, 2015. – 346 с.
36. Burkov, V.N. Mechanisms for Ecological- Economic Systems / V.N. Burkov, D.A. Novikov, A.V. Shchepkin. – Berlin: Springer, 2015. – 174 p.
37. Korennaya, K.A. Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations / K.A. Korennaya, O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.V. Zimin; Editorship by doctor of science, professor Shestakov A.L. – Kostanay: Kostanay State University by A. Baitursynov Press, 2014. – 230 p.
38. Loginovskiy, O.V. Strategic management of the regions in the context of domestic and foreign experience / O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.L. Shestakov // Applied Mathematics and Control Sciences. – 2020. – No. 3. – P. 123–149.

**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; loginovskiiiov@susu.ru.

**Максимов Александр Александрович**, д-р техн. наук, депутат, Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации VII созыва, г. Москва.

**Золотых Светлана Анатольевна**, главный специалист, Министерство информационных технологий, связи и цифрового развития Челябинской области, г. Челябинск; аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; zsa-250270@mail.ru.

**Логиновская Валерия Олеговна**, начальник отдела координации национальной программы «Цифровая экономика» Департамента координации и реализации проектов по цифровой экономике, Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, г. Москва; аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; valeria.login@yandex.ru.

*Поступила в редакцию 21 декабря 2020 г.*

## DEVELOPMENT OF ORGANIZATIONAL AND CORPORATE SYSTEMS USING MODERN MATHEMATICAL METHODS AND MODELS

O.V. Loginovskiy<sup>1</sup>, loginovskiiiov@susu.ru,

A.A. Maximov<sup>2</sup>,

S.A. Zolotykh<sup>1,3</sup>, zsa-250270@mail.ru,

V.O. Loginovskaya<sup>1,4</sup>, valeria.login@yandex.ru

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

<sup>2</sup> State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation of the VII convocation,  
Moscow, Russian Federation,

<sup>3</sup> Ministry of Information Technologies, Communications and Digital Development  
of the Chelyabinsk Region, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>4</sup> Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation,  
Moscow, Russian Federation

Analysis of modern technologies, methods and models used in various types of organizational and corporate structures convincingly proves that the improvement of preparation and decision-making for the management of these structures is currently carried out mainly on the basis of often outdated and not quite corresponding to modern capabilities of computer technology, and also information, software and software developments. The article shows that in modern conditions of global instability in the world, it becomes necessary to use adequate methods for data analysis and preparation of managerial decision-making on the development of organizational and corporate structures. Proposals and recommendations for improving the processes of analytical data processing, extracting useful information from large amounts of data located in the relevant organizational and corporate systems are presented, as well as adequate mathematical models and algorithms that can be successfully used to improve the quality of management decisions by the management of companies. **The purpose of the study** is to form methods and models for the analysis of strategic alternatives for the development of organizational and corporate systems using the concept of big data, technologies for extracting the necessary information from existing data banks, etc. **Materials and methods.** The research methods are based on modern information and analytical technologies, data science and models developed by the authors for the analysis of strategic alternatives for the development of organizational and corporate systems. **Results.** The scientific provisions and developments presented in the article can be used to improve the efficiency of management in various information and analytical systems for various management structures. **Conclusion.** The results of the research presented in this article make it possible to perform a qualitative analysis of data, to model the options for the work of organizational and corporate structures in an on-line mode, which makes it possible to increase the efficiency of managing their development based on a comparison of alternative options for management decisions.

*Keywords: information, data analysis, management decision making, mathematical methods and models, alternative options.*

### References

1. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A. *Vvedeniye v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Introduction to the theory of management of organizational systems]. Moscow, Book House Librocom, 2009. 264 p.

2. Burkov V.N., Burkova I.V., Gubko M.V.; Novikov D.A. (ed.). *Mekhanizmy upravleniya: Upravleniye organizatsiyey: planirovaniye, organizatsiya, stimulirovaniye, kontrol': ucheb. posobiye* [Management mechanisms: Organization management: planning, organization, stimulation, control: tutorial]. Moscow, Lenand Publ., 2013. 216 p.

3. Burkov V.N., Irikov V.A. *Modeli i metody upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Models and methods of management of organizational systems]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 532 p.

4. Bushueva N.S. *Modeli i metody proaktivnogo upravleniya programmami organizatsionnogo raz-*

*vitiya: monogr.* [Models and methods of proactive management of organizational development programs: monograph]. Kiev, Nauk. svit Publ., 2007. 200 p.

5. Wentzel E.S. *Issledovaniye operatsiy: Zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations Research: Objectives, Principles, Methodology]. Moscow, Higher school Publ., 2008. 208 p.

6. Gelrud Ya.D., Loginovskiy O.V.; Dr. tech. sciences prof. Shestakov A.L. (ed.). *Upravleniye proyektami: metody, modeli, sistemy: monogr.* [Project management: methods, models, systems: monograph]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2015. 330 p.

7. Gollay A.V., Loginovsky O.V. [Formation of a system of interrelated indicators of an industrial enterprise within the framework of managing its technological development]. *Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on Management Problems of the VSPU-2019*. Institute for Management Problems V.A. Trapeznikov RAS, 2019, pp. 3104–3109. (in Russ.)

8. Gollay A.V., Loginovskiy O.V. [Management of projects for the development of an industrial enterprise in the framework of an adaptive-technological approach]. *Theory of active systems – 50 years. Materials of the international scientific and practical conference*, 2019, pp. 360–375. (in Russ.)

9. Gubko M.V. [Model of the formation of business schemes in transnational corporations]. *Management systems and information technologies*, 2003, no. 1-2 (12), pp. 44–48. (in Russ.)

10. Gubko M.V., Novikov D.A. *Teoriya igr* [Game theory]. Moscow, Sinteg Publ., 2002. 744 p.

11. Irikov V.A., Novikov D.A., Trenev V.N. *Tselostnaya sistema gosudarstvenno-chastnogo upravleniya innovatsionnym razvitiyem kak sredstvo udvoeniya tempov vykhoda Rossii iz krizisa i postkrizisnogo rosta: monogr.* [Integral system of public-private management of innovative development as a means of doubling the pace of Russia's exit from the crisis and post-crisis growth: monograph]. Moscow, IPU RAN, 2009. 228 p.

12. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A.; Dr. tech. sciences prof. Shestakov A.L. (ed.). *Integrirovannyye informatsionnyye sistemy promyshlennykh predpriyatiy: monogr.* [Integrated information systems of industrial enterprises: monograph]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012. 315 p.

13. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A.; Dr. tech. sciences prof. Shestakov A.L. (ed.). *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami v usloviyakh global'noy nestabil'nosti: monogr.* [Industrial enterprise management in conditions of global instability: monograph]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013. 403 p.

14. Loginovskiy O.V., Bolodurina I.P. *Gosudarstvennoye upravleniye promyshlennost'yu v regionakh RF: nauch. izd.* [State management of industry in the regions of the Russian Federation: scientific ed.]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003. 368 p.

15. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Korporativnoye upravleniye: nauch. izd.* [Corporate governance: scientific ed.]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2007, vol. 2. 624 p.

16. Loginovskiy O.V., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. [Building modern corporate information systems]. *Management of large systems: collection of works*, 2019, no. 81, pp. 113–146. (in Russ.)

17. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye gruppy predpriyatiy* [Group management of enterprises]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2008. 480 p.

18. Loginovskiy O.V., Ryazanov N.M. *Upravleniye razvitiyem regiona: nauch. izd.* [Regional development management: scientific ed.]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006, vol. 3. 560 p.

19. Loginovskiy O.V., Shinkarev A.A. [Life cycle of modern corporate applications and management based on the flow of events]. *Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on Management Problems of VSPU-2019*. Institute for Management Problems V.A. Trapeznikov RAS, 2019, pp. 2958–2962. (in Russ.)

20. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. [Strategic management of regions: from the prevailing approaches to taking into account modern realities]. *Management problems*, 2017, no. 6, pp. 19–31. (in Russ.)

21. Loginovskiy O. V., Shestakov A. L., Shinkarev A. A. [Strategic management of corporations in modern conditions of doing business]. *Economics and management of control systems*, 2019, no. 2-1 (32), pp. 152–169. (in Russ.)

22. Loginovskiy O. V., Maksimov A. A. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyem: nauch. izd.* [Industrial enterprise management: scientific ed.]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2006, vol. 1. 576 p.

23. Loginovskiy O. V., Zimin A. V. [Management of the process of choosing options for the company's behavior based on predicting the dynamics of situations]. *Dynamics of complex systems*, 2015, no. 1, pp. 15–22. (in Russ.)
24. Maksimov A.A., Korennaya K.A., Loginovsky O.V. [Adaptive management of an industrial corporation in conditions of uncertainty (on the example of ferroalloy production)]. *Problems of management theory*. Moscow, 2012, no. 9–10, pp. 145–150. (in Russ.)
25. Manshilin S.A. [Formation of a financial mechanism for stimulating innovative activity of industrial corporations in the digital economy]. *Innovations and investments*, 2020, no. 5, pp. 15–19. (in Russ.)
26. Novikov D.A., Chkhartishvili A.G. *Refleksiya i upravleniye: matematicheskiye modeli* [Reflection and control: mathematical models]. Moscow, Publishing house of physical and mathematical literature, 2013. 412 p.
27. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [The theory of management of organizational systems]. Moscow, Publishing house of physical and mathematical literature, 2012. 604 p.
28. Rogov S.F. *Matematicheskiye modeli v teorii prinyatiya resheniy* [Mathematical models in decision theory]. Moscow, Kompaniya Sputnik+ Publ., 2007. 428 p.
29. Strongin R.G. *Issledovaniye operatsiy. Modeli ekonomicheskogo povedeniya* [Operations research. Models of economic behavior]. Internet University of Information Technologies BINOM, Knowledge Laboratory, 2007. 208 p.
30. Loginovskiy O.V., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Maksimov A.A., Shestakov A.L.; Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. (eds.). *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monogr.* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems: monograph]. Moscow, INFRA-M Publ., 2018. 410 p.
31. Chernorutsky I.G. *Metody optimizatsii v teorii upravleniya* [Optimization methods in control theory]. St. Petersburg, Piter Publ., 2004. 104 p.
32. Chkhartishvili A.G. *Teoretiko-igrovyye modeli informatsionnogo upravleniya* [Game-theoretic models of information management]. Moscow, PMSOFT Publ., 2004. 227 p.
33. Shestak V.P. [Stimulating financing of innovation activity]. *Finance: theory and practice*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 40–49. (in Russ.)
34. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., Shinkarev A.A.; Loginovskiy O.V. (ed.). *Effektivnoye upravleniye organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monogr.* [Effective management of organizational and production structures: monograph]. Moscow, INFRA-M Publ., 2020. 450 p.
35. Burkov V., Goubko M., Korgin N., Novikov D. *Introduction to theory of control in organizations*. Boca Raton, USA, CRC Press, 2015. 346 c.
36. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems*. Berlin: Springer, 2015. 174 p.
37. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Zimin A.V.; Dr. tech. sciences prof. Shestakov A.L. (ed.). *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations*. Kostanay, Kostanay State University by A. Baitursynov Press, 2014. 230 p.
38. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Shestakov A.L. Strategic management of the regions in the context of domestic and foreign experience. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2020, no. 3, pp. 123–149.

**Received 21 December 2020**

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Развитие организационных и корпоративных систем с использованием современных математических методов и моделей / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, С.А. Золотых, В.О. Логиновская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 116–135. DOI: 10.14529/ctcr210111

#### FOR CITATION

Loginovskiy O.V., Maximov A.A., Zolotikh S.A., Loginovskaya V.O. Development of Organizational and Corporate Systems Using Modern Mathematical Methods and Models. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 116–135. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210111

# Автоматизированные системы управления технологическими процессами

DOI: 10.14529/ctcr210112

## A MULTILEVEL RESOURCE-SAVING BLAST FURNACE PROCESS CONTROL

*T.A. Barbasova, barbasovata@susu.ru*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

A multilevel resource-saving blast furnace process control is considered. The resource-saving control is provided for operating, adaptation, technical and economic control in the automated systems of blast-furnace processes.

It is proposed to form optimal operation modes of blast furnace heating, metal charge structures, natural gas and oxygen consumption. Decisions are made using Kohonen neural networks taking into account current and planned parameters of coke quality, iron ore, raw materials and blast.

At the level of operating control, the work suggests a model predictive control to improve the resource conservation indicators. The method is based on decomposition of the general problem of the process dynamics identification on particular problems: dynamic synchronization and identification of process transfer functions.

At the level of adaptive control, optimal operating modes of blast furnaces are expedient to be developed with respect to blast furnace heating, structure of metal charge, natural gas and oxygen rate considering the current and planned parameters of coke, blasting. The blast furnace operating modes are suggested to be determined based on Kohonen neural networks.

In evaluating the efficiency of introducing the model predictive control, the existing actual statistics of scatter of BF mode parameters should be based upon. The fact is that the introduction of model predictive control assumes no radical change of the BF melt technology. Like in all the control systems, the BF process is considered as the set control object with all its characteristics. Changing process settings, raw material content does not introduce any cardinal variation in the scatter of process characteristics. However, in this case a transient process occurs which is necessary for the control system to identify the changing conditions. The transient process is inherent to all the control systems and the blast furnace process is not an exclusion. As a result of transient process, the control system is set to the optimal mode.

*Keywords: blast furnace process, blast-furnace process optimization, self-organizing maps, Kohonen neural networks, cluster analysis, U-matrix, model predictive control.*

### Introduction

The blast furnace is a complex object for control, since such processes as fuel burning, metal smelting, iron reduction and carbonization etc. take place in it.

The modern methods for analysis of blast-furnace smelting processes are based on the achievements of multiple fields of science and technology. The blast furnace process models have been studied for over the course of many years [1–16]. Among the researchers, a considerable contribution into the development of blast furnace process studying were made by I.G. Tovarovskiy [1–3], N.A. Spirin, V.V. Lавров, V.G. Lisienko [4], V.G. Lisienko [5], X. Wen, H. Cao, B. Hon, E. Chen, H. Li [6], J. Kule [7], M. Sasaki, K. Ono, A. Suzuki [8] et al.

One of the existing approaches to the blast furnace production maintenance is the use of the table of factors influencing the coke rate and blast furnace performance [1]. The method was developed based on generalization of the blast-furnace smelting dependencies and basic blast furnace process principles. It includes the charge mixture characteristics (the contents of iron, ore), coke quality (hardness M25, abrasion strength M10, size + 80 mm, ash), chemical composition of cast iron (Si, Mn, F, S), blasting parameters (blast temperature, oxygen concentration, humidity) and etc. In employing this approach to

analyze the impact of the factors onto the coke rate and performance, their linearity and independence are assumed, however, in practice, the influence of the factors onto the coke rate and performance is non-linear and their interdependencies should be considered as well. Also, any blast-furnace smelting parameter should not be considered separately, since the process is influenced by the interrelated parameters. It should be noted that each particular blast furnace is unique in its operation and the values of factors shown in the table should be specified for a specific blast furnace. This is due to the fact that the raw material and process conditions of the blast furnace shops at metallurgical plants vary significantly.

In general, the blast furnace process monitoring and control requires considering multiple parameters, and the artificial intellect methods are very promising here [17]. These methods are already being actively employed in such fields as medicine, sociology, marketing etc. In the blast furnace practice, this area has not been sufficiently developed yet, but the activity is already in progress [17–25].

### 1. The structure of a multilevel expert system

The work considers an automated system of the multilevel resource saving control of the blast furnace process (Fig. 1). This automated system consists of three control levels. The upper one, technical and economic control level of the blast furnace process solves the problems of determining the process parameters of blast furnaces in the blast furnace shop according to the criterion of cast iron or steel minimum prime cost. At the medium level of adaptive control, optimal operating modes of blast furnaces are developed with respect to blast furnace heating, structure of metal charge, natural gas and oxygen rate considering the current and planned parameters of coke, blasting, technical condition of the equipment which are intended for operation in an advisor mode for a foreman.

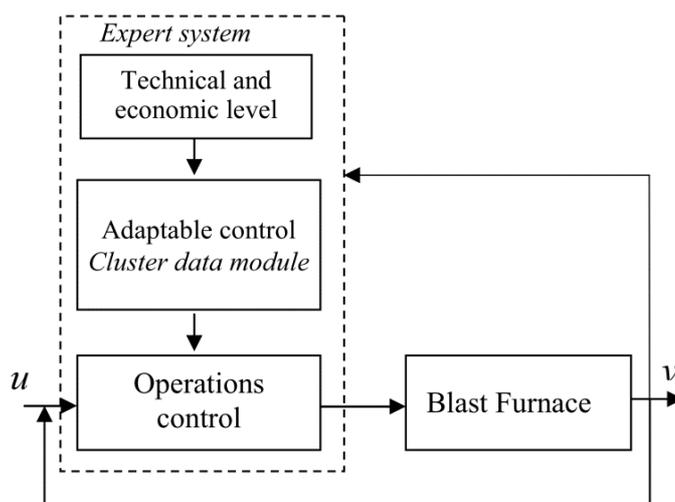


Fig. 1. Expert System Flow Chart

The criteria of the optimal adaptive control are the maximum cast iron production and the minimum coke rate.

Implementation of adaptive control is based on finding real effective characteristics of the blast furnace process for each blast furnace.

The adaptive control of the blast furnace mode ensures developing multidimensional solution regions on basic parameters characterising the blast furnace melting including quality characteristics of coke, metal charge, hot blasting for the subsequent use in solving the optimization tasks at the technical and economic level of control of sintering, coke and blast furnace production.

At the operational level of blast furnace process control, the problem of stabilizing the thermal condition of blast furnace production is solved.

A peculiar feature in developing the mathematical relations represented in the work is the use of the software tools for the in-depth analysis of the operational statistic data (the so-called Data Mining), cluster analysis based on the Kohonen neural network training [24] to detect the dependencies of effect caused by the control parameters onto the economic parameters of the blast furnace process, performance and coke consumption to improve the energy efficiency.

## 2. The method of adaptive control level

The existing control level of mode parameters of blast furnace is aimed at maintaining the parameter values within the admissible limits defined by process instructions and set process conditions. Such kind of control may be called admissible. In this kind of control makes mode parameters sporadically fluctuating within the admissible values. According to the studies, the fluctuation swing is frequently beyond the boundaries of the effective region of values of mode parameters. This results in the reduced furnace performance and increased coke rate. Therefore, stabilization of fluctuations of mode parameters within the effective region of their values with the use of current methods of model predictive control and intellectual technologies is a topical problem.

This problem is rather complex because the swing of mode parameter values is determined by multiple reasons, such as incompleteness of measured factors causing effect on the blast furnace process, low measurement precision, impossibility to measure the internal parameters of the blast furnace process, accidental fluctuations of the input parameters of charge, blast and etc. Accurately considering all this factors is extremely difficult at a modern level of the blast furnace process measurement and control technology. Therefore, the most expedient solution is determining current operating modes of blast furnace based on the cluster analysis in teaching the Kohonen neural network.

Let's consider building the mode diagrams in detail. Let's consider a set of unordered pairs of values of input parameters and output value obtained as a result of a set of observations over the BF  $\{(x_s, y_s)\}$  as the source diagram. The diagram is given in Fig. 2.

The diagram  $x_s, y_s$  shows the values of some input and output parameters used for illustrating building of the mode diagram;  $\{(x_s, y_s)\}$  – an ordered pair of the values of an input and output parameters.

These pair dependencies, while being built for the entire set of statistic observations of the dependence of the output parameter  $y$  over the input parameter  $x$  allows building a kinetic diagram of modes represented in Fig. 3.

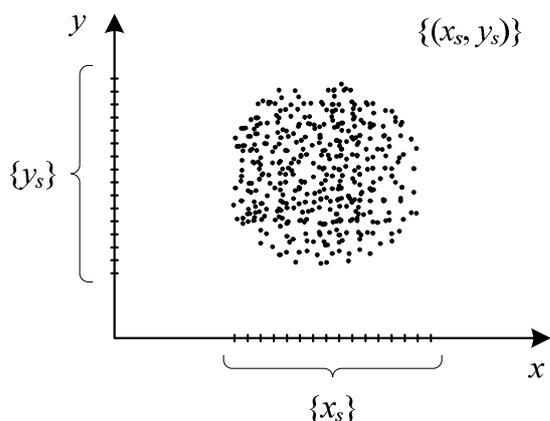


Fig. 2. The source diagram of blast furnace operating modes

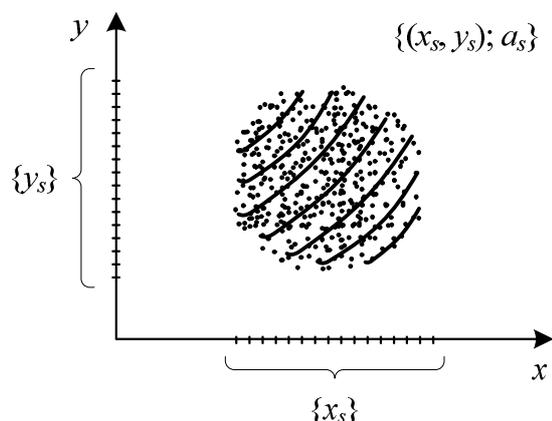


Fig. 3. Kinetic mode diagram

As a result, in a chaotic set of values of mode parameters (see Fig. 2) an order is introduced in a form of mode parameter variation lines. In fact, such a dependence will be stochastic, since it is impossible to consider all the BF input parameters. Therefore, in building such diagrams, the method of principal components shall be employed. In accordance with this method, the input parameter is determined first, which produces the maximum effect on the output parameter with building a diagram based on this method. Further, the next parameter in terms of the effect significance, shall be selected and the diagram building process proceeds iteratively until the significant input variables are no more left.

Based on the BF control practice, the principal input components are the volume of coke supply, ore burden, blast humidity, and, if justified, a number of other factors. A non-linear mode diagram is built for principal components. For other components, building non-linearized diagrams used to adjust the solution obtained with principal components, is sufficient.

Based on the diagrams built, a problem of selecting the input parameter values can be solved based on the condition of minimum deviation of the current value of the output parameter ( $y_k$ ) from the set value ( $y_l$ ):

$$(y_k - y_l)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

The solution (1) may be found, for example, by the gradient method:

$$x_{j,k+1} = x_{j,k} - \gamma(y_k - y_t) a_{j,k}. \tag{2}$$

Here it is recommended to employ the coordinate-wise optimization method, since the simultaneous change of multiple input parameters is not allowed by the technical instructions.

The considered statistical calculation diagram is simplified since it does not consider a number of factors which stipulate the use of a considerably larger quantity of outgoing parameters for more accurately evaluating the BF condition.

Therefore, the diagrams of type shown in Fig. 4 shall be built for all the blast furnace process condition indicators. The blast furnace mode parameters are accidental processes depending on a large number of factors. Such factors are up to 70 parameters in number. Under such conditions, usual deterministic control methods of furnace modes do not allow reaching optimal values of mode parameters as a result of a large statistical dispersion of their values.

Therefore, the work suggests identifying the effective regions of the blast furnace melt in a multi-dimensional space of influencing factors by the cluster analysis methods.

The clustering tasks are of high dimensionality – they comprise more than 70 parameters including the parameters of quality of coke, sinter, charge composition, chemical composition of slag, iron, hot blast characteristics etc.

The example of the mode parameter chart of the blast furnace process obtained with artificial neural networks is given in Fig. 4. Data clustering was performed using the distance U-matrix analysis of the neural network trained at the statistical data over a long period of time.

The examples of the obtained BF flow charts are given in Figs. 5–7.

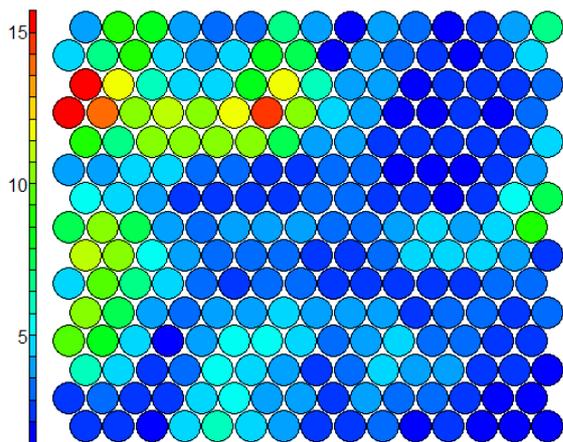


Fig. 4. U-matrix distance matrices

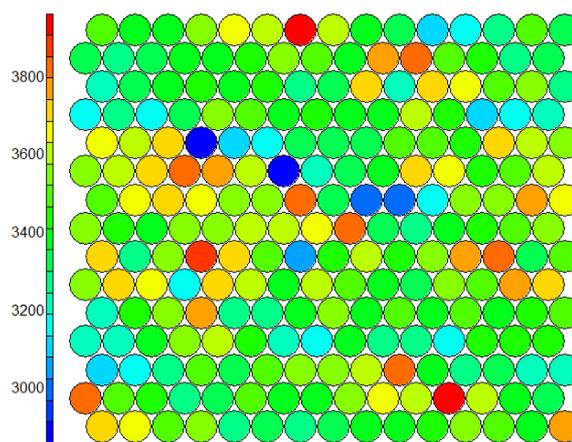


Fig. 5. The process flow chart by the BF performance mode

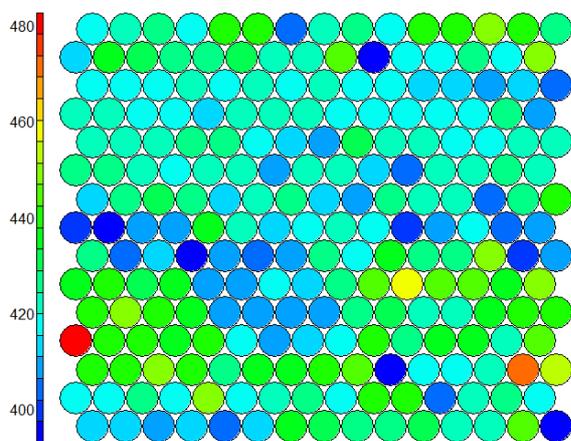


Fig. 6. The process flow chart for BF coke rate

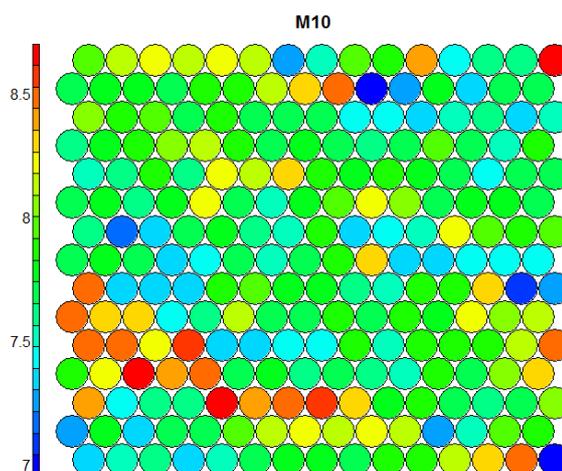


Fig. 7. The process flow chart for the BF coke quality (M10)

## Автоматизированные системы управления...

In the clusters found, the influence factors of process factors on the blast furnace performance and specific coke rate were determined. An example of the obtained influence factors of process parameter such as Si is given in Table 1. Each cluster corresponds to its individual blast furnace operating mode and an independent influence factor is determined in this mode.

Table 1

The impact factors of process parameters for the BF operating modes

Operating mode	Performance variation % with silicon increase in iron by 0.1%	Specific coke rate variation % with silicon increase in iron by 0.1%
1	-0.68	0.71
2	-0.58	0.60
3	-1.05	0.68
4	-1.09	0.56
5	-0.74	0.65
6	-0.71	0.50
7	-1.04	0.73
Mean	-0.84	0.63

Figs. 8 and 9 give an example of graphic representation of BF operating modes of depending on the silicon content in iron. Furthermore, the non-stationary BF operating mode is indicated by black dots.

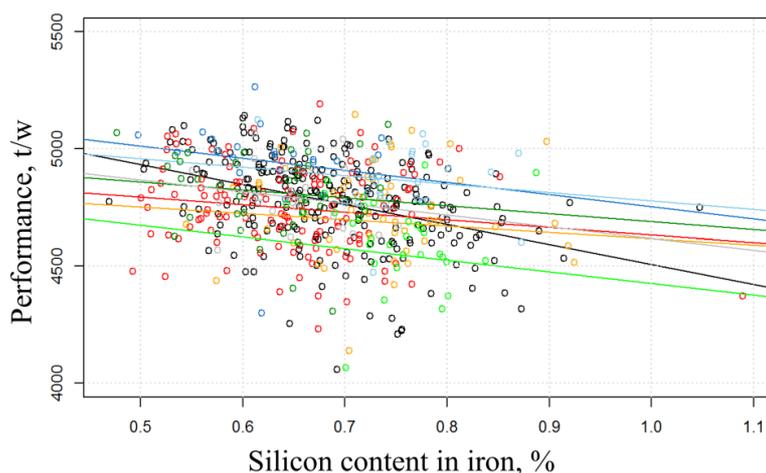


Fig. 8. The graphic representation of the BF operating mode influence on the performance depending on the silicon content in iron

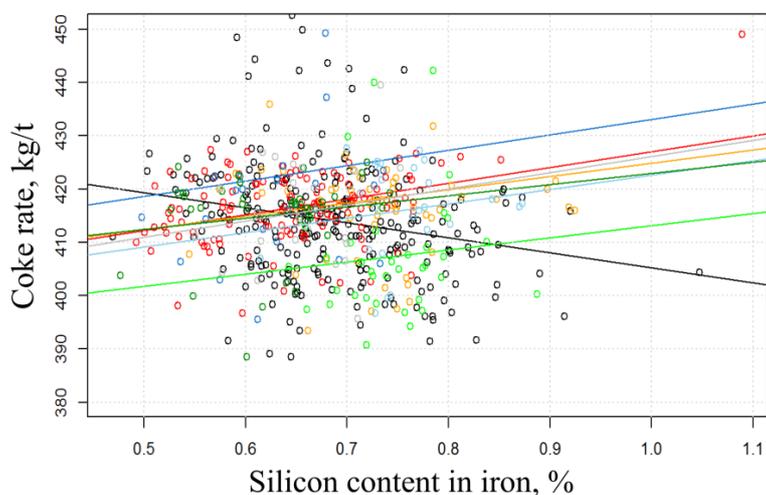


Fig. 9. The graphic representation of the BF operating mode influence on the specific coke rate depending on the silicon content in iron

### 3. The method for operating BF control

The basic characteristics of the operating control of thermal state of the BF process.

The basic connections of control parameters are given in Fig. 10. Here  $x_c$  – coke charge;  $\{x_i\}$  – supply of adjusting materials;  $u_{FR}^C, u_{FR}^F, y_{FR}^F$  – design value of specific fuel rate (FR), actual FR value and estimated FR value following the melting results, respectively;  $\{u_i^C\}$  – calculated values of specific charge of the  $i$ -th adjusting materials;  $u_v^{st}$  – indicator value of the process thermal state in the stack of blast furnace;  $u_v^h$  – indicator value of the process thermal state in the blast-furnace hearth;  $y_v^F$  – indicator value of the process thermal state at the furnace outlet.

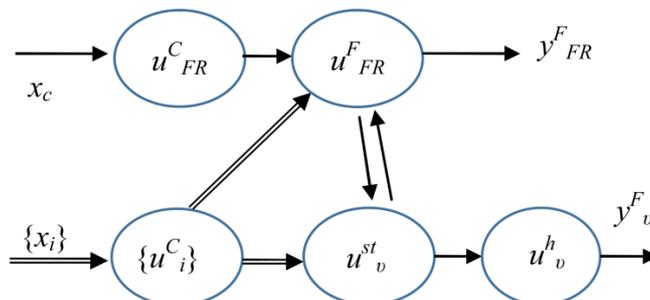


Fig. 10. The basic connections of control parameters

First of all, it should be noted that all the basic parameters given in (Fig. 10) are characterized by time and value of the action. The connections between parameters are characterized by transportation and inertial lag values. In addition, the main items in the operating control chart (Fig. 10): commands for supply, charge, iron tap, receipt of laboratory data occur at discrete time moments. These time moments are not well coordinated with each other, they have variable sequencing intervals. Such an asynchronous manner of actions considering non-stationary nature of lags results in a fact that the control system in general (furnace foreman – blast furnace process) are ill-defined coefficients of transfer between the setting actions and output parameters of the process. In extreme cases, coefficients of transfer may vary to the greatest extent up to the system stability loss and change of the response sign from negative to positive. For example, when a blast furnace foreman makes a decision following the results of current laboratory data which reflect the results of past effects as a result of lagging actions in the furnace. These effects are already implemented by the current moment of time and cannot be changed. All these may contradict to the current BF state, however the information on the current state has not been received yet or will be received with a delay.

Therefore it is no coincidence that one of the basic provisions of process instructions on maintaining the blast furnace modes is the requirement that blast furnace foreman should make sure after the adjusting action that the action is directed to the necessary direction. It is only after that when blast furnace foreman may perform the next adjusting action. This condition is the check of appropriateness of the action sign. But in the system in general the action is characterized not only by its sign of the coefficient of transfer but by its magnitude as well. The indefiniteness of the transfer coefficient value may result in low stability margin in the system and the occurrence of self-oscillations, which is observed in practice.

The solution in this situation is the model predictive control. The strategy of the model predictive control is implemented based on identification of the control object model based on current data and development of predictive control on its basis.

This strategy is based on consideration of the transportation and inertial lag of actions as well as non-linear effects in the control system. In this case, the connection of the inlet design FR  $\Delta u_{FR}(t_s)$  with the resulting value of output parameter  $\Delta y_{Si}(t_s)$  is described in by a dynamic operator in the continuous case:

$$\Delta h_{Si}(t_s) = \int_0^{\infty} \Delta u_{FR}(t_s - \tau_{il}^{\min} - \lambda) w(\lambda) d\lambda; \tag{3a}$$

$$\int_0^{\infty} w(\lambda) d\lambda = 1; \tag{3b}$$

$$\Delta y_{Si}(t_s) = F(\Delta h_{Si}(t_s)). \tag{3c}$$

Here a non-linear static part (3c) and a dynamic part (3a) with a unit transfer coefficient (3b) are distinguished in the explicit form, where  $w(t)$  – is the weight function,  $\tau_{il}^{\min}$  – the minimum value of transportation lag.

In the discrete option, the formulas take the form

$$\Delta h_{Si}(t_s) = \sum_k \Delta u_{FR}(t_s - \tau_{il}^{\min} - \lambda_k) w_k \Delta \lambda_k; \quad (4a)$$

$$\sum_k w_k \Delta \lambda_k = 1; \quad (4b)$$

$$\Delta y_{Si}(t_s) = F(\Delta h_{Si}(t_s)). \quad (4c)$$

In this case, the dynamic connection formula, for example, for the first order inertial process takes the form

$$\Delta h_{FR}(T_L, t_s) = \int_0^{T_{in}} \Delta u_{FR}(t_s - \lambda) \frac{1}{T_L} \exp\left(-\frac{\lambda}{T_L}\right) d\lambda. \quad (5)$$

Where  $T_L$  – time constant of lag;  $T_{in}$  – observation interval.

The formula of the forecast with the transportation lag value advance takes the form

$$\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{il}^{\min}) = a_{FR} \Delta h_{FR}(T_L; t_s). \quad (6)$$

The transfer coefficient for coke is determined based on the ratio

$$a_{FR} = \max_{\{\tau_{il}^{\min}, w_i\}} a_{FR}(\tau_{il}^{\min}, T_L) = \frac{(\Delta y_{Si}(t_s + \tau_{il}^{\min}), \Delta h_{FR}(T_L; t_s))_s}{(\Delta h_{FR}(T_L; t_s), \Delta h_{FR}(T_L; t_s))_s}. \quad (7)$$

Where  $\Delta h_{FR}$ ,  $\Delta y_{Si}$  – vectors of statistic data ( $\cdot, \cdot$ ) – scalar vector product.

In a more general case, a considered strategy is being implemented at all the inlet adjusting actions on the blast furnace process. The difference is that for many control actions having the gas nature, the action lag is low in its value as considered to the coke supply therefore lag can be neglected here which results in simplification of the identification problem solution.

## 4. Evaluating the parameters of forecast precision and stabilization of blast furnace parameters on its effectiveness

Stabilization of BF process parameter values (a smooth furnace operation according to the BF process terminology) directly improves the process efficiency with implementing the model predictive control. It is demonstrable on Fig. 11. Here  $\sigma_n$  – rated root mean square deviation of actual data;  $\sigma_{opt}$  – optimal nominal root mean square deviation of actual data,  $\sigma_T$  – target value.

Upon introducing the model predictive control, the root mean square deviation was reduced to  $\sigma_{opt}$ , which allowed bringing the process to the optimal mode.

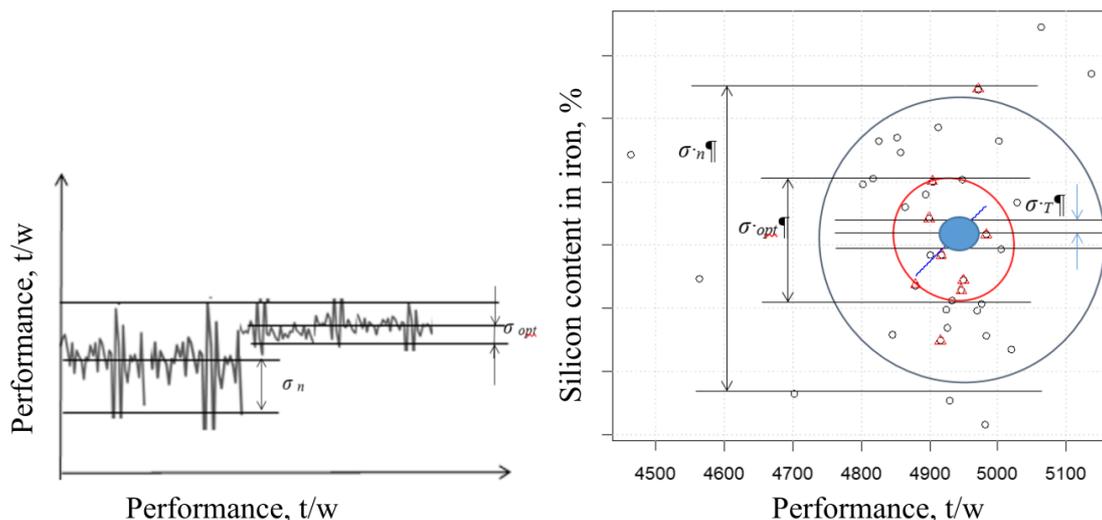


Fig. 11. The influence of stabilization of BF process mode parameters on its efficiency with the model predictive control

To illustrate this provision, Fig. 11 shows the ellipses of Si content scatter in iron based on the actual statistics of BF melts at a blast furnace. Here the effective mode is highlighted in red, which is distinguished subject to the blast furnace performance increase by 10% and corresponds to the conditions of implementation of the expert system of model predictive control of blast furnace modes.

In the central part the mode with the allowable deviation of Si content in iron of  $\pm 2\%$  according to the terms of reference. It is obvious that root mean square deviation of the Si content in iron  $\sigma_T$  set by the assumed terms of reference stipulates stringent and unrealisable frameworks of blast furnace process with maintaining its basic technology.

### Conclusions

The work suggests the method of multilevel resource-saving control of blast furnace process based on implementation of the automated system for operating, adaptation and technical and economic control of the blast-furnace process.

Statistical data show that based on introduction of model predictive control 10% stabilization of mode parameters can be reached. In this case the growth of profit of the blast furnace process exceeds the costs of introduction of the model predicative control by many times.

### References

1. Tovarovsky I.G. [Regulatory assessment of the blast furnace parameters influence on the coke consumption and productivity]. *Steel*, 2014, vol. 5, pp. 4–11. (in Russ.)
2. Tovarovskiy I.G. *Domennaya plavka: monogr.* [Blast furnace melting. Monograph]. 2nd ed. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2009. 768 p.
3. Tovarovskiy I.G. *Sovershenstvovaniye i optimizatsiya parametrov domennogo protsessa* [Improvement and optimization of the blast furnace process parameters]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 196 p.
4. Spirin N.A., Lavrov V.V., Parshakov S.I., Denisenko S.G. *Optimizatsiya i identifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v metallurgii* [Optimization and identification of processes in metallurgy]. Ekaterinburg, UGTU-UI, 2006. 307 p.
5. Suchkov A.V., Lisienko V.G., Suchkov V.A. *Sovershenstvovaniye upravleniya mnogomernym tekhnologicheskim ob'yektom na primere domennoy pechi* [Improvement of multidimensional technological control on blast furnace: case study]. Ekaterinburg, UrFU, 2012. 126 p.
6. Wen X., Cao H., Hon B., Chen E., Li H. Energy Value Mapping: A Novel Lean Method to Integrate Energy Efficiency into Production Management. *Energy*. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119353
7. Kule J. Blast Furnace Model Development and Application in the British Steel Corporation. *Proc. Conf., Univ. Surrey. Sept. 11th – 13th. 1979*. London, 1980, pp. 403–415.
8. Sasaki M., Ono K., Suzuki A. Formation and Melt-down of Softening-Melting Zone in Blast Furnace. *Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap.*, 1977, vol. 17, no. 7, pp. 391–400.
9. Burgess J.M., Jenkins D.R., Hockings K.L. Analysis of Blast Furnace Pressure Tappings, using a Cohesive-zone Gas-distribution Model. *Ironmaking and Steelmaking*, 1984, vol. 11, no. 5, pp. 253–261.
10. Kumar S.A., Suresh N. Production and Operations Management. *New Age International (P) Ltd.*, 2009. 284 p.
11. Yagi J. Mathematical Models of the Blast Furnace Process. *Tetsu-to-Hagane*, 1983, no. 10, pp. 1242–1249.
12. Sugiyama T., Yagi J., Omori Y. A Theoretical Analysis on Gas Flow and Heat Transfer in Packed Beds with Fused and Unfused Layers. *Tetsu-to-Hagane. Journal of the Iron and Steel Inst. Jap.*, 1978, vol. 64, no. 12, pp. 1676–1684.
13. Yagi J., Takeda K., Omori Y. et al. Two-dimensional Simulation on the Gas Flow and Heat Transfer in the Blast Furnace. *Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap.*, 1983, vol. 22, no. 11, pp. 884–892.
14. Gobetto M. Operations Management in Automotive Industries: From Industrial Strategies to Production Resources Management, Through the Industrialization Process. *Springer Science + Business Media Dordrecht*, 2014, XXII. 245 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7593
15. Ultsch A., Siemon H.P. Kohonen's self-organizing feature maps for exploratory data analysis. *Proceedings of International Neural Networks Conference (INNC)*. Paris, 1990. pp. 305–308.

16. Jefferson C.P. Feedforward Control of Blast Furnace Stoves. *Automatics*, 1979, vol. 15, iss. 2, pp. 149–159.
17. Avneet P.M. Artificial Intelligence and Its Application in Different Areas. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (JEIT)*, 2015, vol. 4, iss. 10, pp. 79–84.
18. Kumar D. *Optimization of blast furnace parameters using artificial neural network*. MTEch thesis, 2015. 36 p.
19. David S.F., David F.F., Machado M.L.P. Artificial Neural Network Model for Predict of Silicon Content in Hot Metal Blast Furnace. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 869, pp. 572–577.
20. Tunçkaya Y., Köklükaya E. Comparative performance evaluation of blast furnace flame temperature prediction using artificial intelligence and statistical methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 24, 2016, pp. 1163–1175.
21. Fernández J.M.M., Cabal V.A., Montequin V.R., Balsera J.V. Online estimation of electric arc furnace tap temperature by using fuzzy neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21, 2008, pp. 1001–1012.
22. Angstenberger J. Blast furnace analysis with neural networks. *Artificial Neural Networks ICANN 96*. Springer Berlin Heidelberg, 1996, pp. 203–208.
23. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Identification Method of Blast-Furnace Process Parameters. *International Conference for young scientists “High Technology: Research and Applications 2015 (HTRA 2015)”*, *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137
24. Kohonen T. *Self-Organizing Maps (Third Extended Edition)*. New York, 2001. 501 p.
25. Kazarinov L.S. *Sistemy. Upravleniye i poznaniye: analiticheskiye ocherki* [Systems. Control and Cognition: analytical essays]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2017. 496 p.

*Received 13 December 2020*

---

УДК 681.536.6

DOI: 10.14529/ctcr210112

## МНОГОУРОВНЕВОЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ДОМЕННЫМ ПРОЦЕССОМ

**Т.А. Барбасова**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Рассмотрены вопросы построения многоуровневого ресурсосберегающего управления доменным процессом. Ресурсосберегающее управление целесообразно выполнять на основе внедрения автоматизированной системы для оперативного, адаптивного и технико-экономического управления доменным процессом.

На уровне адаптивного управления целесообразно осуществлять формирование оптимальных режимов работы доменных печей по нагреву печей, структуре металлошихты, расходу природного газа, кислорода с учетом текущих и планируемых параметров качества кокса, железорудного сырья, дутья. Определение режимов работы доменной печи предлагается осуществлять на основе нейронных сетей Кохонена.

На уровне оперативного управления в работе предложен метод модельно-упреждающего управления, повышающий показатели эффективности использования ресурсов. Метод основан на декомпозиции общей задачи определения динамических характеристик сложных технологических процессов на частные задачи динамической синхронизации и идентификации передаточных свойств. Для решения сложных задач идентификации предложено использовать искусственные нейронные сети.

При оценке эффективности введения модельно-упреждающего управления необходимо исходить из существующей реальной статистики разброса режимных параметров доменного процесса. Дело в том, что введение модельно-упреждающего управления не предполагает ко-

ренной смены технологии доменной плавки. Как и во всех системах управления, здесь доменный процесс рассматривается как заданный объект управления со всеми своими характеристиками. Изменение уставок процесса, состава сырья не вносит кардинального изменения в разброс характеристик процесса. Однако при этом возникает переходный процесс, необходимый системе управления для идентификации изменившихся условий. Переходный процесс присущ всем системам управления, и доменный процесс не является исключением. В результате переходного процесса система управления настраивается на оптимальный режим.

*Ключевые слова:* доменный процесс, оптимизация доменного процесса, самоорганизующиеся карты, нейронные сети Кохонена, кластерный анализ, U-матрица, модельно упреждающее управление.

### Литература

1. Товаровский, И.Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной печи на расход кокса и производительность / И.Г. Товаровский // *Сталь*. – 2014. – № 5. – С. 4–11.
2. Товаровский, И.Г. Доменная плавка: моногр. / И.Г. Товаровский. – 2-е изд. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.
3. Товаровский, И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса / И.Г. Товаровский. – М.: Металлургия, 1987. – 192 с.
4. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, С.И. Паришаков, С.Г. Денисенко; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 307 с.
5. Сучков, А.В. Совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, В.А. Сучков – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 126 с.
6. *Energy Value Mapping: A Novel Lean Method to Integrate Energy Efficiency into Production Management* / X. Wen, H. Cao, B. Hon et al. // *Energy*. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119353
7. Kule, J. Blast Furnace Model Development and Application in the British Steel Corporation / J. Kule // *Proc. Conf., Univ. Surrey. Sept. 11th – 13th*. 1979. – London, 1980. – P. 403–415.
8. Sasaki, M. Formation and Melt-down of Softening-Melting Zone in Blast Furnace / M. Sasaki, K. Ono, A. Suzuki // *Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap.* – 1977. – Vol.17, no. 7. – P. 391–400.
9. Burgess, J.M. Analysis of Blast Furnace Pressure Tappings, using a Cohesive-zone Gas-distribution Model / J.M. Burgess, D.R. Jenkins, K.L. Hockings // *Ironmaking and Steelmaking*. – 1984. – Vol. 11, no. 5. – P. 253–261.
10. Kumar, S.A. *Production and Operations Management* / S.A. Kumar, N. Suresh. – New Age International (P) Ltd., 2009. – 284 p.
11. Yagi, J. Mathematical Models of the Blast Furnace Process / J. Yagi // *Tetsu-to-Hagane*. – 1983. – No. 10. – P. 1242–1249.
12. Sugiyama, T. A Theoretical Analysis on Gas Flow and Heat Transfer in Packed Beds with Fused and Unfused Layers / T. Sugiyama, J. Yagi, Y. Omori // *Tetsu-to-Hagane. Journ. of the Iron and Steel Inst. Jap.* – 1978. – Vol. 64, no. 12. – P. 1676–1684.
13. Two-dimensional Simulation on the Gas Flow and Heat Transfer in the Blast Furnace / J. Yagi, K. Takeda, Y. Omori et al. // *Trans. of the Iron and Steel Inst. Jap.* – 1983. – Vol. 22, no. 11. – P. 884–892.
14. Gobetto, M. *Operations management in automotive industries: from industrial strategies to production resources management, through the industrialization process and supply chain to pursue value creation*. – Springer Science + Business Media Dordrecht, 2014 – XXII. – 245 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7593
15. Ultsch, A. Kohonen's self-organizing feature maps for exploratory data analysis / A. Ultsch, H.P. Siemon // *Proceedings of International Neural Networks Conference (INNC)*. – Paris, 1990. – P. 305–308.
16. Jefferson, C.P. Feedforward Control of Blast Furnace Stoves / C.P. Jefferson // *Automatica*. – 1979. – Vol. 15, iss. 2. – P. 149–159.
17. Avneet, P.M. Artificial Intelligence and Its Application in Different Areas / P.M. Avneet // *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*. – 2015. – Vol. 4, iss. 10. – P. 79–84.

18. Kumar, D. *Optimization of blast furnace parameters using artificial neural network*. MTech thesis / D. Kumar. – 2015. – 36 p.

19. David, S.F. *Artificial Neural Network Model for Predict of Silicon Content in Hot Metal Blast Furnace* / S.F. David, F.F. David, M.L.P. Machado // *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 869. – P. 572–577.

20. Tunçkaya, Y. *Comparative performance evaluation of blast furnace flame temperature prediction using artificial intelligence and statistical methods* / Y. Tunçkaya, E. Köklükaya // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 24. – 2016. – P. 1163–1175.

21. *Online estimation of electric arc furnace tap temperature by using fuzzy neural networks* / J.M.M. Fernández, V.Á. Cabal, V.R. Montequin, J.V. Balsera // *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21. – 2008. – P. 1001–1012.

22. Angstenberger, J. *Blast furnace analysis with neural networks* / J. Angstenberger // *Artificial Neural Networks ICANN 96*. – Springer Berlin Heidelberg, 1996. – P. 203–208.

23. Kazarinov, L.S. *Identification Method of Blast-Furnace Process Parameters* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // *International Conference for young scientists “High Technology: Research and Applications 2015 (HTRA 2015)”*, *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 685. – P. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137

24. Kohonen, T. *Self-Organizing Maps (Third Extended Edition)* / T. Kohonen. – New York, 2001. – 501 p.

25. Казаринов, Л.С. *Системы. Управление и познание: аналитические очерки* / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2017. – 496 с.

**Барбасова Татьяна Александровна**, канд. техн. наук, доцент, Высшая школа электроники и компьютерных наук, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; barbasovata@susu.ru.

*Поступила в редакцию 13 декабря 2020 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Barbasova, T.A. A Multilevel Resource-Saving Blast Furnace Process Control / T.A. Barbasova // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 136–146. DOI: 10.14529/ctcr210112

### FOR CITATION

Barbasova T.A. A Multilevel Resource-Saving Blast Furnace Process Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 136–146. DOI: 10.14529/ctcr210112

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ФЛОТАЦИОННЫМ ПРОЦЕССОМ ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ

*М.Н. Фелькер, К.Д. Бахтерева*

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

В статье рассмотрены создание алгоритма и синтез двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью вместо действующей одноконтурной. **Цель исследования.** Стабилизация плотности и стабилизация питания флотационной машины с помощью создания двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью с целью улучшения качества конечного продукта. **Материалы и методы.** Поскольку в системе нет чистого запаздывания, то настройка регулятора производится по методу параметрической оптимизации, а именно: по критериям модульного оптимума (МО) или симметричного оптимума (СО). Для настройки контура применяется также критерий МО/СО. Все системы автоматического управления реализованы в программном пакете MATLAB Simulink. После синтеза локальных и комбинированных систем автоматического регулирования (САР) рассчитываются основные показатели качества, чтобы узнать, какая из САР является наиболее приемлемой. Качество управления определяется по такими показателям, как время переходного процесса, перерегулирование и ошибка системы. Первые два показателя показывают динамику процесса, а последний показатель показывает точность системы. **Заключение.** Готовая двухконтурная система автоматического управления, разработанная в программном пакете MATLAB Simulink, согласно анализу полученных показателей регулирования процесса обеспечивает стабилизацию плотности и уровня в агитационном чане для флотации.

*Ключевые слова:* флотация, реагентный режим, пульпа, агитационный чан, стабилизация плотности, стабилизация уровня.

### Введение

Получение качественного продукта зависит от многих факторов технологического процесса, но особое внимание нужно уделить флотации хлористого калия, поскольку качество продукта зависит от правильно подобранного реагентного режима, что в свою очередь обуславливает поддержание заданных параметров. Флотация – это процесс обогащения мельчайших минералов (0–0,8 мм), при котором полезные минералы отделяются от примесей и других неиспользуемых минералов, при этом используются их физико-химические свойства, а именно: различие в смачиваемости водой.

На рис. 1 представлен флотационный аппарат пневматического колонного типа, использующийся на предприятии ООО «ЕвроХим – УКК» в качестве перемешивающей флотации хлористого калия.

Подготовленная пульпа направляется по трубопроводу в аэратор, который установлен в верхней части машины над камерой флотации, непосредственно на вертикальной питающей трубе [1].

Далее пульпа поступает через центральный трубопровод на распределительное кольцо, там поток делится в нижней части камеры. Через форсунки пульпа выходит в вертикальном направлении вверх. Поскольку машина является самовсасывающей (принцип Вентури), т. е. пульпа поступает в аэратор под давлением благодаря шламовому насосу, то нет необходимости устанавливать дополнительный компрессор для наддува воздуха [2].

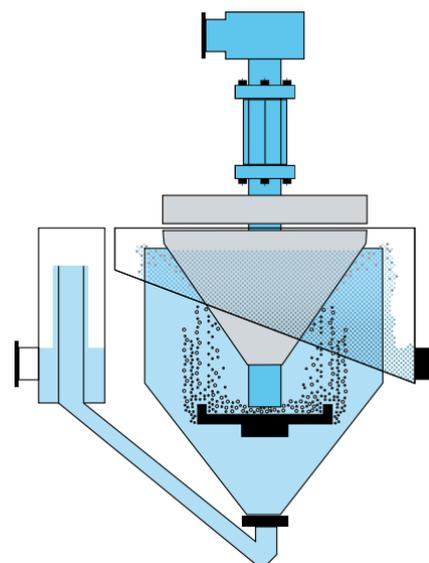
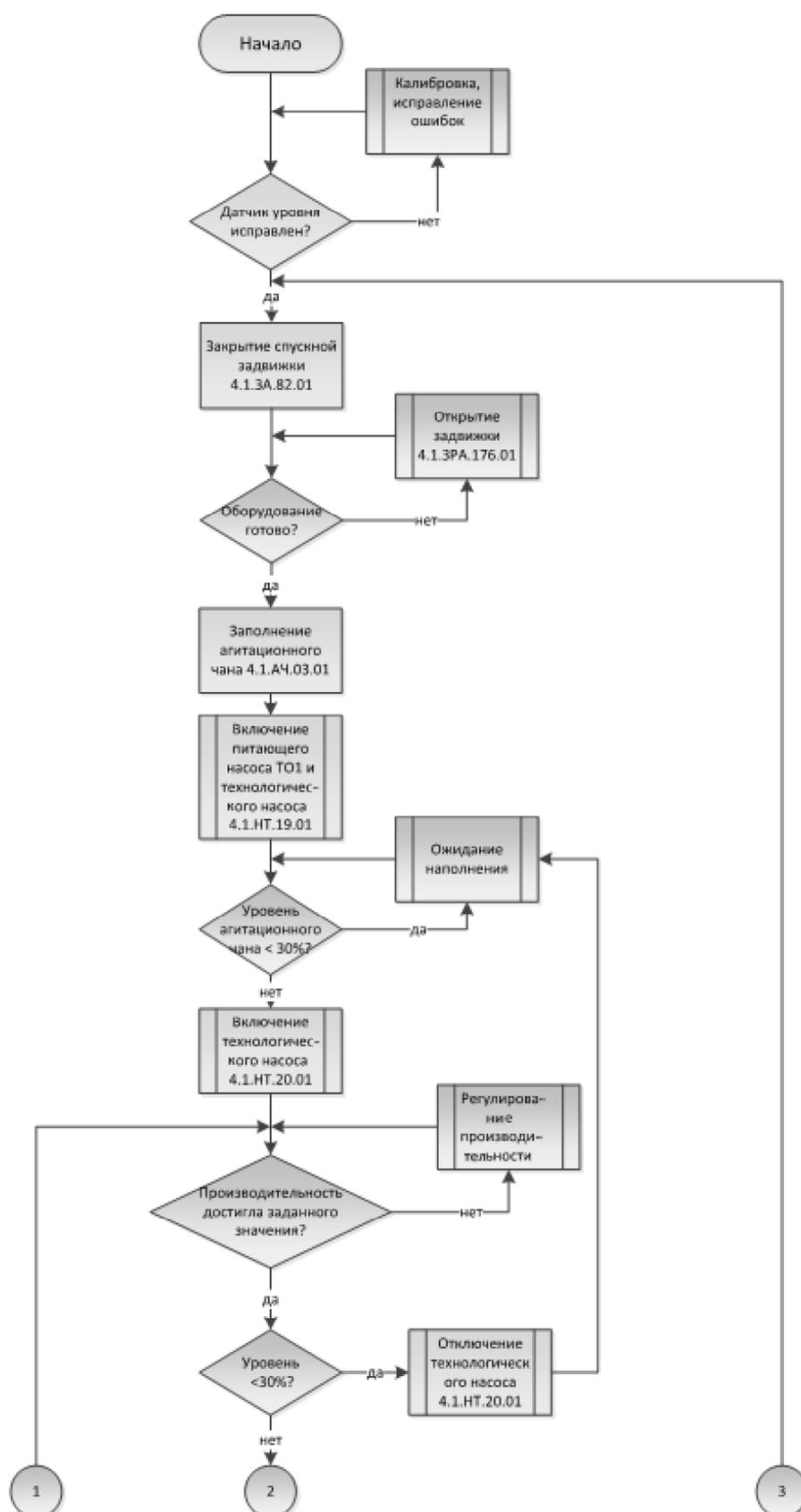


Рис. 1. Флотационный аппарат пневматического колонного типа  
Fig. 1. Pneumatic column flotation apparatus

## Автоматизированные системы управления...

Существующая система автоматизации и управления флотационным процессом хлористого калия предприятия ООО «ЕвроХим – УМК» имеет только регулирование уровня в агитационном чане.

На рис. 2 представлен алгоритм управления уровнем в агитационном чане.



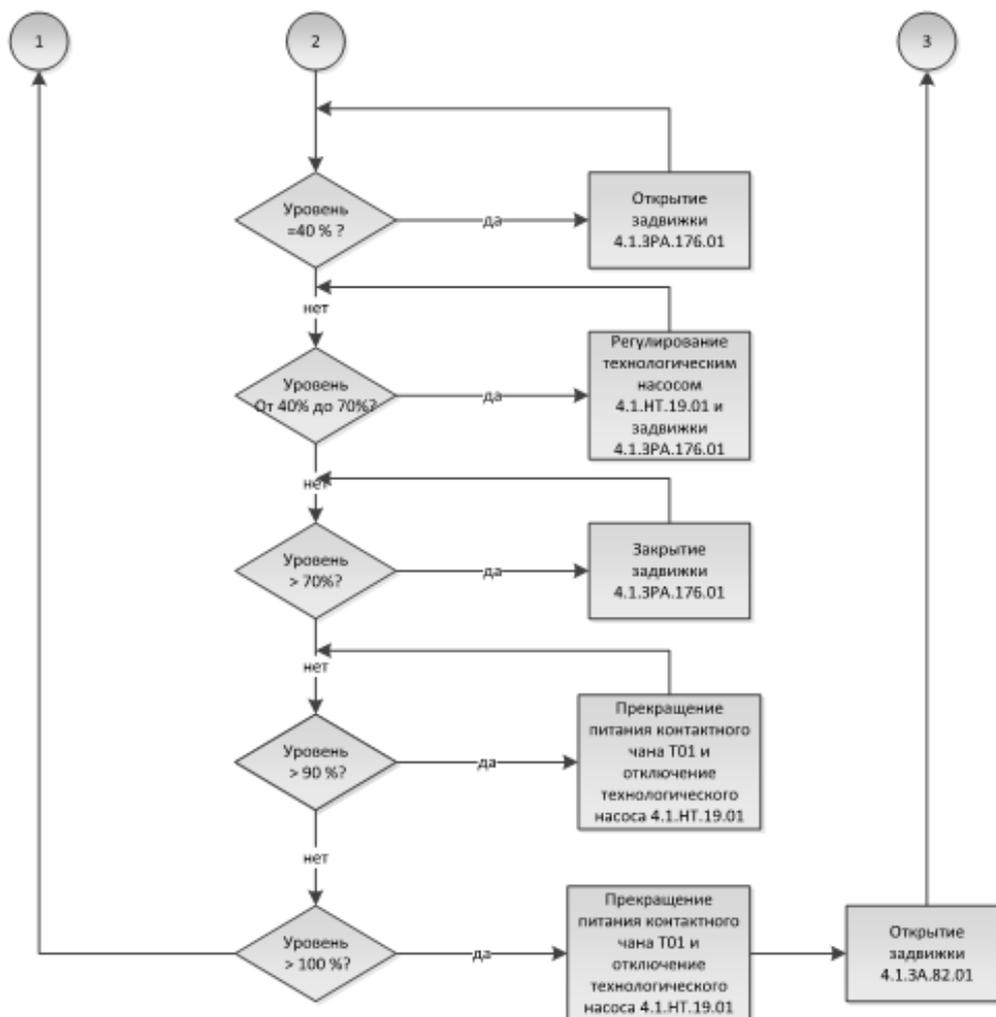


Рис. 2. Алгоритм управления уровнем  
Fig. 2. Level control algorithm

### 1. Разработка алгоритма двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью

Создание двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотности позволяет достичь две цели: стабилизации плотности и стабилизации питания флотационной машины.

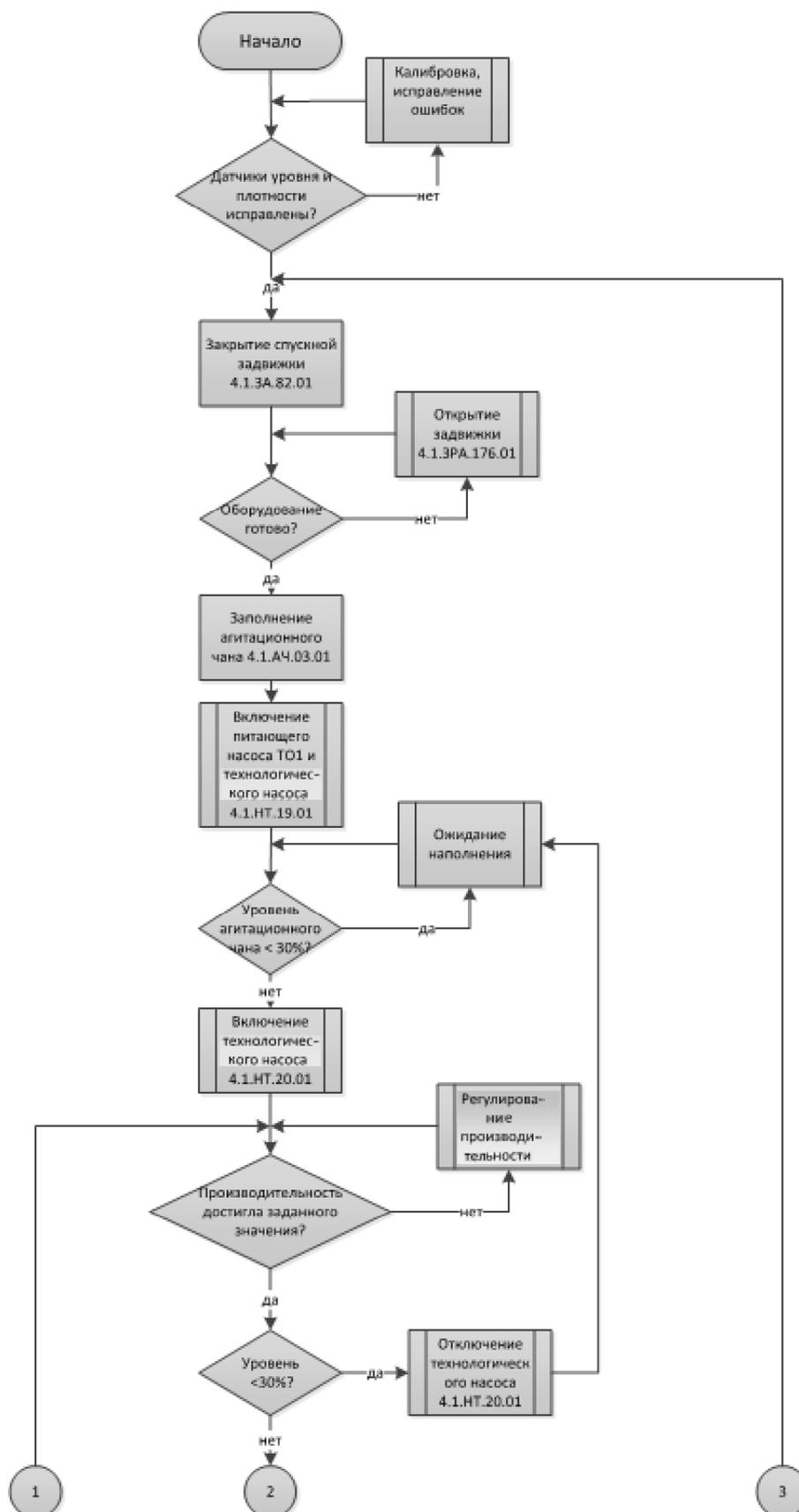
Создание алгоритма управления двухконтурной системой управления позволяет определить порядок выработки управляющих команд и последовательность действий. На рис. 3 изображен алгоритм управления уровнем и плотностью.

### 2. Синтез двухконтурной системы автоматического управления уровнем и плотностью

Синтез системы управления флотационным процессом хлористого калия подразумевает нахождение структуры этой системы, а также ее параметров для обеспечения заданных показателей качества управления при известных входных воздействиях.

С учетом алгоритмов управления были выделены 2 локальных контура регулирования уровня и плотности в агитационном чане.

Объект управления – агитационный чан – является емкостью, которая накапливает и сохраняет вещество, такими свойствами обладает идеальное интегрирующее звено.



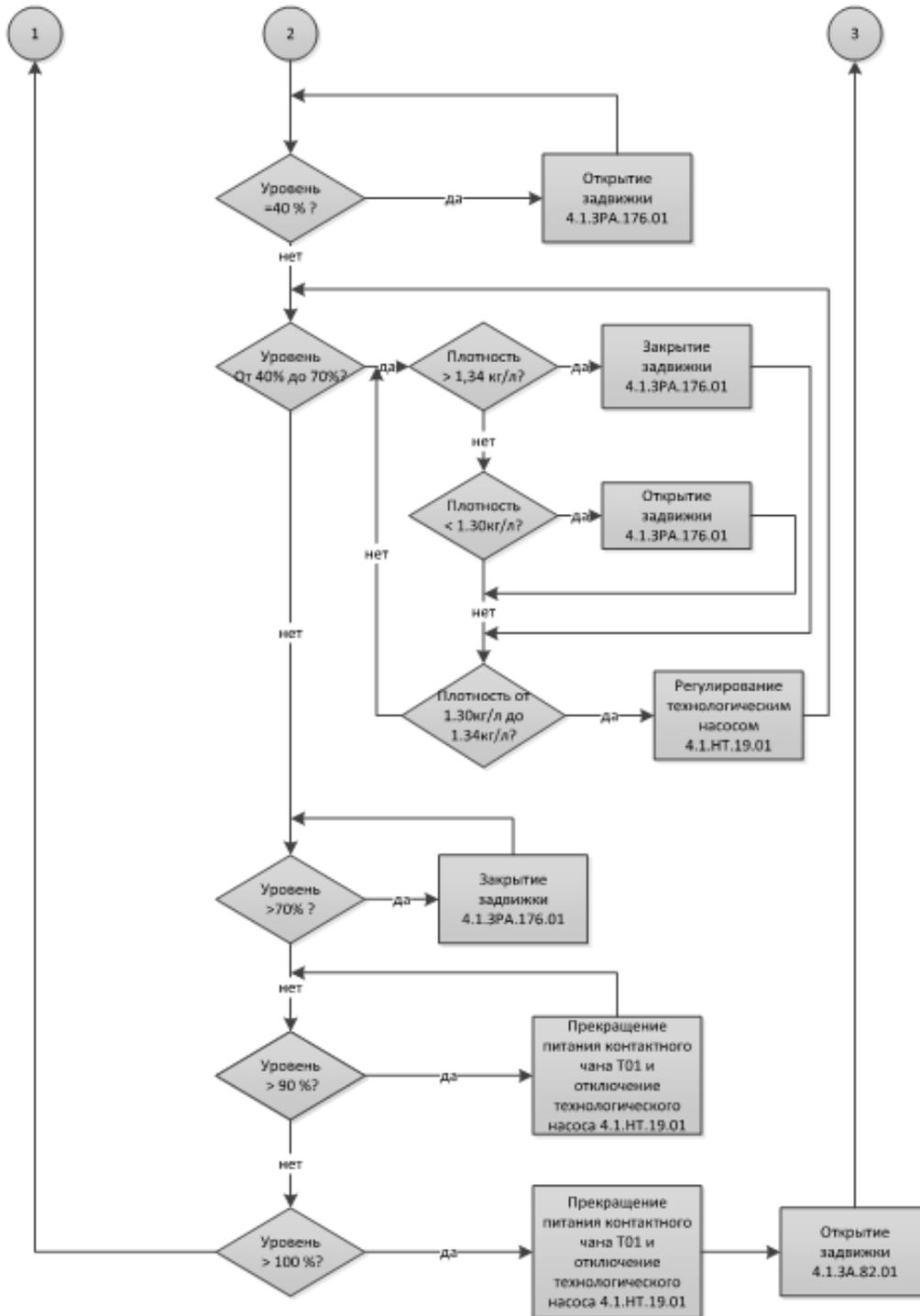


Рис. 3. Алгоритм управления уровнем и плотностью  
 Fig. 3. Algorithm for level and density control

Передаточная функция агитационного чана имеет вид:

$$W_{\text{АЧ}} = \frac{K_{\text{АЧ}}}{p} \tag{1}$$

Уровень в чане замеряется радарным уровнемером, где измерение уровня основано на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня. Передаточная функция датчика уровня выглядит следующим образом:

$$W_{\text{ДУ}} = K_{\text{ДУ}} \tag{2}$$

## Автоматизированные системы управления...

Исполнительный механизм включает в себя преобразователь частоты, асинхронный двигатель и насос, передаточные функции которых представляют в виде апериодического звена первого порядка [3]:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K}{Tp+1}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлена структурная схема регулирования уровня в агитационном чане.



Рис. 4. Структурная схема регулирования уровня в агитационном чане  
Fig. 4. Block diagram of level regulation in the agitation vat

Далее проводится расчёт всех объектов, которые включает в себя структурная схема (рис. 5).

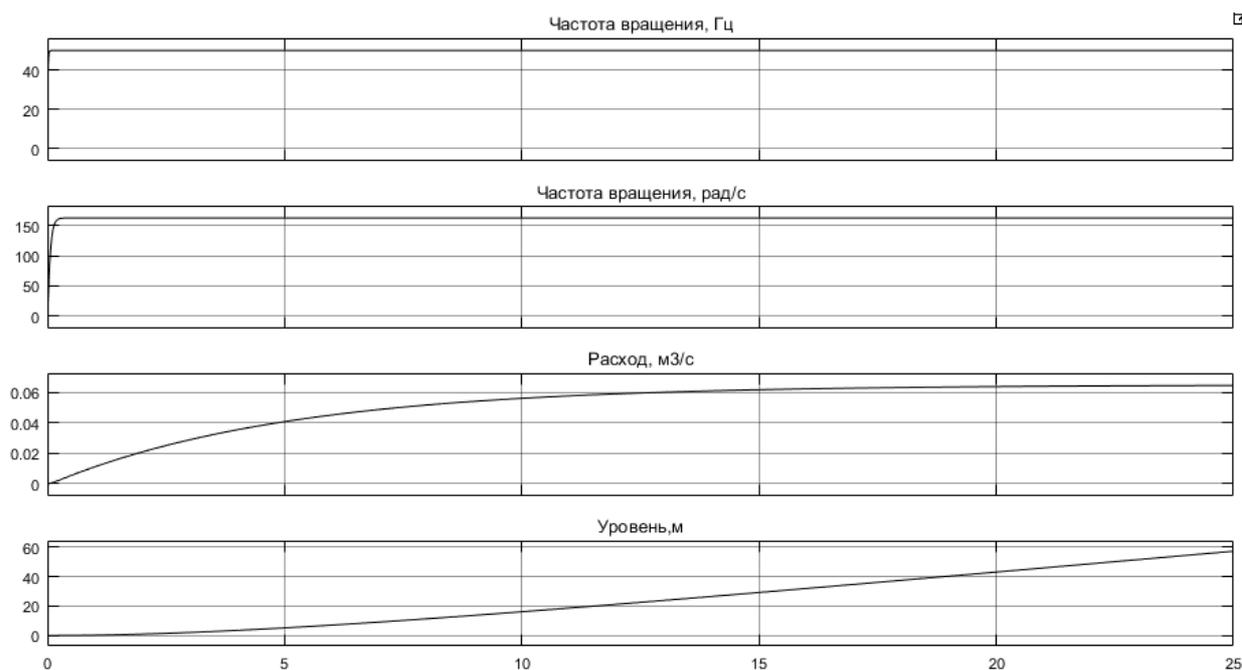


Рис. 5. График переходного процесса заполнения чана  
Fig. 5. Schedule of the transient process of filling the vat

Поскольку в системе нет чистого запаздывания, то настройку регулятора произведем по методу параметрической оптимизации, а именно по критериям модульного (МО) или симметричного оптимума (СО).

Структурная схема системы управления уровнем с ПИД-регулятором приведена на рис. 6. График переходного процесса приведен на рис. 7.

Контур регулирования плотности в агитационном чане обеспечивает стабилизацию плотности в заданном интервале. Стабилизация плотности осуществляется регулированием расхода более густой пульпы через запорно-регулирующую арматуру (далее клапан), которая поступает из самой флотационной камеры в агитационный чан.

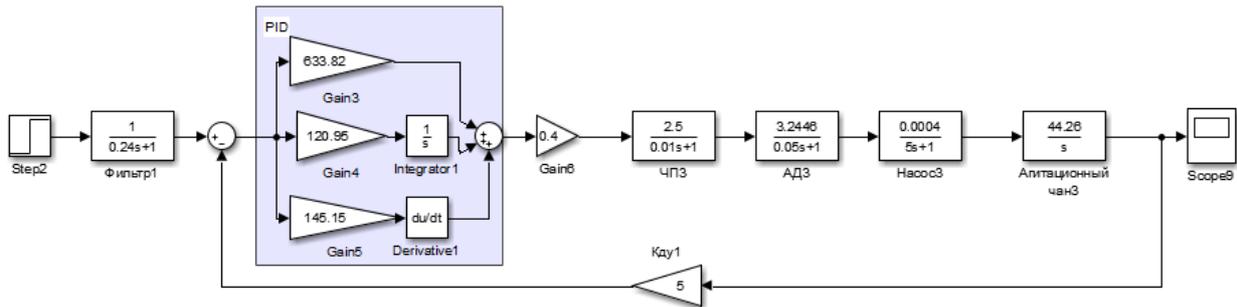


Рис. 6. Система управления с ПИД-регулятором  
Fig. 6. Control system with PID controller

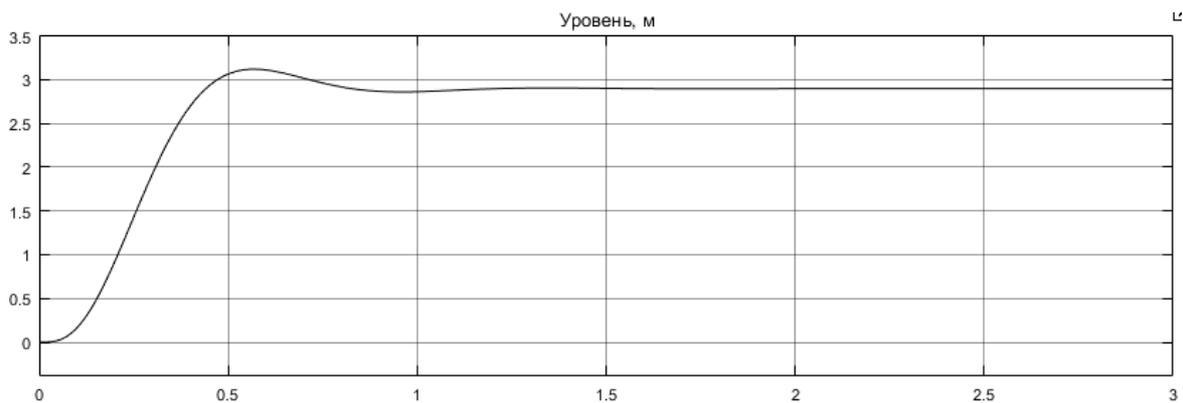


Рис. 7. График переходного процесса в системе управления с ПИД-регулятором  
Fig. 7. Transient graph in a control system with a PID controller

В данном контуре регулирования объект управления – агитационный чан – является емкостью, которая осуществляет смешивание густой пульпы с маточным раствором, и для достижения однородной пульпы нужно время, поэтому передаточная функция объекта управления примет вид инерционного (апериодического) звена первого порядка. Передаточная функция агитационного чана имеет вид:

$$W_{\text{АЧ}} = \frac{K_{\text{АЧ1}}}{T_{\text{АЧ}} \cdot p + 1} \tag{4}$$

Плотность в чане замеряется проточным плотномером, где измерение плотности происходит напрямую. Передаточная функция датчика примет вид:

$$W_{\text{ДП}} = K_{\text{ДП}} \tag{5}$$

Исполнительным механизмом является клапан, передаточная функция которого выглядит как формула (3).

На рис. 8 представлена структурная схема регулирования плотности в агитационном чане.

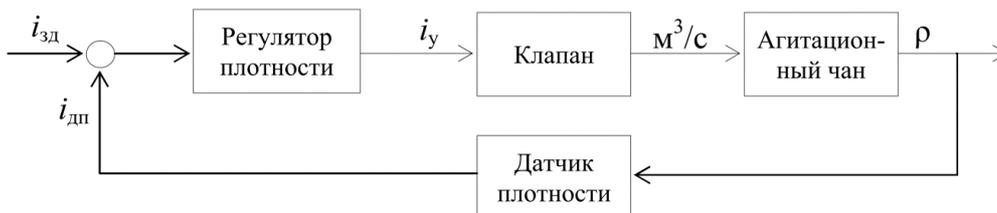
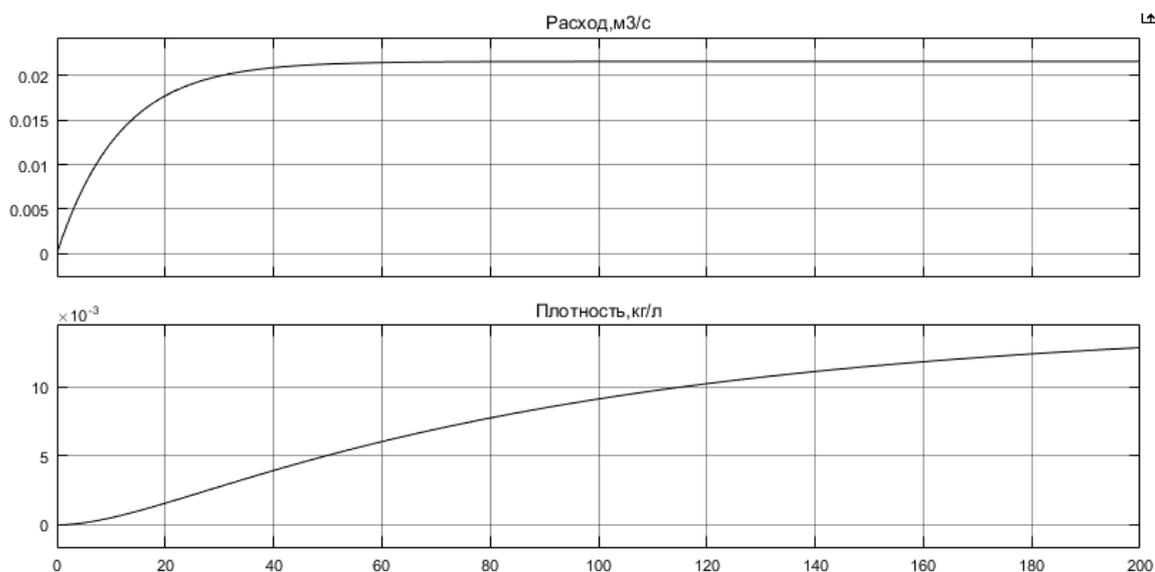


Рис. 8. Структурная схема регулирования плотности в агитационном чане  
Fig. 8. Block diagram of density regulation in the agitation vat

Далее проводится расчёт всех объектов, которые включает в себя структурная схема.

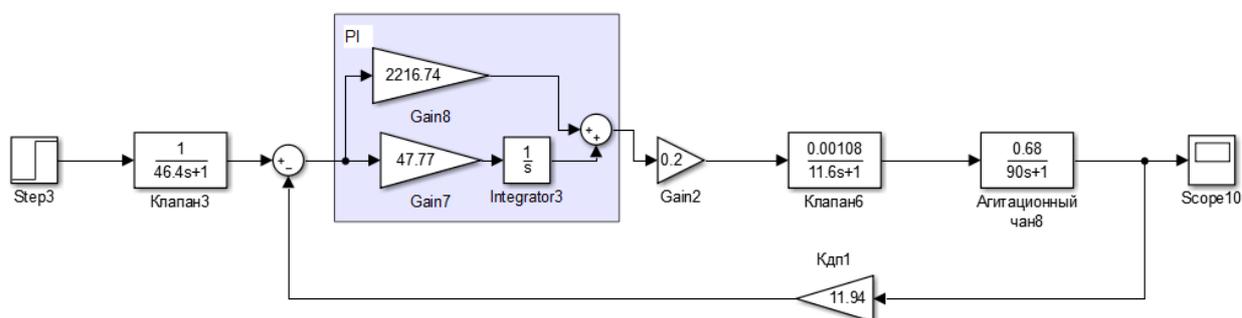
После моделирования были получены графики переходных процессов, которые представлены на рис. 9.



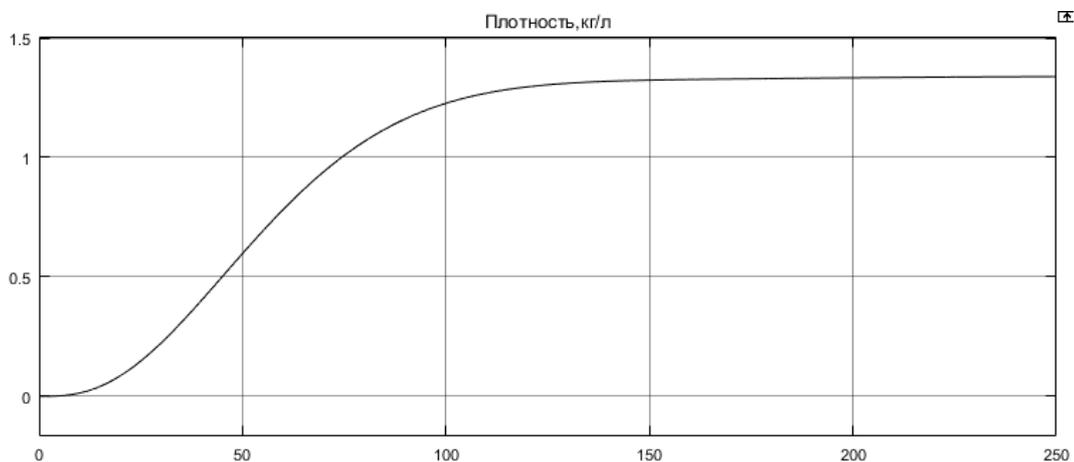
**Рис. 9. График переходного процесса заполнения чана**  
**Fig. 9. Schedule of the transient process of filling the vat**

Для настройки контура применяется также критерий МО/СО [4]. Берется разомкнутая система с учетом датчика плотности, а также вводится дополнительный коэффициент, равный 0,2, который будет переводить сигнал процентного задания открывания клапана в аналоговый сигнал [5–8].

Структурная схема системы управления уровнем с ПИ-регулятором приведена на рис. 10. График переходного процесса приведен на рис. 11.



**Рис. 10. Система управления с ПИ-регулятором**  
**Fig. 10. Control system with PI controller**



**Рис. 11. График переходного процесса в системе управления с ПИ-регулятором**  
**Fig. 11. Graph of the transient process in a control system with a PI controller**

Объединим контур регулирования уровня пульпы в агитационном чане с контуром регулирования плотности пульпы, причем локальный контур регулирования плотности будет возмущающим воздействием для локального контура регулирования уровня [9–12].

Структурная схема и графики переходных процессов представлены на рис. 12 и 13 соответственно.

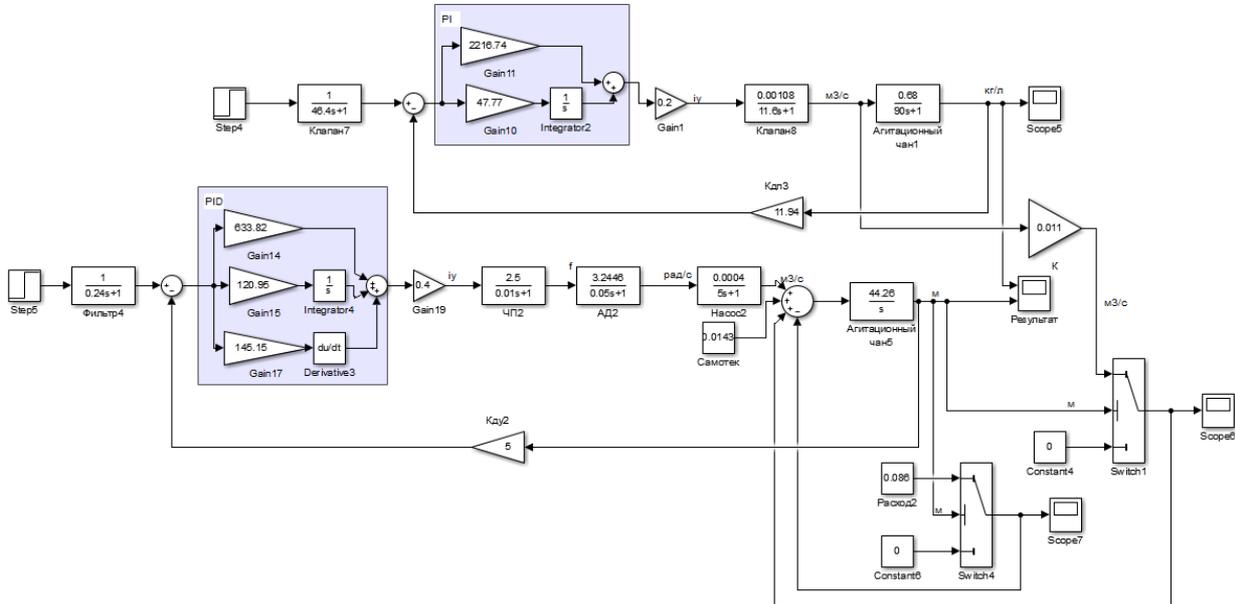


Рис. 12. Система управления  
Fig. 12. Control system

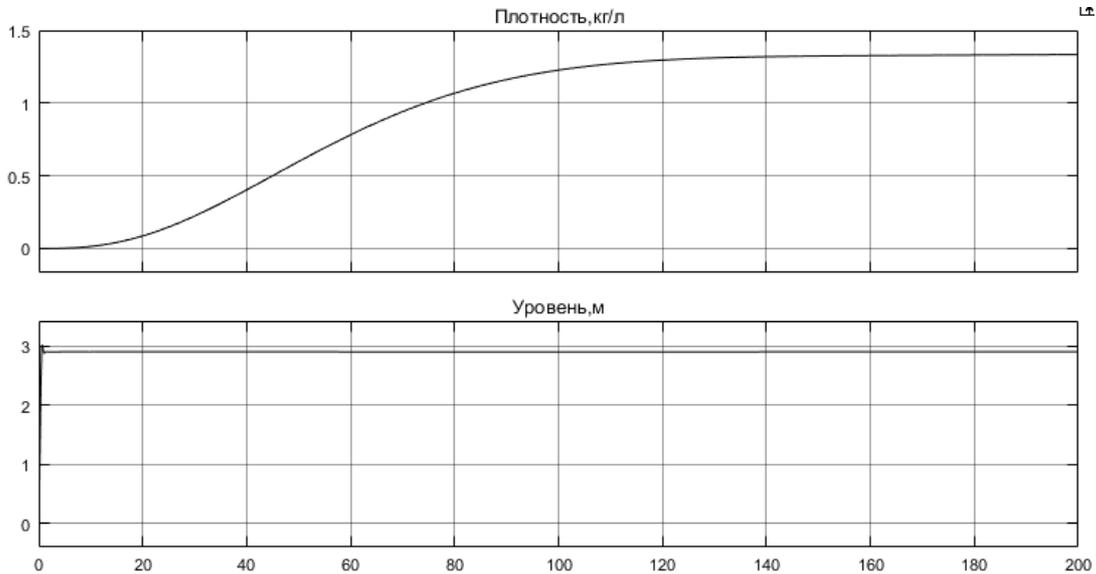


Рис. 13. Переходные процессы  
Fig. 13. Transient processes

### 3. Анализ полученных систем автоматического регулирования

После синтеза локальных и комбинированных САУ необходимо рассчитать основные показатели качества для удостоверения, что САУ является приемлемой. Рассмотрим отдельно показатели качества локальных САУ и комбинированную САУ.

Качество системы определяется такими показателями, как время переходного процесса, перерегулирование и ошибка системы. Первые два показателя показывают динамику процесса, а последний показатель показывает точность системы.

## Автоматизированные системы управления...

Время переходного процесса показывает общее время процесса, за которое выходная величина  $h(t)$  входит в пятипроцентную зону и не выходит из нее. Этот показатель характеризует быстроедействие системы [13–15].

Далее представлена сводная таблица показателей качества.

Основные показатели качества САР  
The main indicators of the quality of ACS

САР \ ПК	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$e(\infty)$
САР уровня	0,674	7,5	0
САР плотности	110,3	0	0
Комбинированная САР	Уровень/Плотность 0,493/110,3	Уровень/Плотность 4,3/0	0

### Заключение

Готовая двухконтурная система автоматического управления, разработанная в программном пакете MATLAB Simulink, согласно анализу полученных показателей процесса обеспечивает стабилизацию плотности и уровня в агитационном чане для флотации.

### Литература

1. Печковский, В.В. *Технология калийных удобрений: учеб. пособие для вузов* / В.В. Печковский, Х.М. Александрович, Г.Ф. Пинаев. – Минск: Вышэйш. шк, 1968.
2. Кувшинский, М.Н. *Процессы и аппараты химической промышленности* / М.Н. Кувшинский. – М., 1998.
3. Топчиев, Ю.И. *Атлас для проектирования систем автоматического регулирования* / Ю.И. Топчиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 752 с.
4. Андриевская, Н.В. *Теория автоматического управления* / Н.В. Андриевская. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2006. – 92 с.
5. *An evaluation of machine learning and artificial intelligence models for predicting the flotation behavior of fine high-ash coal* / D. Ali, M.B. Hayat, L. Alagha, O.K. Molatlhegi // *Advanced Powder Technology*. – 2018. – Vol. 29. – P. 3493–3506. DOI: 10.1016/j.apr.2018.09.032
6. *Carvalho, M.T. Control of a flotation column using fuzzy logic inference* / M.T. Carvalho, F. Durão // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2002. – Vol. 125. – P. 121–133. DOI: 10.1016/S0165-0114(01)00048-3
7. *Chettibi, M. Physicochemical modeling of galena flotation system* / M. Chettibi, A. Boutrid, A.A. Abramov // *Journal of Mining Science*. – 2014. – Vol. 50, no. 6. – P. 1069–1078. DOI: 10.1134/S106273911406009X
8. *Farrokhpay, S. The significance of froth stability in mineral flotation – a review* / S. Farrokhpay // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2011. – Vol. 166. – P. 1–7. DOI: 10.1016/j.cis.2011.03.001
9. *Fayed, H. Numerical simulations of two-phase flow in a self-aerated flotation machine and kinetics modeling* / H. Fayed, S. Ragab // *Minerals*. – 2015. – Vol. 5 (2). – P. 164–188. DOI: 10.3390/min5020164
10. *Jovanović, I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review* // *Mineral Engineering*. – 2015. – Vol. 70. – P. 228–249. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.022
11. *Flotation froth monitoring using multiresolutional multivariate image analysis* / J.J. Liu, J.F. MacGregor, C. Duchesne, G. Bartolacci // *Mineral Engineering*. – 2005. – Vol. 18. – P. 65–76. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.010
12. *Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастической модели процесса флотации калийной руды* / А.В. Затонский, С.А. Варламова, А.В. Мальшева, А.А. Мясников // *Интернет-журнал Науковедение*. – 2017. – Т. 9, № 2. – С. 87.
13. *Мальшева, А.В. Исследование перспектив перехода на автоматическое управление процессом флотации калийной руды* / А.В. Затонский, А.В. Мальшева // *Автоматизация. Современные технологии*. – 2019. – № 3. – С. 119–127.

14. Малышева, А.В. Модернизация алгоритмов блочного распознавания параметров пенного слоя при флотации калийных руд / А.В. Затонский, А.В. Малышева // Обогащение руд. – 2018. – № 2 (374). – С. 35–41.

15. Малышева, А.В. Определение параметров переходных процессов в промышленной флотомашине калийной руды по данным видеоряда / А.В. Затонский, А.В. Малышева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 1. – С. 26–39.

**Фелькер Мария Николаевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; [erymarya@yandex.ru](mailto:erymarya@yandex.ru).

**Бахтерева Карина Дмитриевна**, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; [ganzert\\_karina96@mail.ru](mailto:ganzert_karina96@mail.ru).

Поступила в редакцию 28 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr210113

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE FLOTATION PROCESS OF POTASSIUM CHLORIDE

*M.N. Fel'ker*, [erymarya@yandex.ru](mailto:erymarya@yandex.ru),  
*K.D. Bakhtereva*, [ganzert\\_karina96@mail.ru](mailto:ganzert_karina96@mail.ru)

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

The article discusses the creation of an algorithm and the synthesis of a two-loop automatic control system for level and density, instead of the current single-loop one. **Aim.** Density stabilization and stabilization of the flotation machine power supply by creating a two-circuit automatic level and density control system in order to improve the quality of the final product. **Materials and methods.** Since there is no net lag in the system, the controller is tuned using the parametric optimization method, namely: according to the criteria of modular (MO) or symmetric optimum (CO). The MO/CO criterion is also used to adjust the contour. All automatic control systems are obtained in the MATLAB Simulink software package. Control quality is measured by metrics such as transient time, overshoot, and system error. The first two indicators show the dynamics of the process, and the last indicator shows the accuracy of the system. **Conclusion.** The finished two-loop automatic control system, developed in the software package MATLAB Simulink, according to the analysis of the obtained process parameters, provides stabilization of the density and level in the agitation tank for flotation.

*Keywords:* flotation, reagent mode, pulp, agitation vat, density stabilization, level stabilization.

### References

1. Pechkovskiy V.V. *Tekhnologiya kaliynykh udobreniy* [Potash fertilizers technology]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1968. 264 p.
2. Kuvshinskiy M.N. *Protsessy i apparaty khimicheskoy promyshlennosti* [Processes and devices of the chemical industry]. Moscow, 1998.
3. Topcheyev Yu.I. *Atlas dlya proyektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Atlas for the design of automatic control systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 752p.
4. Andrievskaya N.V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. Perm, Perm St. Techn. Univ. Publ., 2006. 92 p.

5. Ali D. An evaluation of machine learning and artificial intelligence models for predicting the flotation behavior of fine high-ash coal. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29, pp. 3493–3506. DOI: 10.1016/j.apt.2018.09.032
6. Carvalho M.T. Control of a flotation column using fuzzy logic inference. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, vol. 125, pp. 121–133. DOI: 10.1016/S0165-0114(01)00048-3
7. Chettibi M. Physicochemical modeling of galena flotation. *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 1069–1078. DOI: 10.1134/S106273911406009X
8. Farrokhpay S. The significance of froth stability in mineral flotation – a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 166, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.cis.2011.03.001
9. Fayed H. Numerical simulations of two-phase flow in a self-aerated flotation machine and kinetics modeling. *Minerals*, 2015, vol. 5 (2), pp.164–188. DOI: 10.3390/min5020164
10. Jovanović I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review. *Mineral Engineering*, 2015, vol. 70, pp. 228–249. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.022
11. Liu J.J. Flotation froth monitoring using multiresolutional multivariate image analysis. *Mineral Engineering*, 2005, vol. 18, pp. 65–76. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.010
12. Malysheva A.V. [Using videographic information to clarify the dynamic stochastic model of the potash ore flotation process]. *Internet Journal of Science*, 2017, vol. 9, no. 2, p. 87. (in Russ.)
13. Malysheva A.V. [Investigation of the prospects for the transition to automatic control of the potash ore flotation]. *Automation. Modern Technologies*, 2019, no. 3, pp. 119–127. (in Russ.)
14. Malysheva A.V. [Modernization of algorithms for glare recognition of foam layer parameters during flotation of potash ores]. *Processing of Ores*, 2018, no. 2 (374), pp. 35–41. (in Russ.)
15. Malysheva A.V. [Determination of the parameters of transient processes in an industrial potash ore flotation machine according to video data]. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Informatics*, 2019, no. 1, pp. 26–39. (in Russ.)

**Received 28 December 2020**

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Фелькер, М.Н. Разработка системы автоматического управления флотационным процессом хлористого калия / М.Н. Фелькер, К.Д. Бахтерева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 147–158. DOI: 10.14529/ctcr210113

### FOR CITATION

Fel'ker M.N., Bakhtereva K.D. Development of an Automatic Control System for the Flotation Process of Potassium Chloride. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 147–158. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210113

## АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

**Р.А. Клестов, А.В. Клюев, В.Ю. Столбов**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
г. Пермь, Россия*

Исследуется разделение данных для обучения нейронной сети на обучающие и тестовые в различных пропорциях друг к другу. Ставится вопрос о том, насколько качество распределения данных и их правильность аннотирования могут повлиять на конечный результат построения модели нейронной сети. В работе исследуется алгоритмическая устойчивость обучения глубокой нейронной сети в задачах распознавания микроструктуры материалов. Исследование устойчивости процесса обучения позволяет оценить работоспособность нейросетевой модели на неполных данных, искаженных на величину до 10 %. **Цель исследования.** Исследование устойчивости процесса обучения нейронной сети при классификации микроструктур функциональных материалов. **Материалы и методы.** Искусственная нейронная сеть является основным инструментом, на базе которого производятся исследования. Используются разные подтипы глубоких сверточных сетей, такие как VGG и ResNet. Обучение нейросетей ведется с помощью усовершенствованного метода обратного распространения ошибки. В качестве исследуемой модели используется замороженное состояние нейронной сети после определенного количества эпох обучения. Произведено случайное распределение количества исключаемых из исследования данных для каждого класса в пяти различных вариантах. **Результаты.** Исследован процесс обучения нейронных сетей. Проведены результаты вычислительных экспериментов по обучению с постепенным уменьшением количества исходных данных. Исследованы искажения результатов вычисления при изменении данных с шагом в 2 процента. Выявлен процент отклонения, равный 10, при котором обученная нейросетевая модель теряет устойчивость. Приведены промежуточные результаты вычисления до исследования устойчивости модели обучения. **Заключение.** Полученные результаты означают, что при установленном количественном или качественном отклонении в обучающем или тестовом множествах результатам, которые получаются с помощью обучения сети, вряд ли можно доверять. Хотя результаты данного исследования применимы для частного случая, т. е. задачи распознавания микроструктуры с помощью ResNet-152, авторы предлагают более простую методику исследования устойчивости нейросетей глубокого обучения на основе анализа тестового, а не обучающего множества.

*Ключевые слова:* глубокие нейросети, распознавание и классификация изображений, алгоритмическая устойчивость, тестовое множество, окрестность устойчивого решения.

### Введение

Известна проблема подбора обучающего и тестирующего множеств в задачах машинного обучения, к которым также относятся задачи глубокого обучения с целью предсказания физико-механических свойств функциональных материалов [1–3]. Многие исследователи в области прикладных расчетов используют правило разделения всего доступного множества на обучающее и тестирующее в соотношении 80/20 либо 70/30. Как правило, аргументация такого разделения не приводится. Что касается рекомендаций по объему обучающего множества, то они и вовсе отсутствуют, кроме утверждений, что мощность множества должна быть больше количества параметров нейронной сети в 3–10 раз. Для некоторых сетей существуют теоретически обоснованные оценки. Например, в классической работе [4] приводится примерная оценка количества обучающих данных  $L$  для многослойных нейросетей прямого распространения:

$$L = W/\varepsilon,$$

где  $W$  – количество синоптических связей (весов);  $\varepsilon$  – ошибка обучения. Например, при ошибке в 0,1 получается правило 10X. В работе [5] для многослойных сетей прямого распространения с одним скрытым слоем приводится оценка величины  $L$  в виде

$$2(n + m + p) < L < 10(n + m + p),$$

где  $n, m, p$  – количество нейронов во входном, в скрытом и в выходном слоях соответственно. Эта оценка является следствием теоремы существования нейросетей Колмогорова – Арнольда – Хехт – Нильсена [6].

Сегодня глубокие искусственные нейронные сети сверточного типа применяются во многих областях. С помощью миллионов предварительно классифицированных снимков, собранных в массивных базах данных аннотированных изображений, таких как ImageNet или COCO, и метода обратного распространения ошибки удалось достичь действительно впечатляющих результатов [7–9], прежде всего в задачах классификации изображений. Таким образом, начиная с 2012 г. сверточные сети можно считать традиционным методом компьютерного зрения.

Наиболее точной, если не считать малоизученную SENet (Squeeze-and-Excitation Networks), и апробированной сетью является сеть ResNet (Residual Network). Она была предложена в 2015 г. и тогда же победила в ILSVRC. Авторы Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren и Jian Sun заметили, что при увеличении глубины сети ошибка на обучающем и валидационном множестве накапливается [5].

Кроме того, существует проблема оценки качества обучающего множества. Нет четкого ответа на вопрос: насколько ошибочно аннотированные изображения могут повлиять на результат обучения? Например, достаточно часто работу классифицирующей нейронной сети сравнивают с работой человека. Является ли такая оценка справедливой? Ведь обучающее множество содержит аннотированные данные, которые готовились людьми и которые, в свою очередь, содержат те самые ошибки. Насколько эти ошибки могут исказить результат?

Известно, что фундаментальная теория равномерной сходимости В.Н. Вапника – А.Я. Червоненкиса [10] трактует фатальные ошибки алгоритма обучения как нарушение алгоритмической устойчивости. Под устойчивыми обучающими алгоритмами понимаются такие, которые формируют только те гипотезы, результат применения которых изменяется незначительно при малом изменении обучающей выборки [11, 12]. В рамках данной теории найдены семейства таких алгоритмов, например, регрессия, метод опорных векторов и т. д.

Обучение глубоких нейронных сетей вряд ли можно проанализировать в рамках теории равномерной сходимости, но численное исследование на устойчивость конкретных сетей может быть вполне доступно. Например, в работе [13] проведено исследование влияния размеров обучающего и тестирующего множеств на точность и обобщающую способность трехслойной нейросети MLP в задаче бинарной классификации. В работе [14] исследуется точность и разброс сети GoogLeNet в задаче классификации частей тела по снимкам компьютерной томографии. Размер обучающего множества подбирается на основании анализа точности результатов обучения. К недостаткам данной работы можно отнести то, что зависимость точности обучения от объема обучающей выборки рассчитывалась на основании 6 численных экспериментов (по каждому из классов), а само тестирующее множество получалось в результате процедуры разделения обучающего множества в пропорции 75/25. Однако если отсутствует устойчивость обучения, то данным результатам вряд ли можно доверять. Кроме того, количество данных для представительности класса можно уменьшить, если использовать предварительно обученные модели [15, 16].

### 1. Исследование устойчивости

Процесс исследования устойчивости заключался в поиске такой окрестности стабильного решения, при котором происходит нарушение равномерного характера сходимости к среднему. Под стабильным решением понималась обученная глубокая сеть Resnet-152. Сеть обучалась для решения задачи классификации изображений микроструктур по твердости металлического сплава на основе железа. В качестве обучающего множества выступали аннотированные снимки микроструктуры сплавов, примеры которых приведены на рис. 1. При этом микроструктура, приведенная на рис. 1 слева, соответствует сплаву с микротвердостью 1900 МПа, а справа – 7000 МПа. Все исходные изображения микроструктур были разбиты на 14 классов по твердости материала.

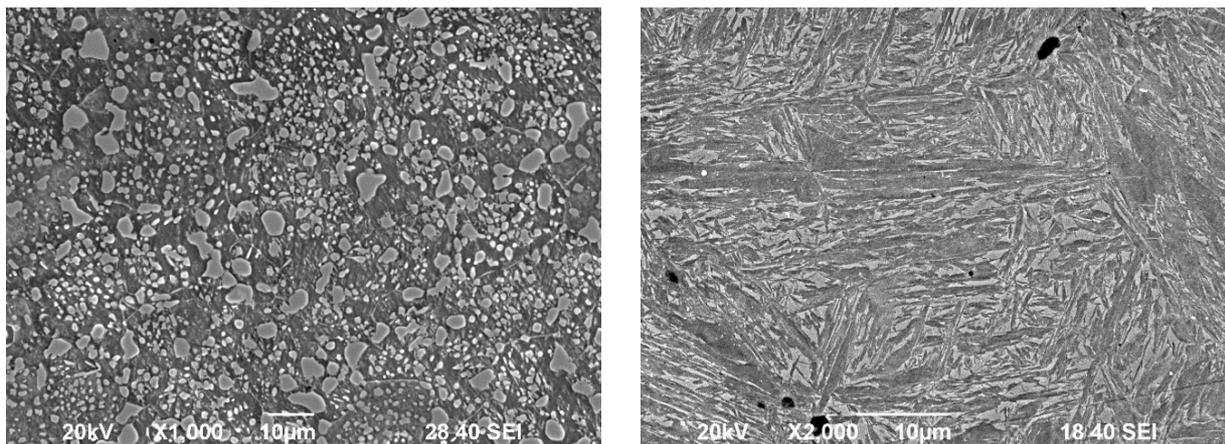


Рис. 1. Примеры снимков микрошлифа материала, включенные в обучающее множество  
 Fig. 1. Examples of microsection images of a material, included in the training set

В процессе обучения сети на 200-й эпохе была достигнута точность 83,9 % по оценке Top-3, после чего веса сети были заморожены. Оценка точности производилась на валидационном множестве, состоящем из 1097 элементов, не предъявленных сети при ее обучении. Процесс сходимости по точности, рассчитанной на обучающем множестве, изображен на рис. 2.

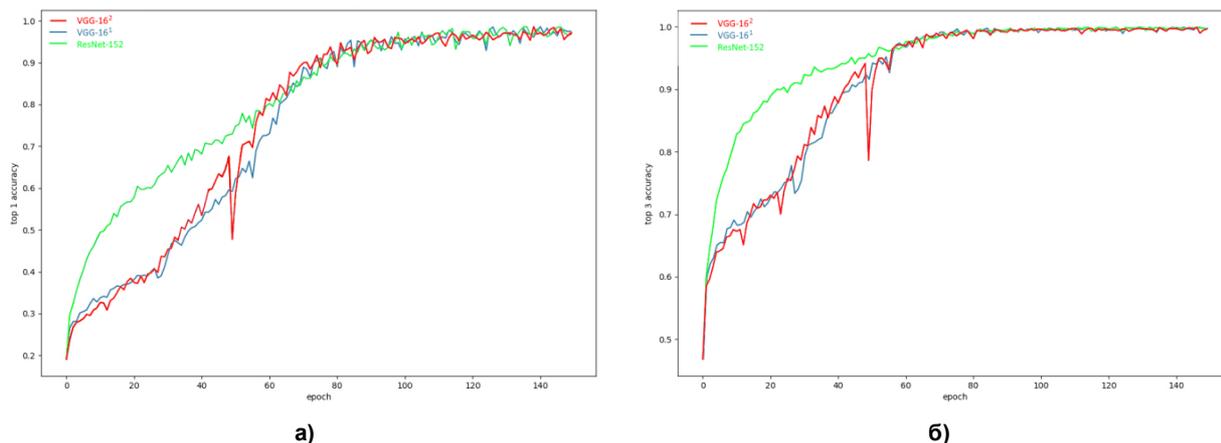


Рис. 2. Точность на обучающем множестве для сетей VGG-16<sup>1</sup>, VGG-16<sup>2</sup> и ResNet-152: а – Top-1; б – Top-3  
 Fig. 2. Accuracy on the training set for networks VGG-16<sup>1</sup>, VGG-16<sup>2</sup> and ResNet-152: а – Top-1; б – Top-3

Сеть ResNet-152 показывает высокую скорость сходимости. Практически за несколько эпох была достигнута точность 80 % по Top-3 (рис. 2б). При этом процесс обучения устойчив.

В табл. 1 показаны результаты обучения, выполненные по разным оценкам, на обучающем и валидационном множествах.

Результаты обучения сетей  
 Results of training networks

Таблица 1  
 Table 1

Сеть	Точность на обучающем множестве		Точность на валидационном множестве	
	Top-1	Top-3	Top-1	Top-3
VGG-16 <sup>1</sup>	0,9751	0,9975	0,4704	0,8117
VGG-16 <sup>2</sup>	0,9712	0,9970	0,5203	0,8142
ResNet-152	0,9593	0,9978	0,6243	0,8933

Определенной неожиданностью стало то, что, несмотря на неустойчивость обучения, непредобученная сеть VGG-16<sup>2</sup> показала значительно лучший результат Top-1 в сравнении с предобу-

## Краткие сообщения

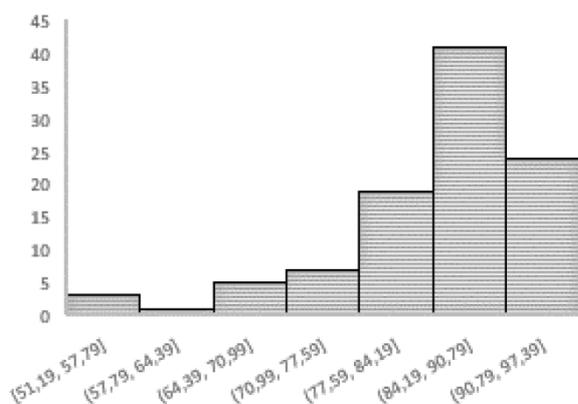
ченной версией этой же сети. Это можно объяснить тем, что первые слои сверточной непредобученной сети смогли лучше приспособиться к специфическим изображениям микрошлифов. Предобученная сеть предварительно обучалась на очень большом и разнообразном множестве фотографий. Это улучшило универсальные свойства сети VGG-16<sup>1</sup> (в особенности ее первых слоев), но ухудшило степень распознавания структур специального вида.

Как и предполагалось, сеть ResNet-152 показала лучший результат – 89,3 % по оценке Top-3. Показанная точность позволяет использовать обученную сеть в качестве ядра интеллектуальной системы комплексного оценивания прочностных свойств функциональных и конструкционных материалов.

Существенное улучшение результатов ResNet-152 было достигнуто при улучшении качества обучающего множества. Из него были исключены образцы снимков с кратностью увеличения x40. Во-первых, их количество было небольшим, во-вторых, снимки с такой кратностью присутствовали не во всех классах изображений. Было сделано предположение, что данные снимки ухудшают результаты обучения. Предположение подтвердилось, так как в результате обучения точность ResNet-152 выросла и достигла величины **92,1 %** по Top-3 и 66,2 % по Top-1. В табл. 2 представлены точности распознавания по классам материала.

**Таблица 2**  
**Точность распознавания по классам материала**  
**Table 2**  
**Accuracy of recognition by material classes**

Номер класса	Точность на валидационном множестве	
	Top-1	Top-3
0	0,718	1,000
1	0,812	1,000
2	0,593	0,843
3	0,562	0,812
4	0,375	0,937
5	0,937	1,000
6	0,687	0,937
7	0,500	0,933
8	0,562	0,875
9	0,906	0,906
10	0,937	1,000
11	0,375	0,843
12	0,894	1,000
13	0,590	1,000



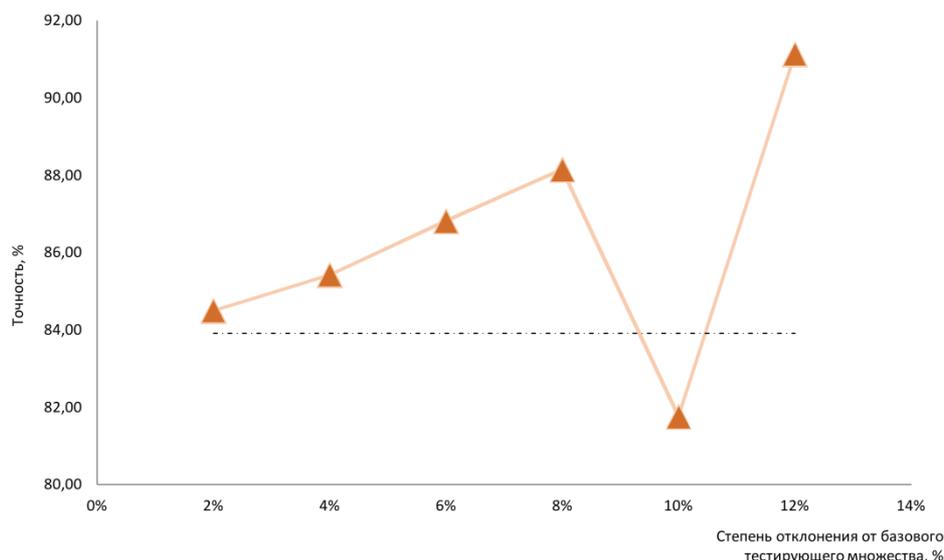
**Рис. 3. Гистограмма распределения точности в тестовом множестве**  
**Fig. 3. Histogram of the accuracy distribution in the test set**

Лучшая точность по обеим оценкам достигнута в классе 10. Худшая точность по оценке Top-1 получена на классах 11 и 4. При этом по оценке Top-3 на этих же классах достигнута приемлемая точность, которая составила 84,3 %.

Определение точности работы сети по тестовому множеству показало, что плотность распределения точности может быть аппроксимирована распределением Пирсона первого рода, гистограмма которого приведена на рис. 3.

Для изучения устойчивости обученной сети тестовое множество подвергалось вариациям. Окрестность стабильного решения формировалась путем исключения из тестового множества определенного количества элементов. Элементы выбирались случайным образом на 100 реализа-

циях. Такую окрестность принято называть Leave-one-out (LOO) окрестностью [5]. Обычно ее глубина равна 1 элементу. В данной работе строились несколько окрестностей: с 2, 4, 6, 8, 10 и 12%-ным отклонением от базового количества элементов в тестирующем множестве, которое использовалось для оценки точности стабильного решения. После прогона и определения точности по всем реализациям в окрестности результирующая точность получалась усреднением. Результаты численного эксперимента показаны на рис. 4.



**Рис. 4. Зависимость точности обученной нейросети в LOO окрестности базового тестирующего множества**  
**Fig. 4. Dependence of the accuracy of the trained neural network in the LOO neighborhood of the base testing set**

### 3. Анализ результатов

Из рис. 4 следует, что процесс проверки обученной сети равномерно сходится к точности, полученной на базовой выборке (обозначена пунктирной линией). При уменьшении количества элементов в тестовом множестве более чем на 8 % происходит резкая осцилляция оценки точности, что, по нашему мнению, является потерей алгоритмической устойчивости нейронной сети в рассматриваемой задаче классификации, которую она решает.

Данное утверждение может быть распространено и на процесс обучения, так как тестовое множество является независимой случайной однородной выборкой. Если алгоритм потерял устойчивость на тестовой выборке при контрольной проверке точности работы сети, то и процесс обучения сети потеряет устойчивость при уменьшении количества элементов в обучающей выборке на более чем 8 %.

Здесь необходимо отметить, что поиск потери устойчивости процесса обучения в глубоких сетях прямым методом является сложной задачей. Если процесс обучения сети на обучающем множестве размером в несколько десятков тысяч элементов может занимать несколько дней, то исследование устойчивости обучения затруднительно с практической точки зрения. Авторами данной работы предлагается упрощенный подход – исследовать равномерную сходимость на тестовом множестве, после чего распространить полученные выводы на все обучающее множество.

Результат, полученный в данной работе, может накладывать не только количественные, но и качественные ограничения на обучающее множество. Полученный предел может говорить о том, что в обучающем множестве не может быть более 8 % ошибочно аннотированных снимков, иначе процесс обучения потеряет устойчивость и результатам обучения доверять нельзя.

### Заключение

В работе изучена проблема равномерной сходимости процесса обучения и оценки точности глубокой сети ResNet-152 в задаче анализа микрошлифов сплавов на основе железа. Показано, что при 10%-ном количественном отклонении в базовом множестве алгоритм обученной сети

теряет устойчивость. Это означает, что при таком количестве элементов в тестовом множестве адекватная оценка точности сети невозможна.

Методика оценки устойчивости работы глубокой сети, примененная в данной работе, может быть распространена и на другие сети и задачи. Она не требует объемных вычислений, так как позволяет оценить достаточность количества элементов в обучающем множестве, не выполняя обучения сети на обучающих множествах, имеющих разнообразные мощности.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института наносталей МГТУ им. Г.И. Носова, особенно М.П. Барышникову, Н.В. Копцевой и Ю.Ю. Ефимовой, за предоставленные экспериментальные данные по размеченным изображениям микроструктур функциональных и конструкционных сталей, позволившие обучить построенную нейросеть с заданной точностью.

### Литература

1. Recommendation System for Material Scientists Based on Deep Learn Neural Network / A. Kliuev, R. Klestov, M. Bartolomey, A. Rogozhnikov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 850. – P. 216–223.
2. Evaluation of mechanical characteristics of hardened steels based on neural network analysis of digital images of microstructures / A.V. Klyuev, V.Yu. Stolbov, N.V. Koptseva, Yu.Yu. Jefimova // *Cherny Metally*. – 2020. – No. 6. – P. 50–56.
3. Klestov, R. About some approaches to problem of metals and alloys microstructures classification based on neural network technologies / R. Klestov, A. Klyuev, V. Stolbov // *Advances in Engineering Research*. – 2018. – Vol. 157. – P. 292–296.
4. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
5. Борисов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Борисов, В.В. Круглов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 382 с.
6. Hecht-Nielsen, R. Kolmogorov's mapping neural network existence theorem / R. Hecht-Nielsen // *IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks*. – San Diego, 1987. – Vol. 3. – P. 11–13.
7. Going deeper with convolutions / Christian Szegedy, Wei Liu, Yangqing Jia et al. // *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 2015. – P. 1–9.
8. Deep Residual Learning for Image Recognition / Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 2016. – P. 770–778.
9. Squeeze-and-Excitation Networks / Jie Hu, Li Shen, Samuel Albanie et al. – 2017. – ILSVRC 2017 image classification winner. arXiv: 1709.01507.
10. Вапник, В.Н. Теория распознавания образов / В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
11. Bousquet, O. Algorithmic Stability and Generalization Performance / O. Bousquet, A. Elisseeff // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2001. – No. 13. – P. 196–202.
12. Bousquet, O. Stability and Generalization / O. Bousquet, A. Elisseeff // *Journal of Machine Learning Research*. – 2002. – No. 2. – P. 499–526.
13. Brownlee, J. Impact of Dataset Size on Deep Learning Model Skill and Performance Estimates / J. Brownlee. – <https://machinelearningmastery.com/impact-of-dataset-size-on-deep-learning-model-skill-and-performance-estimates> (дата обращения: 04.02.2019).
14. How much data is needed to train a medical image deep learning system to achieve necessary high accuracy? / Junghwan Cho, Kyewook Lee, Ellie Shin et al. – 2015. – arXiv: 1511.06348, preprint arXiv.
15. Warden, P. How many images do you need to train a neural network? / Pete Warden. – <https://petewarden.com/2017/12/14/how-many-images-do-you-need-to-train-a-neural-network> (дата обращения: 04.11.2019).
16. Soekhoe, D. On the Impact of data set Size in Transfer Learning using Deep Neural Networks / Deepak Soekhoe, Peter van der Putten, Aske Plaat // *IDA 2016: Advances in Intelligent Data Analysis XV*. – 2016. – p. 50–60.

Клестов Роман Андреевич, аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; klestovroman@gmail.com.

Клюев Андрей Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; kav@gelicon.biz.

Столбов Валерий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; valeriy.stolbov@gmail.com.

Поступила в редакцию 29 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/ctcr210114

## ALGORITHMIC STABILITY OF DEEP LEARNING NEURAL NETWORKS IN RECOGNIZING THE MICROSTRUCTURE OF MATERIALS

R.A. Klestov, klestovroman@gmail.com,

A.V. Klyuev, kav@gelicon.biz,

V.Yu. Stolbov, valeriy.stolbov@gmail.com

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The division of data for training a neural network into training and test data in various proportions to each other is investigated. The question is raised about how the quality of data distribution and their correct annotation can affect the final result of constructing a neural network model. The paper investigates the algorithmic stability of training a deep neural network in problems of recognition of the microstructure of materials. The study of the stability of the learning process makes it possible to estimate the performance of a neural network model on incomplete data distorted by up to 10%. **Purpose.** Research of the stability of the learning process of a neural network in the classification of microstructures of functional materials. **Materials and methods.** Artificial neural network is the main instrument on the basis of which produced the study. Different subtypes of deep convolutional networks are used such as VGG and ResNet. Neural networks are trained using an improved backpropagation method. The studied model is the frozen state of the neural network after a certain number of learning epochs. The amount of data excluded from the study was randomly distributed for each class in five different distributions. **Results.** Investigated neural network learning process. Results of experiments conducted computing training with gradual decrease in the number of input data. Distortions of calculation results when changing data with a step of 2 percent are investigated. The percentage of deviation was revealed, equal to 10, at which the trained neural network model loses its stability. **Conclusion.** The results obtained mean that with an established quantitative or qualitative deviation in the training or test set, the results obtained by training the network can hardly be trusted. Although the results of this study are applicable to a particular case, i.e., microstructure recognition problems using ResNet-152, the authors propose a simpler technique for studying the stability of deep learning neural networks based on the analysis of a test, not a training set.

*Keywords: deep neural networks, material microstructure, image recognition, deep learning, algorithmic stability.*

### References

1. Klyuev A., Klestov R., Bartolomey M., Rogozhnikov A. Recommendation System for Material Scientists Based on Deep Learn Neural Network. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, vol. 850, pp. 216–223.

2. Klyuev A.V., Stolbov V.Yu., Kopceva N.V., Jefimova Yu.Yu. Evaluation of mechanical characteristics of hardened steels based on neural network analysis of digital images of microstructures. *Cherny Metally*, 2020, no. 6, pp. 50–56.
3. Klestov R., Klyuev A., Stolbov V. About some approaches to problem of metals and alloys microstructures classification based on neural network technologies. *Advances in Engineering Research*, 2018, vol. 157, pp. 292–296.
4. Khaykin S. *Neyronnyye seti: polnyy kurs*. [Neural networks: full course]. Transl. from engl., 2nd ed. Moscow, Vil'yams Publ., 2006. 1104 p.
5. Borisov V.V., Kruglov V.V. *Iskusstvennyye neyronnyye seti. Teoriya i praktika*. [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2003. 382 p.
6. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. *IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks*. San Diego, 1987, vol. 3, pp. 11–13.
7. Christian Szegedy, Wei Liu, Yangqing Jia, Pierre Sermanet, Scott Reed, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Vincent Vanhoucke, Andrew Rabinovich. Going deeper with convolutions. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 1–9.
8. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778.
9. Jie Hu, Li Shen, Samuel Albanie, Gang Sun, Enhua Wu. Squeeze-and-Excitation Networks, 2017. ILSVRC 2017 image classification winner. arXiv:1709.01507.
10. Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. *Teoriya raspoznavaniya obrazov* [Image recognition theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 416 p.
11. Olivier Bousquet, André Elisseeff. Algorithmic Stability and Generalization Performance. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2001, no. 13, pp. 196–202.
12. Olivier Bousquet, André Elisseeff. Stability and Generalization. *Journal of Machine Learning Research*, 2002, no. 2, pp. 499–526.
13. Brownlee J. *Impact of Dataset Size on Deep Learning Model Skill and Performance Estimates*. Available at: <https://machinelearningmastery.com/impact-of-dataset-size-on-deep-learning-model-skill-and-performance-estimates> (accessed 04.02.2019).
14. Junghwan Cho, Kyewook Lee, Ellie Shin, Garry Choy, Synho Do. How much data is needed to train a medical image deep learning system to achieve necessary high accuracy? 2015. arXiv: 1511.06348, preprint arXiv.
15. Pete Warden. *How many images do you need to train a neural network?* Available at: <https://petewarden.com/2017/12/14/how-many-images-do-you-need-to-train-a-neural-network> (accessed 04.11.2019).
16. Deepak Soekhoe, Peter van der Putten, Aske Plaat. On the Impact of data set Size in Transfer Learning using Deep Neural Networks. *IDA 2016: Advances in Intelligent Data Analysis XV*, 2016, pp. 50–60.

**Received 29 December 2020**

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Клестов, Р.А. Алгоритмическая устойчивость нейронных сетей глубокого обучения при распознавании микроструктуры материалов / Р.А. Клестов, А.В. Ключев, В.Ю. Столбов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 159–166. DOI: 10.14529/ctcr210114

### FOR CITATION

Klestov R.A., Klyuev A.V., Stolbov V.Yu. Algorithmic Stability of Deep Learning Neural Networks in Recognizing the Microstructure of Materials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 159–166. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210114

## 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 – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю д.т.н., доц. Голлаю А.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: gollaiav@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»  
2021. Том 21, № 1

16+

Редактор *С.И. Уварова*  
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 29.01.2021. Дата выхода в свет 05.02.2021. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 19,53. Тираж 500 экз. Заказ 12/38. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.