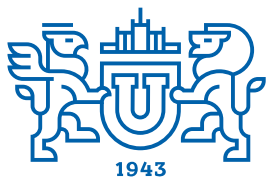


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2021
Т.21, № 3

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:

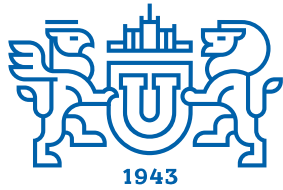
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного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

Редакционная коллегия:

Логиновский О.В., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*гл. редактор*) (г. Челябинск);
Бурков В.Н., д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (*зам. гл. редактора*) (г. Москва);
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:

Шестаков А.Л., д.т.н., проф. (*председатель*) (г. Челябинск);
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. 3

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:

Loginoskiy O.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*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;

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;

Shechepkin 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:

Shestakov A.L., Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*chairman*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

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. Krasovsky 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

ЯНИШЕВСКАЯ Н.А., БОЛОДУРИНА И.П. Применение технологий компьютерного зрения для разработки модели распознавания поражений культурных растений	5
АНТОНОВ В.В., КОНЕВ К.А., КУЛИКОВ Г.Г. Трансформация модели системы поддержки принятия решений для типовых ситуаций с применением интеллектуальных и аналитических методов	14
ABOTALEB M.S.A., MAKAROVSKIKH T.A. Development of Algorithms for Choosing the Best Time Series Models and Neural Networks to Predict COVID-19 Cases	26
ФЕЛЬКЕР М.Н., ЧЕШОВ В.В. Исследование влияния изменения параметров модели ARIMA на качество прогноза для коротких наборов данных	36

Управление в технических системах

ПУДОВКИНА С.Г., ТЕЛЕГИН А.И. Выписывание формул вычисления сил в сочленениях манипуляторов в статике	47
LIVANOV N.D., UKHOBOTOV V.I. On One Problem of Control of Voltage during Signal Transmission in a Long Line	59

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

АКСЁНОВ А.В., ЛАРИН А.А., САМБУРОВ Н.В. Безэховая камера, встраиваемая в помещения промышленного назначения	66
---	----

Управление в социально-экономических системах

АЛЕКСЕЕВ А.О., КАТАЕВА Т.А. Применение механизмов комплексного оценивания и матричных неанонимных обобщенных медианных механизмов для согласования интересов агентов	75
БЕКIROVA O.H., БАРКАЛОВ С.А., ТРИФОНОВА М.С. Эффективность инжиниринга в формировании конкурентоспособности строительства	90
ПЕРЕВАЛОВА О.С., БАРКАЛОВ С.А., КАЛИНИНА Н.Ю., БАТРАКОВА Д.Н. Модель повышения эффективности процесса обучения персонала на рабочем месте	100
ГЕЛЬРУД Я.Д., КИБАЛОВ Е.Б. Оценка стратегической эффективности крупномасштабных инфраструктурных проектов в ситуации неопределенности: проектный подход	113

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

БИЛЬФЕЛЬД Н.В., ПЕЯС Д.В., ШНАБСКАЯ А.К. Исследование возможности управления усреднением руды методами классической теории управления	123
ЗАТОНСКИЙ А.В., ЯЗЕВ П.А. Исследование влияния выбора моделей статистических распределений случайной величины на результаты моделирования горно-выемочных работ	130

Краткие сообщения

БОЛОДУРИНА И.П., ГРИШИНА Л.С., АНЦИФЕРОВА Л.Ф. Исследование параметров задачи сплайновой аппроксимации зашумленных данных численными методами оптимального управления	138
SERIKBAYEVA S.K., TUSSUPOV J.A., SAMBETBAYEVA M.A., SERIKBAYEVA J.K. Requirements for Distributed Information Systems to Support Scientific and Educational Activities	149
КОРЕННАЯ К.А., ГОЛЛАЙ А.В., ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Основы эффективного управления промышленными предприятиями в современных условиях	161

CONTENTS

Informatics and Computer Engineering

YANISHEVSKAYA N.A., BOLODURINA I.P. Application of Computer Vision Technologies for the Development of a Model for the Recognition of Lesions of Cultivated Plants	5
ANTONOV V.V., KONEV K.A., KULIKOV G.G. Transformation of the Decision Support System Model for Standard Situations Using Intellectual and Analytical Methods	14
ABOTALEB M.S.A., MAKAROVSKIKH T.A. Development of Algorithms for Choosing the Best Time Series Models and Neural Networks to Predict COVID-19 Cases	26
FEL'KER M.N., CHESNOV V.V. Study of the Influence of Changing the Parameters of the ARIMA Model on the Quality of the Forecast for Short Data Sets	36

Control in Technical Systems

PUDOVKINA S.G., TELEGIN A.I. Writing out of Formulas for Calculating Forces in the Joints of Manipulators in Statics	47
LIVANOV N.D., UKHOBOTOV V.I. On One Problem of Control of Voltage during Signal Transmission in a Long Line	59

Instrument Engineering, Metrology and Information and Measuring Devices and Systems

AKSENOV A.V., LARIN A.A., SAMBUROV N.V. An Anechoic Chamber Built Into Industrial Rooms ..	66
--	----

Control in Social and Economic Systems

ALEKSEEV A.O., KATAEVA T.A. Application of Integrated Rating Mechanisms and Matrix Non-Anonymous Generalized Median Voter Schemes to Coordination of the Agents' Interests	75
BEKIROVA O.N., BARKALOV S.A., TRIFONOVA M.S. Efficient Engineering in Development of Construction Sector Competitiveness	90
PEREVALOVA O.S., BARKALOV S.A., KALININA N.Yu., BATRAKOVA D.N. A Model for the Enhancement of Effectiveness of On-the-Job Training Process	100
GELRUD Ya.D., KIBALOV E.B. Assessment of the Strategic Efficiency of Large-Scale Infrastructure Projects in a Situation of Uncertainty: a Project Approach	113

Automated Process Control Systems

BILFELD N.V., PEYAS D.V., SHNABSKAYA A.K. Study of the Possibility of Controlling Ore Averaging by Methods of Classical Control Theory	123
ZATONSKIY A.V., YAZEY P.A. Investigation of the Random Value Statistical Distributions Models Choice Influence on the Mining Operations Modeling Results	130

Brief Reports

BOLODURINA I.P., GRISHINA L.S., ANTSIFEROVA L.M. Investigation of Parameters of the Problem of Spline Approximation of Noisy Data by Numerical Methods of Optimal Control	138
SERIKBAYEVA S.K., TUSSUPOV J.A., SAMBETBAYEVA M.A., SERIKBAYEVA J.K. Requirements for Distributed Information Systems to Support Scientific and Educational Activities	149
KORENNAYA K.A., HOLLAY A.V., LOGINOVSKY O.V. Fundamentals of Effective Management of Industrial Enterprises in Modern Conditions	161

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОРАЖЕНИЙ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ

Н.А. Янишевская, И.П. Болодурина

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

В Российской Федерации агропромышленный комплекс является одной из лидирующих отраслей экономики с объемом внутреннего валового продукта 4,5 %. России принадлежат 10 % всех пахотных земель мира. Согласно данным о посевных площадях по культурам в 2020 году, большую часть сельскохозяйственных площадей России занимает пшеница. Российская Федерация занимает третье место в рейтинге стран-лидеров по производству данного вида зерновых культур, а также лидирующие позиции по ее экспорту. Бурая (листовая) и линейная (стеблевая) ржавчина – наиболее вредоносная болезнь зерновых культур. Она является причиной изреженности посевов пшеницы и приводит к резкому снижению урожайности. Поэтому одной из главных задач аграриев является сохранение урожая от заболеваний. Помочь справиться с этой задачей способно применение таких областей искусственного интеллекта, как компьютерное зрение, машинное обучение и глубокое обучение. Данные технологии искусственного интеллекта позволяют успешно решать прикладные задачи агропромышленного комплекса при помощи автоматизированного анализа фотоматериалов. **Цель исследования.** Рассмотреть применение методов компьютерного зрения для задачи классификации поражений культурных растений на примере пшеницы. **Материалы и методы.** Набор данных CGIAR Computer Vision for Crop Disease для задачи распознавания поражений культурных растений взят из открытого источника Kaggle. Предлагается использовать подход к распознаванию поражений культурных растений с использованием известных нейросетевых моделей ResNet50, DenseNet169, VGG16 и EfficientNet-B0. На вход нейросетевым моделям поступают изображения пшеницы. Выходом нейронных сетей является класс поражения растения. Для преодоления эффекта переобучения нейронных сетей исследуются различные техники регуляризации. **Результаты.** Приводятся результаты качества классификации, оцениваемые с использованием метрики F1-score, являющейся среднегармоническим между мерами Precision и Recall. **Заключение.** В результате проведенного исследования установлено, что наилучшую точность распознавания показала модель DenseNet с применением комбинации технологии трансферного обучения и технологий регуляризации Dropout и L2 для преодоления эффекта переобучения. Применение данного подхода позволило достичь точности распознавания 91 %.

Ключевые слова: многоклассовая классификация, нейронные сети, технологии регуляризации, переобучение, поражение культурных растений.

Введение

В настоящее время довольно сложно представить какую-либо отрасль экономики, в которой бы не использовались информационные технологии. Отрасль сельского хозяйства не является исключением, хотя и занимает последнее место по уровню проникновения новейших технологий согласно данным центра по развитию инноваций McKinsey.

Согласно данным о посевных площадях по культурам в 2020 году, большую часть сельскохозяйственных площадей России занимает пшеница. Российская Федерация занимает третье место в рейтинге стран-лидеров по производству данного вида зерновых культур, а также лидирующие позиции по ее экспорту. Поэтому одной из главных задач аграриев является сохранение урожая от заболеваний. Бурая листовая ржавчина пшеницы – наиболее вредоносная болезнь растения. Она является причиной изреженности посевов пшеницы и приводит к резкому снижению урожайности.

Помочь справиться с этой задачей способно применение таких областей искусственного интеллекта, как компьютерное зрение, машинное обучение и глубокое обучение, которые позволяют успешно решать прикладные задачи агропромышленного комплекса при помощи автоматизированного анализа фотоматериалов.

Таким образом, становится актуальной задача применения технологий компьютерного зрения для разработки модели распознавания поражений культурных растений.

1. Обзор исследований

Исследователи изучили различные решения для прогнозирования заболеваний на основе данных сельскохозяйственных культур. Некоторые из этих работ, предложенных за последние несколько лет, представлены ниже.

В статье [1] разработан алгоритм выявления болезней на таком лекарственном растении, как куркума. Для этого была создана и обработана база данных, состоящая из 200 различных изображений листьев куркумы, с использованием сегментации изображений методом *k*-средних и проведен текстурный анализ изображений листьев с использованием матрицы совпадения уровня серого (GLCM). Для классификации объектов был использован SVM-классификатор. Объекты предварительно были извлечены из изображений, а также проведено ранжирование атрибутов с использованием критерия прироста информации (Information Gain, IG). Выявлено, что точность SVM-классификатора составила 91 %.

Работа [2] описывает подход к выявлению болезней риса с помощью применения искусственного интеллекта (ИИ) и эффективных методов компьютерного зрения. В данной статье авторы рассмотрели гибридную модель, объединив метод вектора опорных векторов (SVM) и сверточную нейронную сеть (CNN) под названием Deep CNN (DCNN) для классификации изображений болезни риса. Для улучшения предложенной модели была использована методика трансфертного обучения. После этого 1080 изображений набора данных, включающих изображения девяти различных болезней риса, используются для повторного обучения предложенной модели. Затем классификатор SVM обучается с помощью признаков, извлеченных из модели DCNN. Предложенная модель идентифицировала и классифицировала 270 изображений тест-набора данных болезней риса и достигла точности 97,5 %.

В статье [3] приведено сравнение производительности использования семи предварительно обученных глубоких сверточных нейронных сетей (AlexNet, GoogLeNet, ResNet18, ResNet101, InceptionV3, InceptionResNetV2, SqueezeNet), которые использовали метод тонкой настройки для сохранения последних трех полных слоев соединения и получения модели классификации. Авторы применили предложенный метод к классификации набора данных листьев *Cinnamomum Camphora*, и экспериментальные результаты показали, что рассмотренный метод является достаточно эффективным и выполнимым. Из экспериментальных результатов можно сделать вывод, что изучение признаков с помощью сети глубокого обучения может обеспечить лучшую точность классификации изображений листьев по сравнению с обработанными вручную признаками. Кроме того, показано, что различная структура является важным фактором для идентификации различных видов растений с точностью от 69,8 до 95,3 %.

Ряд работ посвящен рассмотрению набора данных Plant Village Dataset. Так, в работе [4] авторами разработано приложение dStop, определяющее заболевание сельскохозяйственных культур на основе фотографии. Предложена модель прогнозирования болезней сельскохозяйственных культур с использованием глубоких сверточных нейронных сетей. В работе использован набор данных Plant Village Dataset, в котором содержится 54306 изображений, содержащих фотографии как зараженных листьев (38 различных заболеваний культурных растений), так и здоровых. Обученная модель глубокого обучения, а также приложение подвергаются серии тестов, чтобы обеспечить использование предлагаемой системы для производства. Обученная модель достигла точности 99,24 % и может идентифицировать 14 видов сельскохозяйственных культур и 26 болезней.

Предлагаемый в исследовании [5] метод фокусируется на реализации усовершенствованной техники сегментации с использованием комбинации пороговых и морфологических операций. Для классификации авторы использовали глубокую нейронную сеть. Предложенный ими метод достиг точности 99,25 %.

В работе [6] также исследуется открытый набор данных Plant Village Dataset, который включает 15 200 изображений листьев сельскохозяйственных культур. Числовые значения таких характеристик, как средняя взвешенная точность (Avg Weighted Precision) и точность (Accuracy) для предложенной авторами остаточной сетевой модели ResNet34 составили 96,51 и 99,40 % соответственно. Кроме того, в рамках исследования авторами проведен сравнительный анализ данных показателей производительности для модели ResNet и методами SVM, k-NN, Decision Tree и Logistic Regression. В результате исследования установлено, что предложенная модель показала лучшие результаты классификации.

В исследовании [7] реализовано глубокое обучение для обнаружения и классификации того, является ли лист сахарного тростника больным или здоровым. Архитектура использовала простую CNN с 7 различными классами для классификации листьев сахарного тростника. Достигнутая точность составила 95 %.

Таким образом, анализ источников зарубежных авторов показал, что исследования в агро-секторе с применением компьютерного зрения актуальны на сегодняшний день. Кроме этого, выявлено, что для задач компьютерного зрения широко применяются сверточные нейронные сети.

2. Постановка задачи

Пусть $X \subseteq R^d$ – пространство признаков, $Y = \{1, \dots, k\}$ – множество классов, $F = \{X \times Y \rightarrow R\}$ – параметрическое семейство функций. Задана простая выборка $L = \left\{ \left(\bar{x}_i, y(\bar{x}_i) \right) \right\}_{i=1}^m \subset X \times Y$. Задача классификации состоит в выборе функции из F , доставляющей минимум функционала качества классификации:

$$f^* = \arg \min_{f \in F} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \ell(f(x_i), y_i) \right\},$$

где $\ell : Y \times Y \rightarrow R_+$ – функции потерь. Классификатором тогда будет

$$h \in H = \left\{ h_f : X \rightarrow Y, h_f(x) = \arg \max_{y \in Y} f(x, y) \mid f \in F \right\}.$$

При $|Y| = 2$ классификация называется бинарной, при $|Y| > 2$ – многоклассовой.

3. Классификация поражений культурных растений

3.1. Описание набора данных

Основная часть набора данных CGIAR Computer Vision for Crop Disease [8] собрана международным центром улучшения урожая кукурузы и пшеницы (International Maize and Wheat Improvement Center, CIMMYT) и его партнерами в Эфиопии и Танзании. Остальные данные получены из общедоступных изображений, найденных в Google Images.

На основе данного набора данных необходимо построить модель машинного обучения, позволяющую точно классифицировать пшеницу на изображениях на 3 класса: здоровую пшеницу, пшеницу, зараженную бурой (листовой) или линейной (стеблевой) ржавчиной.

Некоторые изображения могут содержать как стеблевую, так и листовую ржавчину, однако всегда есть один тип ржавчины, который является более доминирующим, чем другой. Цель состоит в том, чтобы классифицировать изображение в соответствии с типом пшеничной ржавчины, которая появляется наиболее заметно на изображении.

Описание набора данных представлено в табл. 1.

Описание набора данных

Таблица 1

Description of the data set

Table 1

Год создания	Кол-во классов	Кол-во изображений		
		Healthy wheat	Leaf rust	Stem rust
2019	3	118	304	246

3.2. Архитектуры нейронных сетей

Для проведения классификации поражений культурных растений будем использовать существующие архитектуры сверточных нейронных сетей. В табл. 2 представлены их характеристики.

Характеристики сверточных нейронных сетей

Таблица 2

Characteristics of convolutional neural networks

Table 2

Структура модели	Год создания	Топ-1 Accuracy, %	Топ-5 Accuracy, %	Количество слоев
VGG16 [9]	2014	74,4	91,90	16
DenseNet169 [10]	2016	76,2	93,15	169
ResNet50 [11]	2019	83,2	96,50	50
EfficientNet-B0 [12]	2020	84,3	97,10	237

3.3. Многоклассовая классификация с применением технологии Transfer Learning

Поскольку набор данных содержит небольшое количество изображений, применим технологию трансферного обучения [13, 14]. Идея трансферного обучения строится на том, что знания, накопленные в модели, подготовленной для выполнения одной задачи, могут быть перенесены на другую модель, чтобы помочь в построении прогнозов для другой, родственной задачи. Применим рассмотренные выше архитектуры нейронных сетей к набору данных.

В табл. 3 представлены значения метрик Precision, Recall и F1-score для рассматриваемых архитектур нейронных сетей.

Значения метрик для различных архитектур CNN

Таблица 3

Metric values for different CNN architectures

Table 3

Структура модели	Precision			Recall			F1-score		
	healthy wheat	leaf rust	stem rust	healthy wheat	leaf rust	stem rust	healthy wheat	leaf rust	stem rust
ResNet	0,97	0,73	0,81	0,74	0,83	0,85	0,84	0,77	0,83
DenseNet	0,91	0,87	0,85	0,82	0,84	0,93	0,86	0,85	0,89
VGGNet	0,95	0,71	0,89	0,74	0,89	0,83	0,83	0,79	0,86
EfficientNet	0,88	0,76	0,81	0,81	0,85	0,83	0,84	0,88	0,86

Согласно данным табл. 3, можно сделать следующие выводы. Наилучшую точность классификации изображений здоровой пшеницы показала модель DenseNet (82 %), с поражением листьев – модель VGGNet (89 %), с поражением стеблей – модель DenseNet (93 %). Наихудшую точность классификации изображений здоровой пшеницы показали модели ResNet и VGGNet (74 %), с поражением листьев – модель ResNet (83 %), с поражением стеблей – модели VGGNet и EfficientNet (83 %).

На рис. 1–4 представлены графики точностей и потерь на этапах обучения и валидации.

Обратим внимание на графики точностей и потерь на этапах обучения и проверки. На них четко наблюдается эффект переобучения [15]. Ошибки на обучающих данных уменьшаются и приближаются к 0, тогда как ошибки на проверочных данных после некоторой итерации прекращают уменьшаться и замирают на одной отметке. Если происходит переобучение, то модель утрачивает способность к обобщению – возможности распространять обнаруженные на обучающем множестве зависимости и закономерности на новые данные. Поэтому для избежания данного явления будем использовать методы регуляризации: Early Stopping, L1 и L2-регрессии, DropOut.

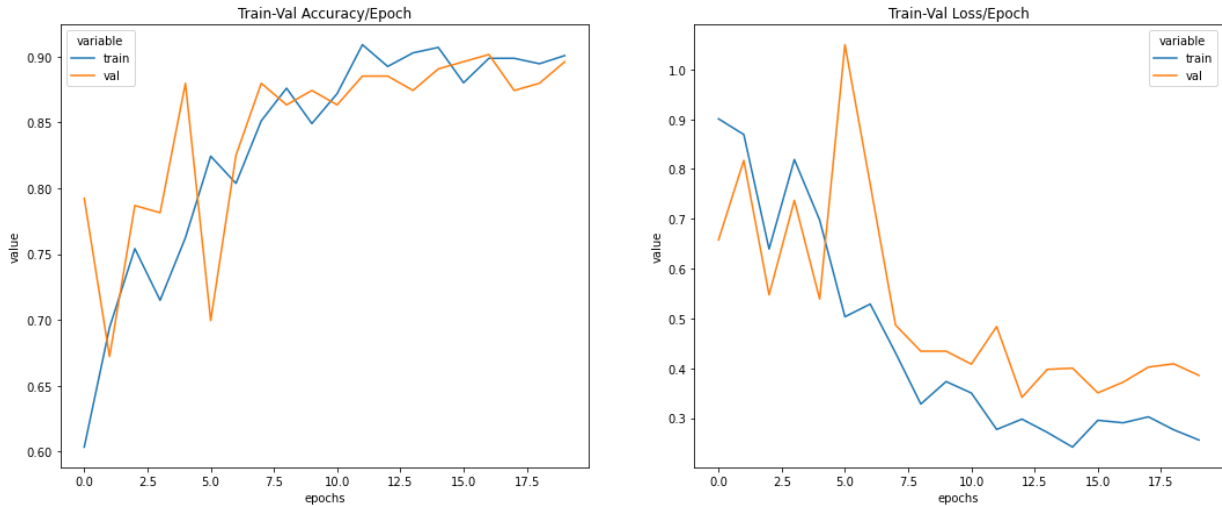


Рис. 1. График точностей и потерь на этапах обучения и проверки (модель ResNet50)
 Fig. 1. Graph of accuracy and loss at the training and validation stages (ResNet50)

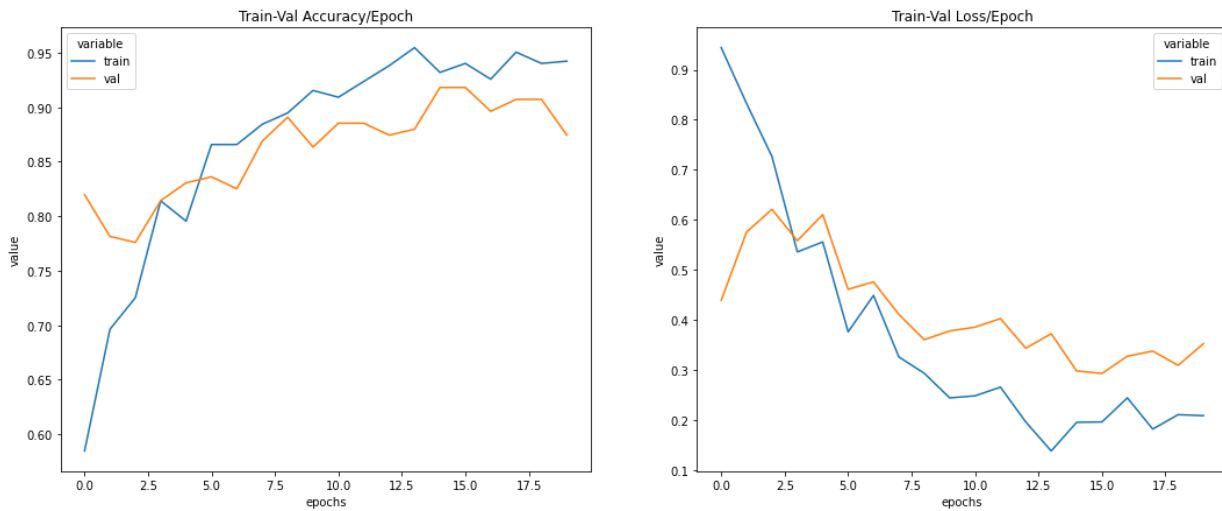


Рис. 2. График точностей и потерь на этапах обучения и проверки (модель DenseNet169)
 Fig. 2. Graph of accuracy and loss at the training and validation stages (DenseNet169)

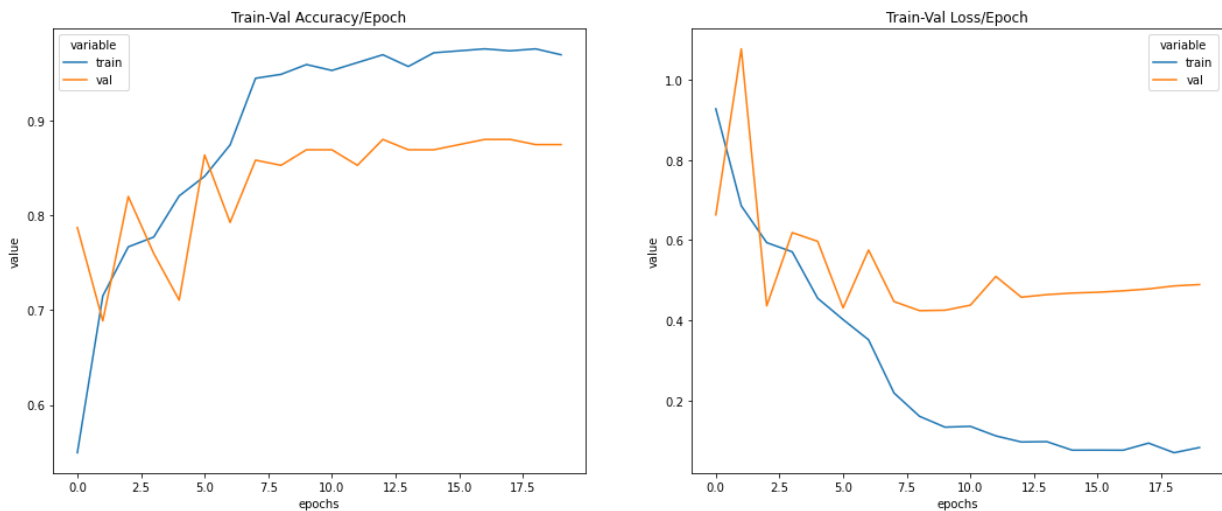


Рис. 3. График точностей и потерь на этапах обучения и проверки (модель VGG16)
 Fig. 3. Graph of accuracy and loss at the training and validation stages (VGG16)

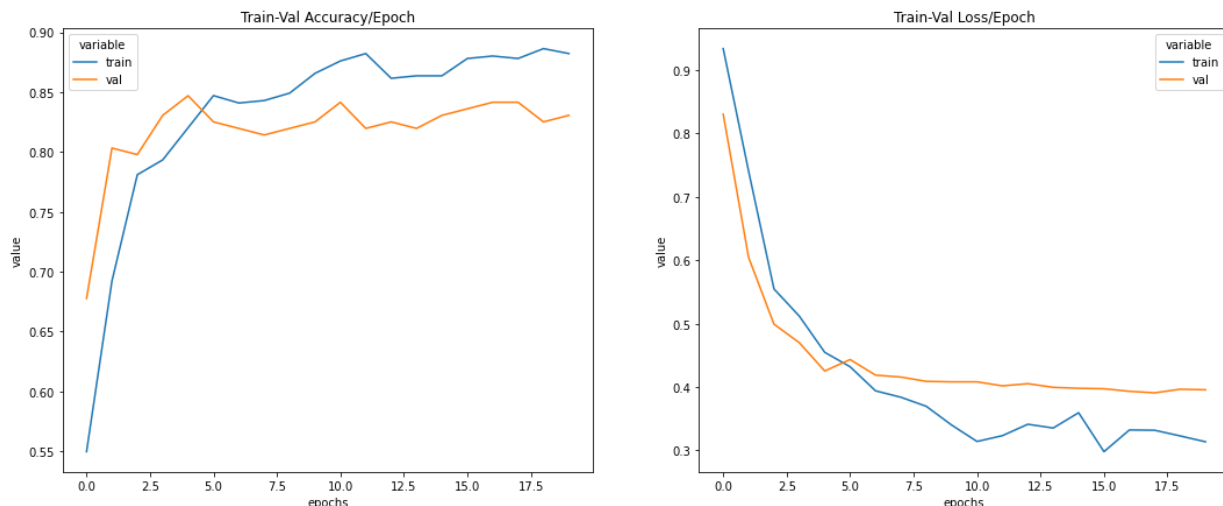


Рис. 4. График точностей и потерь на этапах обучения и проверки (модель EfficientNet-B0)
 Fig. 4. Graph of accuracy and loss at the training and validation stages (EfficientNet-B0)

3.4. Оценка качества применения методов регуляризации

На рис. 5 приведена диаграмма – изменение разности логарифмической функции потерь на этапах обучения и проверки на последней эпохе обучения.

Поскольку не существует определенного числового значения, характеризующего преодоление эффекта переобучения, будем считать, что модели удалось снизить эффект переобучения при значении разности между логарифмическими функциями потерь 0,05.

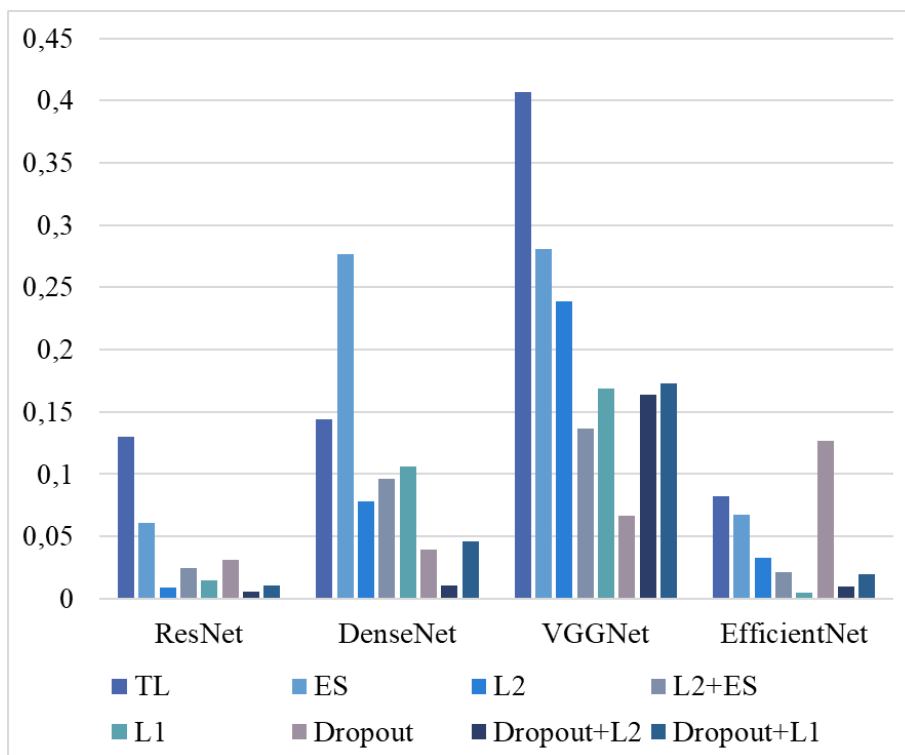


Рис. 5. Разности логарифмической функции потерь с порогом $\gamma = 0,05$
 Fig. 5. Differences of the logarithmic loss function with a threshold of $\gamma = 0,05$

В табл. 4 приведены средневзвешенные значения метрики F1-score для рассматриваемых архитектур нейронных сетей.

Таблица 4

Средневзвешенные значения метрики F1-score для различных CNN

Table 4

Weighted average values of the F1-score metric for various CNNs

CNN	TL	ES	L2	L2+ES	L1	DropOut	DropOut + L1	DropOut + L2
ResNet	0,81	0,79	0,86	0,82	0,87	0,80	0,87	0,88
DenseNet	0,87	0,84	0,89	0,87	0,87	0,90	0,87	0,91
VGGNet	0,83	0,81	0,83	0,85	0,81	0,84	0,87	0,88
EfficientNet	0,86	0,88	0,87	0,86	0,85	0,86	0,87	0,88

Согласно данным табл. 4, можно сделать следующие выводы.

1. Применение всех методов регуляризации, кроме ранней остановки, для модели ResNet могло снизить эффект переобучения. Однако применение метода DropOut незначительно, но снизило значение F1-меры.

2. Снизить переобучение для модели DenseNet помогли такие техники, как DropOut совместно с применением L1 и L2-регуляризации, при этом значение F1-меры не ухудшилось.

3. Для модели VGGNet ни одна из рассмотренных методик регуляризации не помогла снизить эффект переобучения.

4. Применение всех методов регуляризации, кроме ранней остановки и DropOut для модели EfficientNet, помогли снизить эффект переобучения, однако L1-регуляризация при этом уменьшила значение F1-меры.

5. Отметим, что совместное применение технологии DropOut и L2-регуляризации помогло не только снизить эффект переобучения, но и повысить показатель F1-меры на наибольшее количество процентов относительно показателей при трансферном обучении. Кроме этого, для модели ResNet наблюдается повышение данной характеристики на 7 %, что является наибольшим приростом среди рассмотренных моделей.

6. Модель DenseNet показала наилучшие результаты классификации со значением F1-меры, равным 91 %.

Заключение

В рамках данного исследования проведена многоклассовая классификация поражений культурных растений на примере пшеницы. Применение технологии трансферного обучения для решения проблемы недостаточного количества данных помогло достичь достаточно высоких показателей точности. Так, наилучшую точность классификации здоровой пшеницы (82 %) и пшеницы с поражением стеблей (93 %) показала модель DenseNet, модель VGGNet верно классифицировала 89 % изображений с поражением листьев. Однако анализ графиков точностей и потерь на этапах обучения и проверки показал, что на всех моделях наблюдается эффект переобучения, что снижает их обобщающую способность. В данной работе рассмотрены следующие технологии для снижения эффекта переобучения: Early Stopping, L1 и L2-регуляризация, DropOut.

В результате проведенного исследования установлено, что наилучшую точность распознавания показала модель DenseNet с применением комбинации технологии трансферного обучения и технологий регуляризации DropOut и ридж-регрессии (L2) для преодоления эффекта переобучения. Применение данного подхода позволило достичь значения F1-меры 91 %.

Литература/References

1. Kuricheti G., Supriya P. Computer Vision Based Turmeric Leaf Disease Detection and Classification: A Step to Smart Agriculture. *3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 2019, pp. 545–549. DOI: 10.1109/ICOEI.2019.8862706

2. Md. Jahid Hasan, Shamim Mahbub, Md. Shahin Alom, Md. Abu Nasim. Rice Disease Identification and Classification by Integrating Support Vector Machine with Deep Convolutional Neural Network. *1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT 2019)*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICASERT.2019.8934568

3. Huang Z.-K., He C.-Q., Wang Z.-N., Xi J.-M., Huan W., Hou L.-Y. Cinnamomum Camphora Classification Based on Leaf Image Using Transfer Learning. *IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 2019, pp. 1426–1429. DOI: 10.1109/IAEAC47372.2019.8997791
4. Pallagani V., Khandelwal V., Chandra B., Udutalapally V., Das D., Mohanty S. dCrop: A Deep-Learning Based Framework for Accurate Prediction of Diseases of Crops in Smart Agriculture. *IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES) (Formerly iNiS)*, 2019, pp. 29–33. DOI: 10.1109/iSES47678.2019.00020
5. Md. Arifur Rahman, Md. Mukitul Islam, G.M. Shahir Mahdee, Md. Wasi Ul Kabir. Improved Segmentation Approach for Plant Disease Detection. *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICASERT.2019.8934895
6. Kumar V., Arora H., Harsh, Sisodia J. ResNet-based approach for Detection and Classification of Plant Leaf Diseases. In *Proc. of the International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC 2020)*, 2020, pp. 495–502. DOI: 10.1109/ICESC48915.2020.9155585
7. Militante S., Gerardo B., Medina R. Sugarcane Disease Recognition using Deep Learning. *IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 2019, pp. 575–578. DOI: 10.1109/ECICE47484.2019.8942690
8. Kaggle Inc. CGIAR Computer Vision for Crop Disease. Available at: <https://www.kaggle.com/shadabhussain/cgiar-computer-vision-for-crop-disease> (accessed 24.12.2020).
9. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. *CoRR*, 2015, vol. 1409.1556, pp. 1–14.
10. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
11. Huang G., Liu Zh., van der Maaten L., Weinberger K. Densely Connected Convolutional Networks. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2261–2269. DOI: 10.1109/CVPR.2017.243
12. Tan M., Le Q. EfficientNet-B0: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. *ArXiv*, 2019, vol. 1905.11946.
13. Valverde J., Imani V., Abdollahzadeh A., De Feo R., Prakash M., Cizek R., Tohka J. Transfer Learning in Magnetic Resonance Brain Imaging: A Systematic Review. *Journal of Imaging*, 2021, vol. 7, no. 66, pp. 1–21. DOI: 10.3390/jimaging7040066
14. Zhuang F., Qi Zh., Duan K., Xi D., Zhu Y., Zhu H., Xiong H., He Q. A Comprehensive Survey on Transfer Learning. *Proceedings of the IEEE*, 2020, pp. 1–34. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3004555
15. Xue Ying. An Overview of Overfitting and its Solutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1168, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1168/2/022022

Янишевская Наталья Александровна, студент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; natalia.yanishevskaya1997@yandex.ru.

Болодурина Ирина Павловна, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; prmat@mail.osu.ru.

Поступила в редакцию 22 июня 2021 г.

APPLICATION OF COMPUTER VISION TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE RECOGNITION OF LESIONS OF CULTIVATED PLANTS

N.A. Yanishevskaya, natalia.yanishevskaya1997@yandex.ru,

I.P. Bolodurina, prmat@mail.osu.ru

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

In the Russian Federation, the agro-industrial complex is one of the leading sectors of the economy with a volume of domestic product of 4.5%. Russia owns 10 % of all arable land in the world. According to the data on the sown areas by crops in 2020, most of the agricultural area of Russia is occupied by wheat. The Russian Federation ranks third in the ranking of leading countries in the production of this type of grain crops, as well as leading positions in its export. Brown (leaf) and linear (stem) rust is the most harmful disease of grain crops. It is the reason for the sparseness of wheat crops and leads to a sharp decrease in yield. Therefore, one of the main tasks of farmers is to preserve the crop from diseases. The application of such areas of artificial intelligence as computer vision, machine learning and deep learning is able to cope with this task. These artificial intelligence technologies allow us to successfully solve applied problems of the agro-industrial complex using automated analysis of photographic materials. **Aim.** To consider the application of computer vision methods for the problem of classification of lesions of cultivated plants on the example of wheat. **Materials and methods.** The CGIAR Computer Vision for Crop Disease dataset for the crop disease recognition task is taken from the open source Kaggle. It is proposed to use an approach to the recognition of lesions of cultivated plants using the well-known neural network models ResNet50, DenseNet169, VGG16 and EfficientNet-B0. Neural network models receive images of wheat as input. The output of neural networks is the class of plant damage. To overcome the effect of overfitting neural networks, various regularization techniques are investigated. **Results.** The results of the classification quality, estimated by the software using the F1-score metric, which is the average harmonic between the Precision and Recall measures, are presented. **Conclusion.** As a result of the conducted research, it was found that the DenseNet model showed the best recognition accuracy using a combination of transfer learning technology and DropOut and L2 regulation technologies to overcome the effect of retraining. The use of this approach allowed us to achieve a recognition accuracy of 91%.

Keywords: multiclass classification, neural networks, regularization technologies, overfitting, damage to cultivated plants.

Received 22 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Янишевская, Н.А. Применение технологий компьютерного зрения для разработки модели распознавания поражений культурных растений / Н.А. Янишевская, И.П. Болодурина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 5–13. DOI: 10.14529/ctcr210301

FOR CITATION

Yanishevskaya N.A., Bolodurina I.P. Application of Computer Vision Technologies for the Development of a Model for the Recognition of Lesions of Cultivated Plants. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210301

ТРАНСФОРМАЦИЯ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ТИПОВЫХ СИТУАЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

В.В. Антонов¹, К.А. Конев¹, Г.Г. Куликов²

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

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

В настоящей статье рассматриваются вопросы повышения эффективности деятельности по поддержке принятия решений при относительно большом объёме информации. Актуальность исследования связана со всё возрастающей сложностью объектов управления, что ведёт к снижению эффективности принятия решений на основе личного опыта лиц, принимающих решения, вплоть до полной невозможности. **Цель.** В качестве основной цели статьи рассматривается анализ проблем, с которыми сталкиваются лица, принимающие решения, и формирование методов для повышения результативности принятия решений в типовых ситуациях. В статье исследуются основные компоненты интеллектуальной подсистемы системы поддержки принятия решений, которые требуют применения аналитических инструментов, а также формируется структура взаимодействия методов, необходимых для эффективного формирования сценариев информационной поддержки принятия решений. **Методы.** Для достижения целей применялись: метод поддержки принятия решений на основе интеллектуальной компоненты, который нацелен на создание эффективной инфраструктуры для поддержки принятия решений; методы идентификации и категоризации, предназначенные для осуществления наиболее точного и корректного сопоставления характеристик (состояния) наблюдаемой ситуации и характеристик типовой ситуации, хранимых в базе знаний; методы корреляции, направленные на поиск зависимостей между характеристиками ситуаций и сценариев для решения проблем, связанных с этими ситуациями; метод построения предметной квалиметрии, использованный для формирования прогнозной модели для оценки степени соответствия выбранного сценария решения сложившейся ситуации. **Результат.** Определено, что важным аспектом принятия решений в типовых ситуациях – является наиболее точная идентификация состояния ситуации, выбор наилучшего сценария реализации решения для этой ситуации и анализ последствий выбранного комплекса мероприятий. Для решения указанных задач сформированы метод идентификации ситуации, метод поиска сценариев решения и квалиметрическая методика прогнозной оценки результативности выбранного сценария. **Заключение.** В статье сделан вывод, что деятельность по принятию решений на основе накопленного опыта может быть улучшена за счёт использования предложенных методов и внедрения системы поддержки принятия решений с интеллектуальной компонентой.

Ключевые слова: принятие решений, интеллектуальная подсистема системы поддержки принятия решений, идентификация ситуации, поиск сценариев, квалиметрическая модель.

Введение

Процесс принятия решений является одной из важнейших и актуальнейших тем для исследователей всего мира [20]. При этом значительный объём задач любого ЛПР относится к классу типовых, повторяющихся (самоподобных). Как правило, любой такой специалист, в зависимости от характеристик ситуации, подбирает настройки типового сценария решения [14]. Например, водитель может ехать по любой дороге, но использует для управления транспортным средством одни и те же приёмы. Тем не менее вопрос настройки типовых сценариев решений остаётся очень сложным и важным. Этому способствует несколько причин: ситуация не обязательно однозначно может быть отнесена к известным типам, существующий сценарий решения может не полностью удовлетворять ситуации, выбор сценария решения обычно не очевиден. Эти причины в значительной мере объясняют ошибки в управленческих решениях, принимаемых во вполне установившихся стабильных организационных процессах [18].

Основным способом принятия решений в типовых ситуациях на сегодняшний день является неформализованный опыт. С точки зрения современных исследователей опыт принятия решений не должен оставаться только в памяти ЛПР, но и должен отчуждаться и сохраняться в виде знаний в интеллектуальных подсистемах систем поддержки принятия решений [4, 22]. В этом случае задачи классификации множества ситуаций и множества сценариев для поиска управленческих решений сводятся к математическим алгоритмам [7, 11]. Однако остаётся два значимых вопроса – вопросы выбора и настройки сценария решения для выявленных характеристик ситуации. Решению данных актуальных задач посвящена данная статья.

1. Интеллектуальная подсистема системы принятия решений

Современная система поддержки принятия решений с большой долей вероятности должна содержать интеллектуальную компоненту [21]. Интеллектуальная компонента включает не только набор спецификаций описания характеристик некоторых типовых ситуаций и набор спецификаций характеристик сценариев принимаемых решений, но и правила для идентификации параметров ситуаций, для выбора сценария для идентифицированной ситуации, а также для прогнозирования последствий принятого решения. Последние две задачи очень похожи, но не тождественны, поскольку выбор сценария решения для какой-либо ситуации подразумевает отбор всех подходящих сценариев, в то время как прогнозирование последствий – это попытка оценить и выбрать наилучшее решение, т. е. решение задачи оптимизации по одному или нескольким из заданных критериев (максимизация полезности, снижение затрат, максимизация безопасности и т. д.).

Важно отметить, что вопросы автоматизации принятия решений имеют несколько уровней. На уровне интуитивно очевидных решений по типу «идёт дождь – возьми зонт» нет смысла в глубокомысленном анализе. Принятие новых решений в новых ситуациях на объекте управления – чрезвычайно интересный вопрос, частично рассмотренный в [2], выходит за предмет изложения данной статьи, так же как и вопрос принятия решений по нечётким данным, собранным главным образом со слов экспертов. В данной статье наиболее подробно рассмотрены методы принятия решений на основе относительно полных и точных данных, которые можно обрабатывать с помощью методов нечеткой логики или статистически. Таким образом, интеллектуальная подсистема системы поддержки принятия решений представляет собой комплекс внешних и внутренних дискретных описаний ситуаций, сценариев и правил нескольких типов (рис. 1).

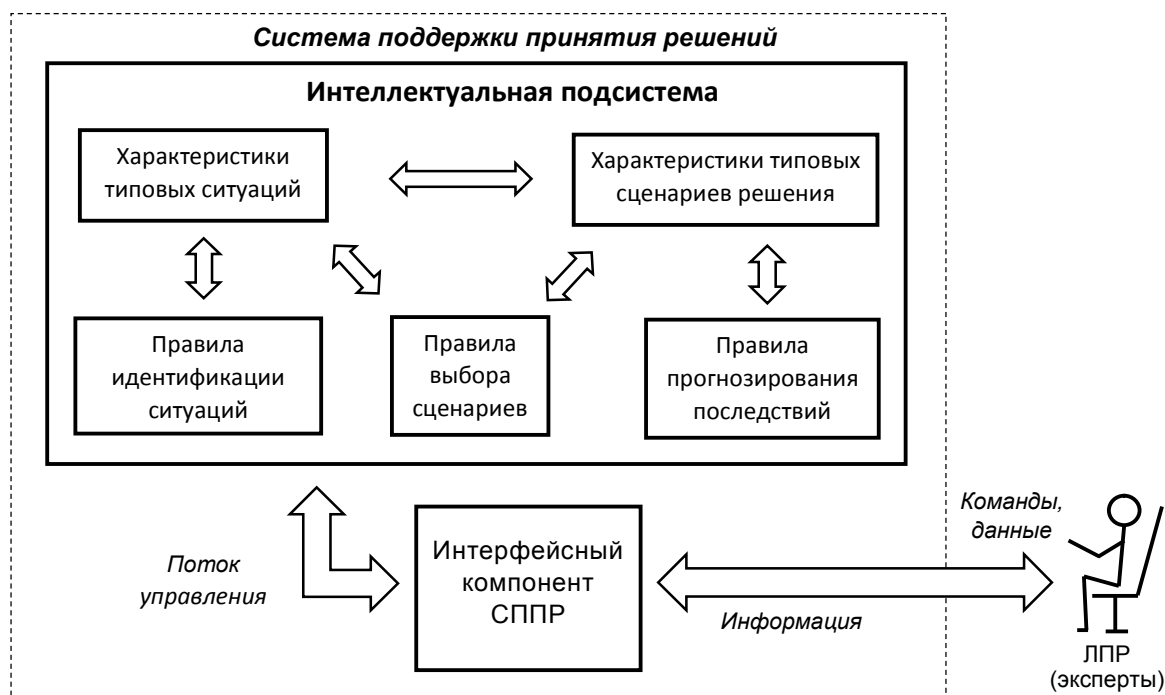


Рис. 1. Структура интеллектуальной подсистемы системы поддержки принятия решений
Fig. 1. The structure of the intelligent subsystem of the decision support system

Разработка интеллектуальной подсистемы для типовых, достаточно изученных ситуаций представляет собой задачу объединения знаний об этих ситуациях, сценариях решений для них и правил.

Для принятия решений при таких данных основную научную проблему составляют разработка новых или адаптация существующих методов системной инженерии для решения задач идентификации ситуаций, выбора сценариев и прогнозирования последствий принятых решений. Рассмотрим подробнее, каким образом системно можно решить данные задачи в рамках базовых международных стандартов [3, 12].

2. Метод системной идентификации ситуации

Задачи на этапе «узнавания» или идентификации ситуации могут решаться с очень высокой точностью, если ситуация оценивается по большому числу показателей. Для существенно типовых процессов, в которых ЛПР обладает глубоким опытом, такая задача может вполне корректно решаться интуитивно на ситуационно-функциональном уровне. Однако для задач, реализуемых относительно редко и свойственных главным образом проектам, ЛПР далеко не всегда способен с ходу правильно идентифицировать ситуацию. В любом случае разработчик системы поддержки принятия решений не может прогнозировать на длительную перспективу, какие именно типовые ситуации не требуют поддержки ЛПР, а какие, напротив, требуют. Тем более что роль ЛПР не привязана к конкретному человеку, а новый работник может иметь совсем другой, зачастую более низкий, уровень компетенций. Таким образом, задача идентификации есть задача накопления, сохранения, актуализации и использования опыта распознавания типовых ситуаций как объектов по их внутренним признакам в топологической системе координат «пространство – время». Если набор типовых ситуаций обширен, то количество признаков, по которым идентифицируется («узнаётся») ситуация, может быть очень велико и образовывать целую классификационную модель, таксономию. Наиболее известным примером обширной таксономии для идентификации является – классификация видов по Линею – Ламарку [16]. По аналогии с ней вполне можно классифицировать наблюдаемые ситуации, в которых принимается решение, например, специалистом по закупкам при выборе поставщика или при решении о размерах запасов и т. д. Схема таксономии признаков типовой ситуации продемонстрирована на рис. 2.

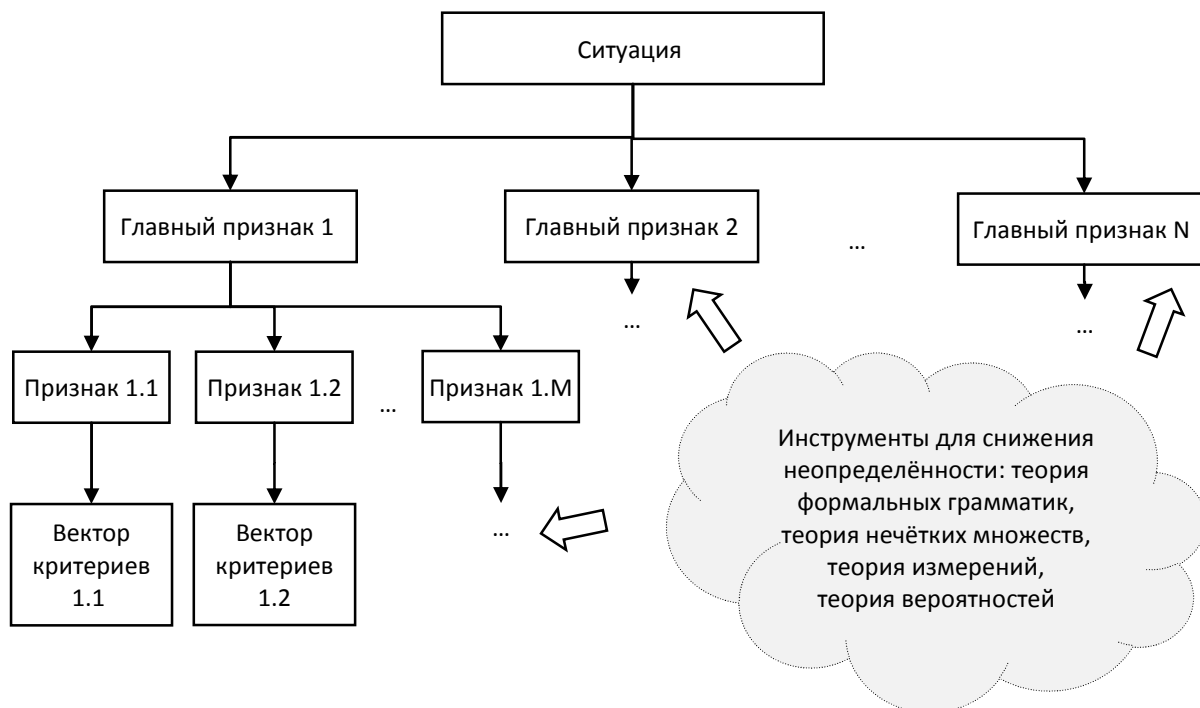


Рис. 2. Схема таксономии признаков типовой ситуации
Fig. 2. The taxonomy scheme of the characteristics of a typical situation

Концептуальным аспектам подхода к построению таксономий признаков типовой ситуации при её идентификации («узнавании») с учётом вероятности правильности определения каждого признака посвящена статья [15].

С целью формализации и дальнейшей алгоритмической реализации данной задачи может быть применён аналитический аппарат её описания на основе теории категорий множеств [6, 19]. Определим две категории объектов: N – «наблюдаемая ситуация» и T – «типовая ситуация». Для того чтобы ситуация N_j была идентифицирована как одна из известных T_i , необходимо обеспечить условия, при которых некоторая часть параметров объектов этой категории соответствовала параметрам объектов типовой ситуации. То есть речь идёт о мономорфизме объектов из T_i в N_j и определении функционального отношения $f: T_i \rightarrow N_j$, где внутренние характеристики типовой ситуации $t_x \in T_i$ и наблюдаемой ситуации $n_y \in N_j$ связаны композицией

$$n_y = z \circ t_x, \quad (1)$$

где z – некоторый искомый подобъект (морфизм), определяемый из множества отношений f , связывающий внутренние совпадающие характеристики объектов.

На основании проведённых исследований могут быть определены характеристики наблюдаемой ситуации и сделаны выводы о совпадении их части с типовой ситуацией. При этом долю совпадающих характеристик и степень совпадения следует определять и настраивать для каждой конкретной предметной области.

3. Метод системного поиска сценариев решения

Подбор сценария мероприятий по решению проблемы, связанной с ситуацией на объекте управления – задача поиска по характеристикам сценария, наилучшим образом удовлетворяющего той типовой ситуации, к которой наблюдаемое состояние было отнесено ранее.

В данном поиске возможно два исхода – один или несколько сценариев принятия решения уже ассоциированы с конкретным состоянием (набором параметров) типовой ситуации. Такое соответствие могло быть установлено в ходе предыдущих итераций поиска решений, и оно не требует каких-либо дополнительных средств для реализации, достаточно запустить цикл с перебором всех имеющихся в базе знаний ассоциаций. Второй исход – отсутствие в базе знаний ассоциированной с конкретным состоянием типовой ситуации сценария принятия решений.

При большой выборке данных о состояниях типовой ситуации и их связях со сценариями принятия решений можно применять методы корреляционно-регрессионного анализа [17]. Проблема в том, что на большой выборке все возможные сценарии решений, скорее всего, уже будут обнаружены и ассоциированы с конкретными состояниями типовой ситуации. Поэтому наибольший интерес представляют возможности по принятию решений при наличии относительно небольшого объёма данных. В таком случае, учитывая гетероскедастичность рассматриваемых параметров ситуации, возможно использование корреляционного анализа на малых выборках, например, рангового коэффициента корреляции Спирмена [8].

Действительно, если признаки типовой ситуации, на основании анализа которых принимается решение о соответствии сценария этой ситуации, рассмотреть, как анализируемые параметры, то разность этих параметров с параметрами, которые соответствуют некоторому сценарию, можно представить в виде параметра D в выражении для поиска коэффициента корреляции Спирмена (ρ). Если принять за n число анализируемых параметров, то коэффициент корреляции можно определить по известной формуле

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n(n^2 - 1)}. \quad (2)$$

Теперь, перебирая в цикле все состояния типовых ситуаций и состояния сценариев решений, можно определять наличие или отсутствие корреляции, а значит и отбирать некоторые сценарии идентифицированной ситуации с целью представления в виде варианта решения для ЛПР.

При решении задач при неполной и, возможно, не вполне объективной информации необходимо воспользоваться методами теории нечётких множеств, что планируется в рамках другой статьи. В следующей главе рассмотрен пример метода для формирования оценки вероятности, при которой выбранный сценарий приемлем для решения выявленной проблемы.

4. Квалиметрическая методика прогнозной оценки результативности выбранного сценария

При выполнении двух условий – наличии в базе знаний достаточного объёма информации относительно того, какие решения принимались в данной ситуации ранее и наличии достаточной уверенности в этой информации – появляется возможность использования квалиметрических методов обработки информации [1, 5], обеспечивающих формирование прогнозов относительно выбранного сценария решения. Можно предложить методику, основанную на прогнозной квалиметрической модели, которая формируется как средневзвешенное от показателей, категоризованных по выбранным аспектам на основе сведений о базовых элементах (функции, ресурсы, правила и цели). Причём под целью здесь понимается некоторая ситуация, в которой показатель уверенности в решении поставленной задачи (устранении проблемы) равен 1 (100 %), либо около данного значения.

Для построения системы оценки необходимо формирование частной квалиметрии для каждого сценария решения. Такая квалиметрия (Q) будет свёрткой из множества категорий (C), созданных на основе множеств базовых элементов типовой ситуации, т. е. множества функций (F), множества ресурсов (R), множества правил (N) и множества целей (G).

$$Q = f(C, F, R, N, G), \text{ причём } C = \langle F, R, N, G \rangle. \quad (3)$$

Методика предполагает:

1) выделение показателей, связанных с функциями (трудоемкость, сложность и т. д.), ресурсами (затраты во всех формах, инфраструктура, время, кадры и т. д.), правилами (нормативные, этические, физические и прочие ограничения), целями (степень реализации поставленной задачи, оцененная, например, в баллах);

2) взвешивание показателей на основе их значимости, определяемой по экспертным, частично объективным или полностью объективным критериям. Например, стоимость – абсолютно объективный критерий; затратность сильно зависит от вида учитываемого ресурса и способа учёта, поэтому является частично объективным, а критерий лояльности или современности могут оценивать только эксперты;

3) формирование правил свёртки показателей. На данном этапе обычно используют сложную свёртку, в которой используются промежуточные вычисления. Так, показатель «качество» может быть свёрткой от показателя «проверяемость», который сам может быть свёрткой от иных показателей. В сложной свёртке обнуление одного из интегральных показателей, на котором она построена, обычно истолковывается как обнуление и основного показателя. Например, если студент набрал по теоретической части оценку «хорошо», а по практической – «неудовлетворительно», то и суммарная оценка может быть «неудовлетворительно», поскольку полностью не выполнен один из базовых элементов программы обучения;

4) определение критериев, которые позволят автоматически формировать рекомендации для ЛПР по уровню соответствия рассматриваемого сценария целям;

5) оценку качества самой квалиметрии на основе специальных показателей.

Алгоритм реализации квалиметрической методики оценки приемлемости сценария решения показан на рис. 3.

Поскольку любая система оценки может быть скомпрометирована по причине недостаточного охвата оцениваемых характеристик или по причине низкого доверия к ней, то разумно ввести показатели для оценки этих показателей. Для оценки качества квалиметрии целесообразно применять показатель её полноты (P_f), определяющий степень покрытия показателями всех значимых свойств измеряемого объекта и показатель объективности квалиметрии (P_t), определяющий степень доверия к оценке, полученной в системе оценки.

Рассмотрим оцениваемый объект как совокупность свойств его элементов, как это показано на рис. 4.

Показатель полноты квалиметрии можно рассматривать как часть свойств объекта, выраженных в виде измеримых показателей, отнесённых ко всем известным свойствам. Поскольку различные свойства имеют разный вес для целей исследователя, то их следует взвесить. Построим аналитическое выражение для расчёта P_f .

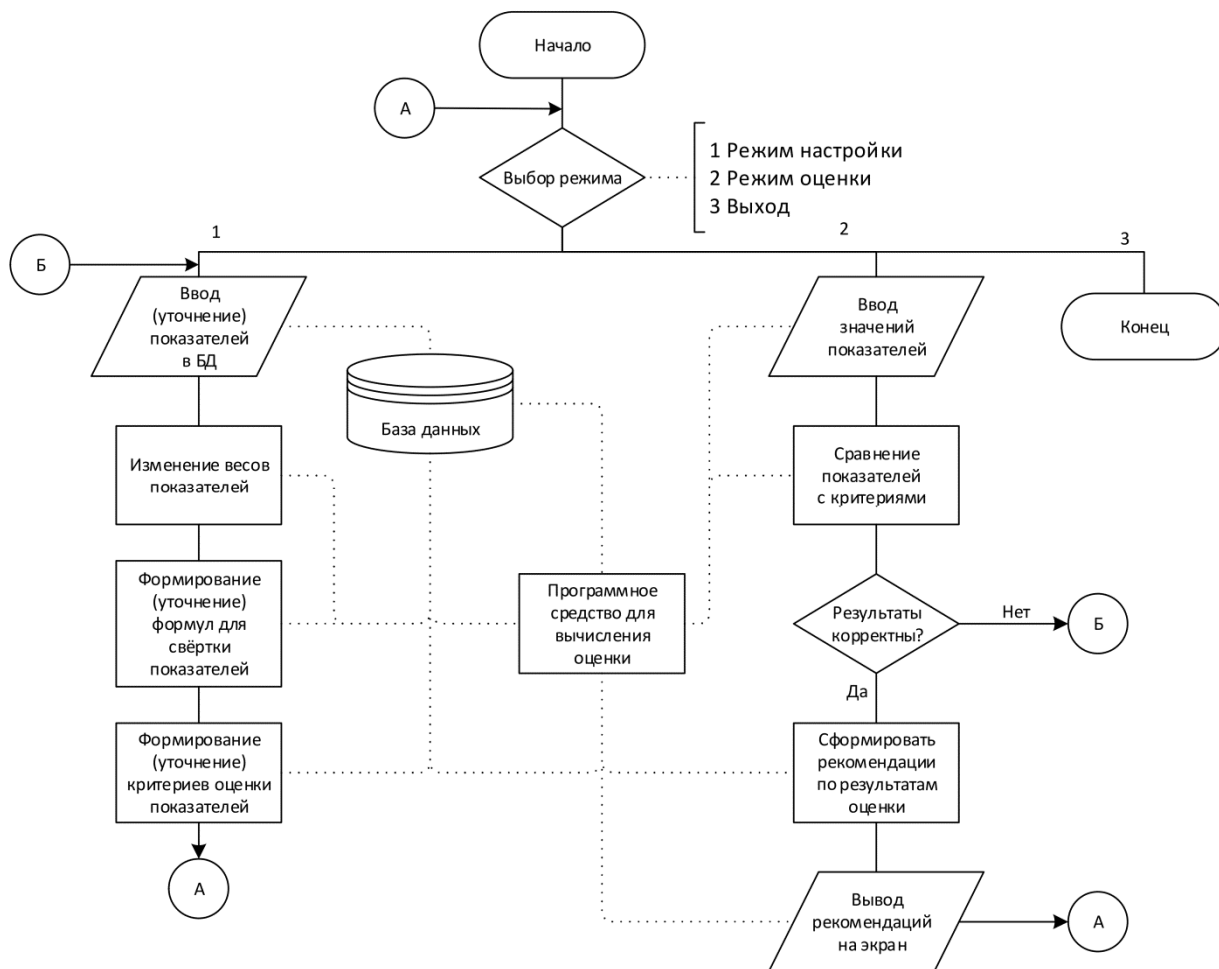


Рис. 3. Алгоритм реализации квалиметрического метода оценки приемлемости сценария решения
Fig. 3. Algorithm for the implementation of the qualimetric method for acceptability assessing of the solution scenario

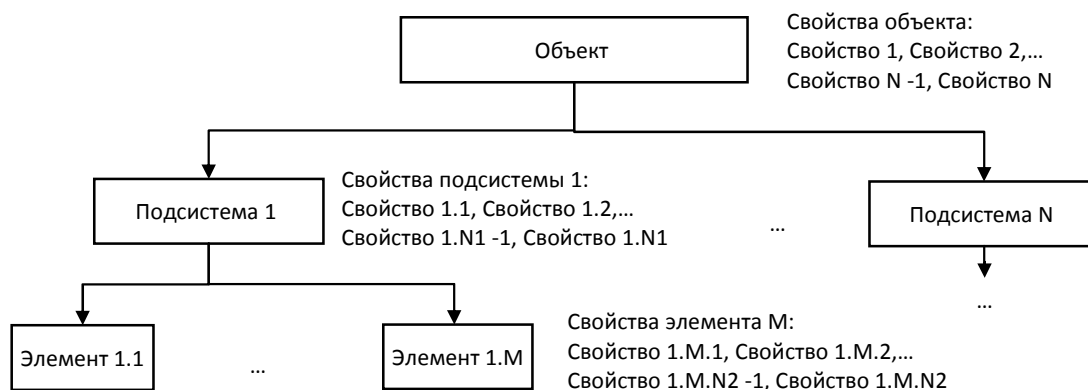


Рис. 4. Объект исследования как объект для оценки
Fig. 4. The object of research as an object for evaluation

Введём обозначения:

$P = \{p_1, \dots, p_m\}$ – множество измеряемых свойств, где m – количество таких свойств;

$P_m = \{p_{m1}, \dots, p_{mn}\}$ – множество всех свойств объекта исследования, где n – количество таких свойств.

Каждому свойству объекта исследования p_{mj} (и соответственно p_j) поставим в соответствие весовой коэффициент (коэффициент значимости) w_{mj} . Так как нас интересуют только измеряемые свойства, то каждому p_j будет соответствовать весовой коэффициент w_j .

Информатика и вычислительная техника

Множество таких весовых коэффициентов $W_m = \{w_{m1}, \dots, w_{mn}\}$ может быть принято в качестве цифрового эквивалента множества всех свойств объекта исследования.

Введем обозначение:

$W = \{w_1, \dots, w_m\}$ – множество весовых коэффициентов цифрового эквивалента всех измеряемых свойств объекта исследования. Очевидно, что $W \subseteq W_m$ и $P \subseteq P_m$.

Тогда выражение для расчёта показателя полноты квалиметрии примет вид

$$P_f = \frac{\sum_{j=1}^m w_j}{P_{\max}}, \quad (4)$$

где P_{\max} – сумма весовых коэффициентов цифрового эквивалента множества всех свойств объекта исследования, вычисляемое по аналогичной формуле

$$P_{\max} = \sum_{j=1}^n w_{mj}, \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в формулу (4), получим следующее:

$$P_f = \frac{\sum_{j=1}^m w_j}{\sum_{j=1}^n w_{mj}} \quad (6)$$

Таким образом, полнота квалиметрии определяется отношением числа измеряемых к общему числу показателей по каждому весу. Отбрасывание показателей с низкими весами оправдано, если показатель полноты не уменьшается до значений меньше 0,9.

Кроме того, показатель полноты может показывать, что некоторые характеристики объекта не измеряются вследствие особенностей их природы, сложности получения данных, низкого доверия к данным и т. д. В этом случае возможно $P_f < 0,9$, но тогда ЛПП должен принять риски подобного метода измерения.

Показатель объективности квалиметрии демонстрирует оценку уровня доверия к ней. Если составить шкалу экспертной оценки уровня объективности показателей, (например, от 0,1 до 1 с шагом равным 0,1), то объективность квалиметрии (P_t) можно определить как отношение суммы баллов по этой шкале за все показатели (S_w) к числу показателей (N_{\max}):

$$P_t = \frac{S_w}{N_{\max}}. \quad (7)$$

Пример таблицы весов для определения показателя объективности квалиметрии показан в табл. 1.

Таблица весов показателей объективности квалиметрии

Таблица 1

Table 1

Table of indicators weights of qualimetry objectivity

Тип веса	Подкатегория	Условие выбора	Балл
Объективные	Достоверные	Измерение, известная константа, прямой подсчёт	1
	Достаточно достоверные	Измерение с высокой погрешностью, затруднённый подсчёт	0,9
Групповые экспертные	Достаточно достоверные	Перепроверенная оценка, рассчитанная по общеизвестной методике на основе объективных показателей	0,9
	Высокого доверия	Перепроверенная оценка, сделанная по общеизвестной методике группой авторитетных экспертов	0,8
	Достаточно высокого доверия	Оценка, сделанная по общеизвестной методике группой авторитетных экспертов	0,7
	Доверия выше среднего	Оценка, сделанная по общеизвестной методике авторитетным экспертом	0,6
	Среднего доверия	Оценка, сделанная на основе классических экспертных методов группой авторитетных экспертов	0,5
	Невысокого доверия	Оценка, сделанная на основе классических экспертных методов группой экспертов среднего доверия	0,4
	Достаточно низкого доверия	Оценка, сделанная на основе классических экспертных методов группой экспертов, доверие к которым низко или неопределенно	0,3

Окончание табл. 1

Тип веса	Подкатегория	Условие выбора	Балл
Субъективные	Достаточно низкого доверия	Подтверждаемая другими оценка, сделанная авторитетным экспертом на основе опыта и логики	0,3
	Низкого доверия	Неподтверждённая оценка, сделанная авторитетным экспертом на основе опыта и логики	0,2
	Малополезные	Неподтверждённая оценка, сделанная заслуживающим доверия экспертом на основе опыта и логики	0,1
	Некорректные	Неподтверждённая оценка, сделанная неизвестным экспертом на основе опыта и логики	0

5. Пример принятия решений на основе данных интеллектуальной подсистемы системы поддержки принятия решений

Для демонстрации работоспособности предложенного метода приведён небольшой пример. Пусть ЛПР решает задачу покупки компьютера для рабочего места специалиста по закупкам. Система поддержки принятия решений идентифицировала ситуацию как «закупка оборудования для рабочего места специалиста» и обнаружила для такой типовой ситуации следующие сценарии решений:

- 1) отказаться от покупки;
- 2) закупить наиболее дешёвый вариант на рынке (типовая комплектация 1);
- 3) закупить продвинутый вариант с расширенными коммуникационными компонентами (типовая комплектация 2);
- 4) закупить брендовый ноутбук от известной фирмы (типовая комплектация 3);
- 5) проконсультироваться с экспертом в отделе информационных технологий для формирования нового сценария.

Каждый из вариантов характеризуется некоторыми значениями множеств F, R, N, G , которые известны. Рассмотрена таблица со значениями данных показателей (табл. 2):

Таблица 2

Пример нормирования вариантов решения по параметрам

Table 2

An example of the normalization of solution options by parameters

Варианты	Функции (трудоемкость в баллах)	Ресурсы (время и фин. ресурсы в баллах)	Правила (ограничения в баллах)	Цели (степень реализации запроса в баллах)
1	-0,1	0	нет	0
2	-1	-1	нет	2
3	-1	-2	нет	6
4	-1	-3	нет	4
5	-1	0	нет	0

Если механически суммировать показатели, то победит стратегия 3. Однако очевидно, что результат сильно зависит от весов каждого из показателей, степени их учёта и финальной формулы свёртки. Очевидно, что в рассмотренном примере показатели P_f, P_t не будут очень высокими, поскольку расчёт был сделан на основе очень общих и поверхностных показателей. Тем не менее для любой подобной задачи можно, единожды настроив эти параметры, затем регулярно получать от системы поддержки вполне конкурентоспособные предложения. Понятно, что точность оценки будет обеспечена только на большом числе показателей, что предполагает автоматизацию процесса измерения.

Кроме того, следует учесть и опыт применения оценок. Для формирования представления о надёжности оценки вводится показатель «доверенность оценки», который является минимальным при её создании и растёт по мере констатации успешности её применения.

Важно отметить, что предложенный системный метод может быть корректно дополнен другими методами, позволяющими проводить подготовку каких-либо данных или формировать зна-

чения каких-либо показателей. Окончательную логику применения могут определить только предметная область и эксперт, который формирует систему.

Приведенные выше правила структурирования и формализации представления множества ситуаций, множества сценариев для их отношений, множества алгоритмов для вычисления параметров и др. в исследуемой предметной области могут быть реализованы в форме системной функциональной модели с вертикальной декомпозицией связей объектов по уровням (внешние связи) и горизонтальной декомпозицией по внутренним связям в объекте на метаязыках моделирования IDEF или UML с применением их CASE технологий или с применением BPMN систем [9, 13].

Заключение

В целом концепция создания системы поддержки принятия решений на основе интеллектуальной подсистемы в таких аспектах, как продвинутой человеко-машинный интерфейс и доступность ресурсов компьютерной системы, вполне укладывается в направление развития современных промышленных информационных технологий, известное как программа «Индустрия 4.0» [10].

В достаточно стабильном бизнес-процессе принятие решений осуществляется на основе опыта ЛПП. Однако для современного предприятия этот способ не всегда эффективен. Для решения проблемы используются интеллектуальные подходы, построенные на основе аналитики знаний. Исследования показали, что при реализации подходов к принятию решений необходимо решать следующие задачи: идентификация состояния (характеристик) ситуации, в которой находится объект управления, выбор нужного сценария решения (действия или алгоритма действия) и прогнозирование последствий принятого решения. Каждый из этих элементов процесса принятия решений реализуется специальными методами, которые позволяют снизить неопределённость принимаемого решения.

Таким образом, можно заключить, что деятельность по принятию решений на основе накопленного опыта может быть улучшена за счёт использования предложенных методов. Для этого потребуются цифровизация деятельности ЛПП и внедрение системы поддержки принятия решений с интеллектуальной компонентой.

В дальнейшем планируется интеграция рассмотренных методов в рамках общей концепции принятия решений с методами, применяемыми для принятия решений в существенно неопределённых ситуациях и в ситуациях, сильно зависящих от субъективных оценок ЛПП.

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. Азгальдов, Г.Г. *Квалиметрия для всех: учеб. пособие* / Г.Г. Азгальдов, А.В. Костин, В.В. Садовов. – М.: ИнформЗнание, 2012. – 165 с.
2. Антонов, В.В. *Интеллектуальный метод поддержки принятия решений в типовой ситуации* / В.В. Антонов, К.А. Конев // *Онтология проектирования*. – 2021. – Т. 11, № 1 (39). – С. 126–136. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005. *Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем*. – М.: Стандартинформ, 2006. – 57 с.
4. *Интеллектуальное ядро системы поддержки принятия решений* / В.П. Осипов и др. // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. – 2018. – № 205. – 23 с.
5. *Квалиметрия в машиностроении: учеб.* / Р.М. Хвастунов [и др.]. – М.: Экзамен, 2009. – 285 с.
6. Ковалёв, С.П. *Методы теории категорий в модельно-ориентированной системной инженерии* / С.П. Ковалёв // *Информатика и ее применения*. – 2017. – Т. 11, № 3. – С. 42–50.
7. Конев, К.А. *Принятие решений на основе онтологической модели учебной дисциплины* / К.А. Конев // *Информатизация образования и науки*. – 2020. – № 4 (48). – С. 124–134.
8. Кошелева, Н.Н. *Корреляционный анализ и его применение для подсчета ранговой корреляции Спирмена* / Н.Н. Кошелева // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. – 2012. – № 5. – С. 23–26.

9. Методология проектирования системных моделей рабочих процессов с применением предметно-ориентированных метаязыков / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов, А.С. Маврина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 45–55. DOI: 10.14529/ctcr200205
10. Минчичова, В. Россия в Индустрии 4.0 / В. Минчичова // Молодой учёный. – 2020. – № 24 (314). – С. 196–198.
11. Орлов, А.И. Прикладная статистика: учеб. / А.И. Орлов. – М.: Экзамен, 2004. – 656 с.
12. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства «вуз – предприятие») / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов и др. // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т. 23, № 4 (86). – С. 154–160.
13. Разработка формальной модели производственного процесса для организации проектного и производственного менеджмента с применением интеллектуальной КИС / А.В. Речкалов, Г.Г. Куликов, В.В. Антонов, А.В. Артюхов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 11. – С. 34–54.
14. Сандермоен, Ш. Организационная структура / Ш. Сандермоен. – М.: Альпина Диджитал, 2019. – 123 с.
15. Ситуационно-онтологическая методология принятия решений на примере бизнес-процессов авиаприборостроительного предприятия / В.В. Антонов, К.А. Конев, В.А. Суворова, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 102–115. DOI: 10.14529/ctcr210110
16. Скворцов, А.К. У истоков систематики. К 300-летию Карла Линнея / А.К. Скворцов // Природа: журн. – 2007. – № 4. – С. 3–10.
17. Соколов, Г.А. Введение в регрессионный анализ и планирование регрессионных экспериментов в экономике / Г.А. Соколов. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 109 с.
18. Черняк, В.З. Методы принятия управленческих решений: учеб. / В.З. Черняк. – М.: Academia, 2019. – 296 с.
19. Abramsky, S. Introduction to Categories and Categorical Logic / S. Abramsky, N. Tzevelekos // New Structures for Physics. Part of the Lecture Notes in Physics Book Series (LNP, vol. 813). – 2011. – P. 3–94.
20. Brockmann, E.N. Tacit knowledge and strategic decision making / E.N. Brockmann, W.P. Anthony // Group & Organization Management. – 2016. – Vol. 27 (4). – P. 436–455.
21. Duan, Y. Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda / Y. Duan, J.S. Edwards, Y.K. Dwivedi // International Journal of Information Management. – 2019. – Vol. 48. – P. 63–71.
22. Tariq, A. Intelligent Decision Support Systems – A Framework / A. Tariq, Kh. Rafi // Information and Knowledge Management (Online). – 2012. – Vol. 2, no. 6. – P. 12–19.

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.

Куликов Григорий Геннадьевич, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния» холдинга «Технодинамика», г. Уфа; grigmolnija@gmail.com.

Поступила в редакцию 24 июня 2021 г.

TRANSFORMATION OF THE DECISION SUPPORT SYSTEM MODEL FOR STANDARD SITUATIONS USING INTELLECTUAL AND ANALYTICAL METHODS

V.V. Antonov¹, antonov.v@bashkortostan.ru,
K.A. Konev¹, sireo@rambler.ru,
G.G. Kulikov², grigmolniya@gmail.com

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

² JSC "Ufa Scientific and Production Enterprise "Molniya" of the Holding "Tekhnodinamika", Ufa, Russian Federation

The article discusses the issues of improving the efficiency of decision support activities on a relatively large amount of information. The research relevance is associated with the increasing complexity of control objects, which leads to a decrease in the efficiency of decision-making based on the personal experience of decision-makers, up to complete impossibility. The purpose of the article is to analyze the problems faced by decision-makers and the creation of methods to improve the effectiveness of decision-making in typical situations. The article examines the main components of the intelligent subsystem of the decision support system, which require the use of analytical tools, and also forms the methods interaction structure necessary for the effective formation of scenarios of information support for decision making. To achieve the goals, a decision support method based on an intelligent component was used, which is aimed at creating an effective infrastructure to support decision-making; methods of identification and categorization, designed to implement the most accurate and correct comparison of the characteristics (state) of the observed situation and the characteristics of a typical situation stored in the knowledge base; correlation methods aimed at finding dependencies between the characteristics of situations and scenarios to solve problems associated with these situations; a method for constructing subject qualimetry, used to form a predictive model to assess the degree of compliance of the selected scenario for solving the current situation. As a result, it was determined that an important aspect of decision-making in typical situations is the most accurate identification of the state of the situation, the choice of the best scenario for implementing the solution for this situation and the analysis of the consequences of the selected set of measures. To solve these problems, a method for identifying a situation, a method for finding solution scenarios and a qualimetric method for predicting the effectiveness of the selected scenario have been formed. The article concludes that decision-making activities based on the accumulated experience can be improved by using the proposed methods and implementing a decision support system with an intelligent component.

Keywords: decision making, intelligent subsystem of the decision support system, identification of the situation, search for scenarios, qualimetric model.

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. Azgaldov G.G. Kostin A.V., Sadovov V.V. *Kvalimetriya dlya vseh: uchebnoye posobiye* [Qualimetry for all: a tutorial]. Moscow, InformZnanie Publ., 2012. 165 p.
2. Antonov V.V., Konev K.A. [Intellectual method of decision-making support in a typical situation]. *Ontology of design*, 2021, vol. 11, no. 1 (39), pp. 126–136. (in Russ.) DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136
3. *GOST R ISO/IEC 15288–2005. Informatsionnaya tekhnologiya. Sistemnaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla sistem* [Federal standard R ISO/IEC 15288–2002. Information technology. System engineering. The process of the systems life cycle]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 57 p.
4. Osipov V.P. et al. *Intellektualnoye yadro sistemy podderzhki prinyatiya resheniy*. [The intellectual core of the decision support system]. *Preprints of the M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics*, 2018, no. 205. 23 p.
5. Khvastunov R.M. et al. *Kvalimetriya v mashinostroyenii: ucheb.* [Qualimetry in mechanical engineering: textbook]. Moscow, Ekzamen Publ., 2009. 285 p.

6. Kovalev S.P. [Methods of category theory in model-oriented systems engineering]. *Informatics and its applications*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 42–50. (in Russ.)
7. Konev K.A. [Decision-making based on the ontological model of an academic discipline]. *Informatization of education and science*, 2020, no. 4 (48), pp. 124–134. (in Russ.)
8. Kosheleva N.N. [Correlation analysis and its application for calculating Spearman's rank correlation]. *Actual problems of the humanities and natural sciences*, 2012, no. 5, pp. 23–26. (in Russ.)
9. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S. Design Methodology System Models of Workflows Using Subject-Oriented Metalanguages. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 45–55. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200205
10. Minchichova V. [Russia in Industry 4.0]. *Young Scientist*, 2020, no. 24 (314), pp. 196–198. (in Russ.)
11. Orlov A.I. *Prikladnaya statistika: uchebnik* [Applied statistics. Textbook]. Moscow, Ekzamen Publ., 2004. 656 p.
12. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A. [Approach to the application of the concept of digital twins for the transformation of a corporate information system to the requirements of INDUSTRY 4.0 (on the basis of the creation of the union information space “university – enterprise”)]. *Bulletin of USATU*, 2019, vol. 23, no. 4 (86), pp. 154–160. (in Russ.)
13. Rechkalov A.V., Kulikov G.G., Antonov V.V., Artyukhov A.V. [Development of a formal model of the production process for organizing project and production management using intellectual KIS]. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2014, no. 11, pp. 34–54. (in Russ.)
14. Sandermoen S. *Organizatsionnaya struktura* [Organizational structure]. Moscow, Alpina Digital Publ., 2019. 123 p.
15. 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
16. Skvortsov A.K. [At the origins of taxonomy. To the 300th anniversary of Karl Linnaeus]. *Nature: journal*, 2007, no. 4, pp. 3–10. (in Russ.)
17. Sokolov G.A. *Vvedeniye v regressionnyy analiz i planirovaniye regressionnykh eksperimentov v ekonomike*. [Introduction to regression analysis and planning of regression experiments in economics]. Moscow, INFRA-M Publ., 2017. 109 p.
18. Chernyak V.Z. *Metody prinyatiya upravlencheskikh resheniy: ucheb.* [Methods for making managerial decisions. Textbook]. Moscow, Academia Publ., 2019. 296 p.
19. Abramsky S., Tzevelekos N. Introduction to Categories and Categorical Logic. *New Structures for Physics, Part of the Lecture Notes in Physics book series* (LNP, vol. 813), 2011, pp. 3–94.
20. Brockmann E.N., Anthony W.P. Tacit knowledge and strategic decision making. *Group & Organization Management*, 2016, vol. 27 (4), pp. 436–455.
21. Duan Y., Edwards J.S., Dwivedi, Y.K. Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda. *International Journal of Information Management*, 2019, vol. 48, pp. 63–71.
22. Tariq Ahmad, Rafi Khan. [Intelligent Decision Support Systems - A Framework]. *Information and Knowledge Management (Online)*, 2012, vol. 2, no. 6, pp. 12–19.

Received 24 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Антонов, В.В. Трансформация модели системы поддержки принятия решений для типовых ситуаций с применением интеллектуальных и аналитических методов / В.В. Антонов, К.А. Конев, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 14–25. DOI: 10.14529/ctcr210302

FOR CITATION

Antonov V.V., Konev K.A., Kulikov G.G. Transformation of the Decision Support System Model for Standard Situations Using Intellectual and Analytical Methods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 14–25. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210302

DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR CHOOSING THE BEST TIME SERIES MODELS AND NEURAL NETWORKS TO PREDICT COVID-19 CASES

M.S.A. Abotaleb, abotalebmostafa@yandex.ru,

T.A. Makarovskikh, Makarovskikh.T.A@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Time series analysis became one of the most investigated fields of knowledge during spreading of the COVID-19 around the world. The problem of modeling and forecasting infection cases of COVID-19, deaths, recoveries and other parameters is still urgent. **Purpose of the study.** Our article is devoted to investigation of classical statistical and neural network models that can be used for forecasting COVID-19 cases. **Materials and methods.** We discuss neural network model NNAR, compare it with linear and nonlinear models (BATS, TBATS, Holt's linear trend, ARIMA, classical epidemiological SIR model). In our article we discuss the EpeMEDIC.Network algorithm using the R programming language. This algorithm takes the time series as input data and chooses the best model from SIR, statistical models and neural network model. The model selection criterion is the MAPE error. We consider the implementation of our algorithm for analysis of time series for COVID -19 spreading in Chelyabinsk region, and predicting the possible peak of the third wave using three possible scenarios. We mention that the considered algorithm can work for any time series, not only for epidemiological ones. **Results.** The developed algorithm helped to identify the pattern of COVID -19 infection for Chelyabinsk region using the models realized as parts of the considered algorithm. It should be noted that the considered models make it possible to form short-term forecasts with sufficient accuracy. We show that the increase in the number of neurons led to increasing accuracy, as there are other cases where the error is reduced in case of reducing the number of neurons, and this depends on COVID -19 infection spreading pattern. **Conclusion.** Hence, to get a very accurate forecast, we recommend re-running the algorithm weekly. For medium-range forecasting, only the NNAR model can be used from among those considered but it also allows to get good forecasts only with horizon 1–2 weeks.

Keywords: BATS, TBATS, ARIMA, Holt's Linear Trend Model, SIR Model, NNAR, COVID-19, Forecasting.

Introduction

COVID-19 is one of the most serious problems facing the entire world today. In this article, we consider methods for predicting the spread of COVID-19 (cases of infection, death, and recovery) in the Chelyabinsk region, using time series analysis models and NNAR neural networks. On March 21, 2020, the virus began to spread in a pattern that resulted in millions of infections in less than a year. Most of the deaths from this virus occur among the elderly and people with chronic heart disease, which is the leading cause of death even in developed countries [1]. Recently, a lot of studies have been published on forecasting the number of cases of COVID-19, both worldwide and in individual states and regions. These studies used mainly the ARIMA model, Holt's linear trend model, and the SIR state transition model. There are also studies devoted to the comparison of the work of the models, for example, in [2] it is shown that the linear Holt model is better than the ARIMA model for the states considered in it. In our article, we will investigate the performance of these models and provide an analysis of the errors of the forecasts obtained.

Given the similarity of the characteristics of the models in the United States and Italy, it was suggested in [3] that the corresponding forecasting tools can be applied to other countries fighting the COVID-19 pandemic, as well as to any pandemics that may arise in the future. However, a general principle for choosing models for predicting the spread of COVID-19 has not yet been formulated. Moreover, for different states and different conditions of the spread of the epidemic, it is advisable to build a forecast using different models. For example, in [4], it was shown that the LSTM model had consistently the lowest rates of forecast errors for tracking the dynamics of infection cases in the four

countries considered. There are also studies that show that the ARIMA model and cubic smoothing spline models had lower forecast errors and narrower forecast intervals compared to Holt and TBATS models.

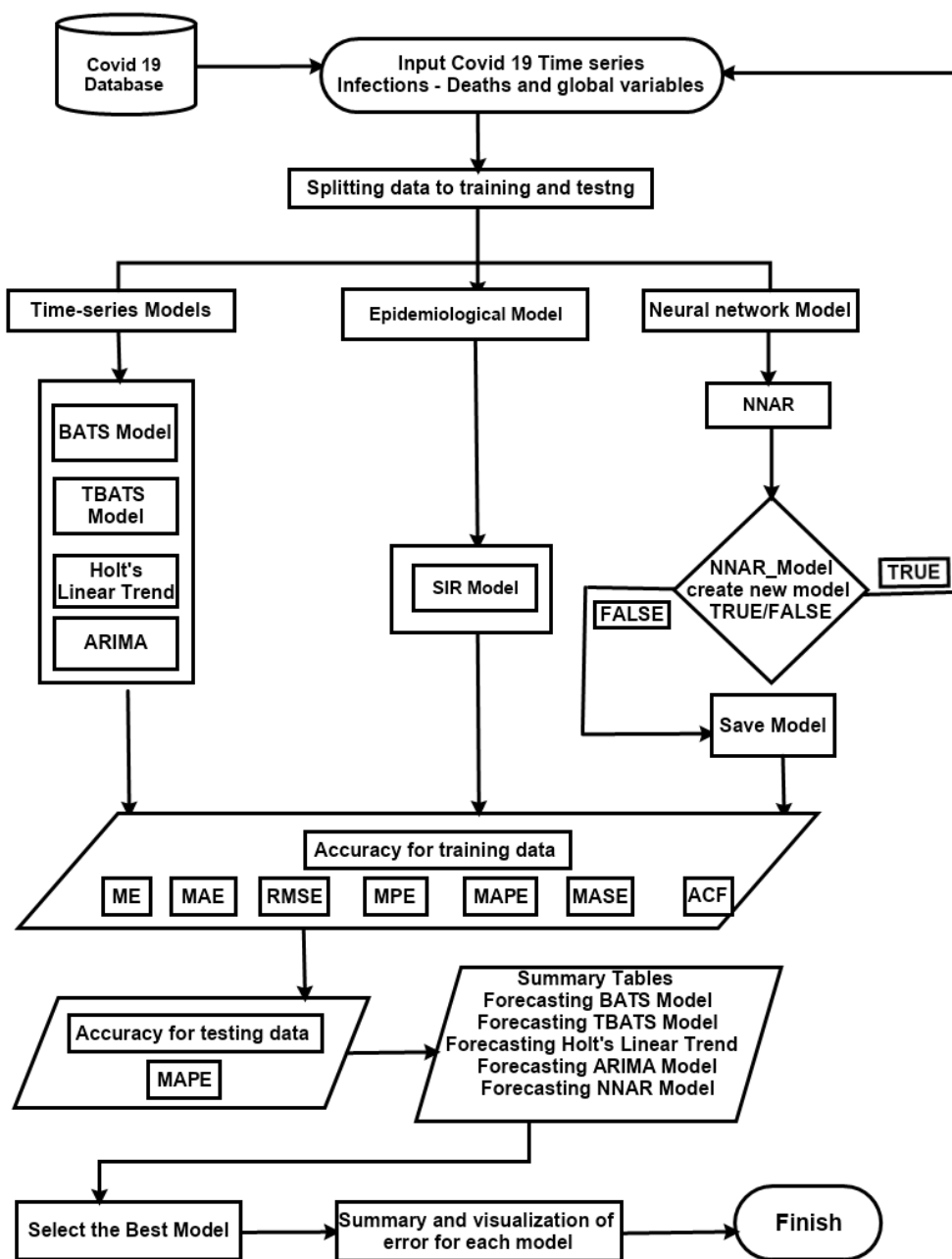


Fig. 1. Scheme of Algorithm Epidemic. Network selecting the best model for predicting COVID-19 cases

The results obtained cannot be generalized to all countries affected by the COVID-19 pandemic due to different patterns of the spread of the virus. As for the SIR model, even at the beginning of the pandemic, it was shown to be ineffective in predicting cases of coronavirus infection. For example, using this model, it was found that the peak of the second wave of infection cases in Pakistan should have occurred on August 25, 2020, however, in fact, the peak of infection in this country in December 2020 [5]. The “covid19. Analytics” package, developed in the R language, has the same drawbacks. This is evidenced by the results of the SIR model and the prediction of the time of occurrence of the second (and subsequent) wave cycles. In Fig. 1 we show the scheme of the developed software module, which allows you to choose the best model with the available initial data. For the experiment, the Yandex dataset [6] was used on infections, deaths, and hospital discharge from March 12, 2020, to April 09, 2021. Let's

consider the models used in this algorithm. All models are subdivided into three categories: (1) time series analysis models; (2) neural network models; (3) epidemiological models. One of the first papers [7] was devoted to the simulation of the COVID-19 in the Isfahan province of Iran for the period from Feb 14th to April 11th, 2020. The authors of this paper forecasted the remaining infectious cases with three scenarios that differed in terms of the stringency level of social distancing. Despite the prediction of infectious cases in short-term intervals, the constructed SIR model was unable to forecast the actual spread and pattern of the epidemic in the long term. Remarkably, most of the published SIR models developed to predict COVID-19 for other communities suffered from the same conformity. The SIR models are based on assumptions that seem not to be true in the case of the COVID-19 epidemic. Hence, more sophisticated modeling strategies and detailed knowledge of the biomedical and epidemiological aspects of the disease are needed to forecast the pandemic

1. Time Series Analysis Models

1.1. BATS u TBATS Models

The TBATS model is a state-space trigonometric exponential smoothing model with Box-Cox transform, ARMA errors, trends, and seasonal components called the TBATS model, which is used to analyze univariate time series models and was developed by De Livera et al. [8]. A figure of the functioning of these models is shown in Fig. 2. The main difference between the TBATS model and the BATS model is the ability to forecast with variable seasonality.

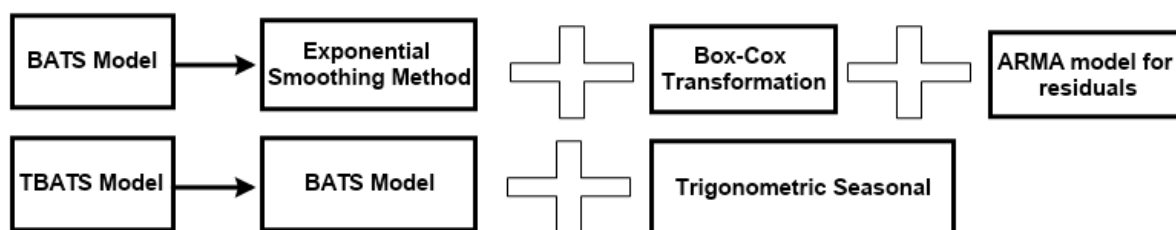


Fig. 2. Scheme of the BATS and TBATS models

The main advantage of these models is the ability to use multiple seasonality. Nevertheless, in some cases, the use of these models is not advisable, since the results of the same order of accuracy can be obtained by other methods that are less demanding on computational resources.

1.2. Linear Holt model

Adaptive exponential smoothing models are a fairly popular tool for predicting the spread of coronavirus infection. These models also served as a general tool for making time-series projections corresponding to the development of the epidemic in different countries [2, 9, 10]. True, the main drawback of most of the studies presented is the lack of an explanation for the choice of the corresponding model specification, as well as the lack of an “explanation” for the choice of model hyperparameters [9]. We also note the article [2], which shows that the exponential smoothing model for the time series under consideration gives more accurate results than the ARIMA model. The Holt-Winters model does not really explain in any way the nature of the epidemic and focuses exclusively on the data itself. Thus, in this model, we can note the phenomenon of insignificant seven-day cyclicity, associated primarily not with the true development of the infectious process, but with the work schedule of individual medical services (testing laboratories, as well as administrative services) [9].

1.3. ARIMA model

The ARIMA model consists of three components [11]: (1) AR (autoregressive term) – refers to past values used to predict the next value; determined by the parameter p in the autoregressive model; (2) MA (Moving Average) – used to determine the number of past forecast errors used to predict future values; determined by the q parameter obtained from the ACF (auto-correlation function); I (integrating term) – if the series is not stationary, then its difference of order d is found, which is a stationary series. To check the stationarity of the series, the extended Dickey-Fuller, Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) test is used. The same tests allow determining the parameter d of the model.

In [11], it is shown that the parameters of the model predicting the spread of COVID-19 are different for different regions of the Russian Federation (and states), in addition, the parameters of the model change over time. The paper considers the possibility of automatic selection of parameters of the ARIMA model for time series corresponding to the same process occurring in different conditions.

2. Neural network model with autoregressive

One of the model prediction methods is an artificial neural network, based on simple mathematical models of the brain and allowing to establish the relationship between the response variable and its predictors, which is a complex nonlinear relationship.

In this work, we used a linear autoregressive model with delay, which we will call the NNAR model. To predict cases of COVID -19 in the Chelyabinsk region, the NNAR model (6.5) was used, which is a neural network with the last observation. The vector y_{t-1} is used as input to predict the output of y_t and with five neurons in the hidden layer (Fig. 3).

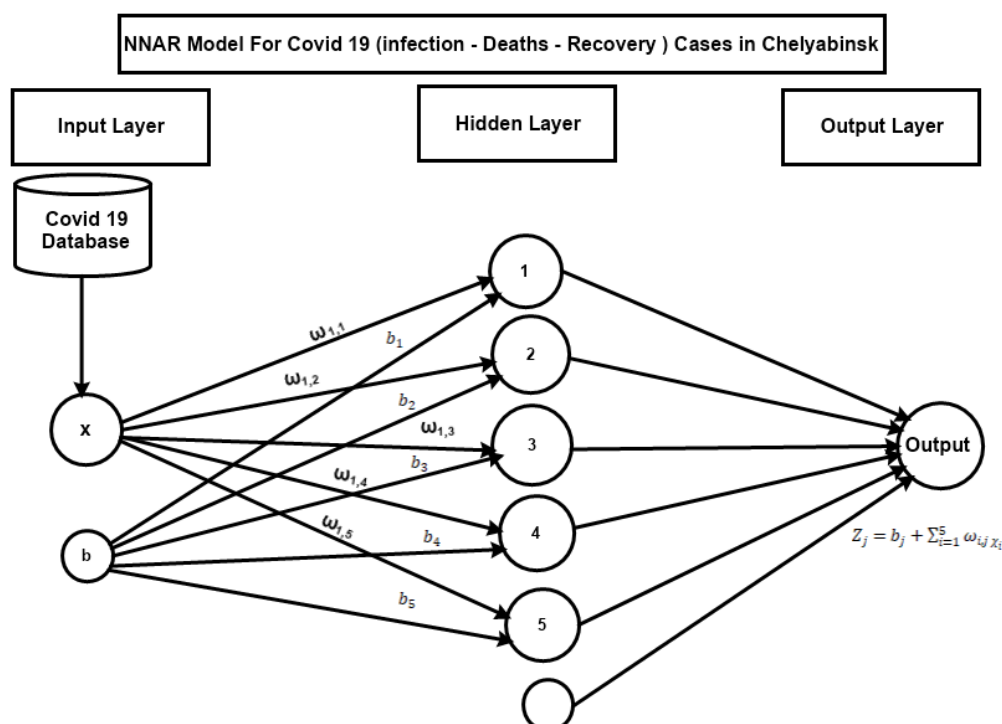


Fig. 3. NNAR model for predicting COVID-19 cases in Chelyabinsk

We have two types of neural networks: simple and multi-level feed-forward network. A simple neural network, which has no hidden layer and is equivalent to linear regression in this type, has coefficients attached to predictors that cause weights and the prediction obtained by a linear combination of input data and weights are chosen using a training algorithm that can minimize a “Cost Function” such as MSE, so in this type of neural network, linear regression is an efficient method for training a model.

The second type of neural networks, called feed-forward layered network, In this type, the inputs of each node from the previous levels, and the outputs of the nodes in one layer are the inputs in the next layer, and there is a combination between the inputs of each node and a weighted linear combination, and there is also non-linear function for modified results before output, open neurons j are combined linearly to give $Z_j = b_j + \sum_{i=1}^5 \omega_{ij} x_i$. For example, a sigmoid nonlinear function that is used to change in a hidden layer $S(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$ parameters $b_1, b_2, b_3, b_4,$ and b_5 and $\omega_{1,1}, \omega_{1,2}, \omega_{1,3}, \omega_{1,4},$ and $\omega_{1,5}$ “Learned” from the data. Weights are often limited to keep them from getting too large. The weight limiting parameter is known as the “decay parameter” and is often set to 0.1. First, the weights are randomized and then updated using the observed data. Therefore, there is an element of randomness in the predictions made by the neural network. Therefore, the network is usually trained multiple times using different random starting points, and the results are averaged.

Neural network with autoregressive (NNAR) lagged value in time series data that is used for input into neural networks, so we used lagging in linear autoregressive model, which we can call this NNAR model, which means neural network autoregressive model in our implementation for prediction the third wave of COVID-19 in Chelyabinsk, we used the NNAR model (6,5) for the first scenario and NNAR (6,10) for the second scenario, that is, the model is a neural network with the last observation. y_{t-1} is used as input to predict the output y_t and with five neurons in the hidden layer.

3. Epidemiological SIR Model

Epidemiological models such as SIR (susceptible, infected, recovered), and their many variants describe the density of infected people I using a typical equation [12]. At the beginning of the spread of infection, the number of infected, and recovered people is much less than the number of susceptible ones, so we can approximate S with a constant. Using this approximation, we obtain a linear differential equation with constant coefficients, according to the solution of which the growth in the number of infected persons at the beginning of the epidemic is exponential, and then slows down as the number of susceptible to infection decreases.

However, the classical SIR model does not provide a high quality of the obtained forecasts [5, 13, 14] due to differences in the algorithms for choosing its parameters. In [5], the work with an extension for the R language called covid19.analytics is described in detail. In [15], a model is used that provides a complete picture of the spread of COVID-19 anywhere in the world. The author of this package claims to do this by accessing, and retrieving data publicly available, and published from two main sources. The package also provides basic analysis and visualization tools and functions for exploring these and other similarly structured datasets. The main disadvantage of this package at the moment is the use of exclusively the classical SIR model for forecasting, which gives a very large error. However, in reality, effective (and not so) measures to contain the epidemic (quarantines, restriction of activities and movement, the use of masks, etc.) are developed and practiced everywhere, which affects the change in the trajectory of the epidemic and, as a result, leads to the fact that the coefficients of such a model become variable. In the article [9], the authors retain the coefficients of the model based on the newly obtained data, which is justified for obtaining short-term forecasts (up to 10 days) with high accuracy. The reason for the lack of accuracy of the model lies in the fact that one of the most important assumptions of this model is to divide the population into three homogeneous groups, and therefore this model is not suitable for the example of clearly heterogeneous societies. During the year of the pandemic, it became clear that these models give the best results for long-term forecasting (more than 7 days).

Software implementation of the considered algorithms

The considered models BATS, TBATS, the linear Holt model, ARIMA, SIR, and the neural network model NNAR were implemented using the R language. The results of computational experiments are given in [16], and the source code of the algorithm is in [17]. Here are some of the results obtained using the developed algorithm.

Table 1

MAPE(%) for testing data by using BATS, TBATS, Holt linear trend, ARIMA, SIR and NNAR for COVID-19 cases in Chelyabinsk Region (cumulative data)

Model		Infections	Deaths	Recoveries
		MAPE (%)	MAPE (%)	MAPE (%)
Time series models	BATS	0.037	0.256	1.361
	TBATS	0.041	0.238	0.514
	Holt	0.043	0.316	0.359
	ARIMA	0.041	0.281	0.689
Epidemiological model	SIR	4.98	–	–
Neural network model	NNAR (1,5)	0.458	4.577	5.367
Selected best model		BATS	TBATS	Holt

Table 1 shows the calculation of forecast errors for the period from 12, March 2020 to 9, April 2021 and testing last 7 days for cumulative daily infection cases, testing last 31 days for cumulative daily recovery cases, and the testing last 27 days for cumulative daily deaths cases in the Chelyabinsk region,

obtained using the considered models. Hence, it can be seen that the epidemiological and neural network models give an error that is 1–2 orders of magnitude higher than the time series analysis models.

Table 2

Forecasting peaks of infection waves in the Chelyabinsk region using the NNAR model

Wave	Model	Peak (forecast)	Peak (fact)
1	NNAR(2,50)	June, 23, 2020	June, 23, 2020
2	NNAR(6,50)	December, 19, 2020	December, 19, 2020
3	The first scenario NNAR (6,5)	June, 21, 2021	Unknown
3	The Third scenario NNAR (19,15)	July, 18, 2021	Unknown

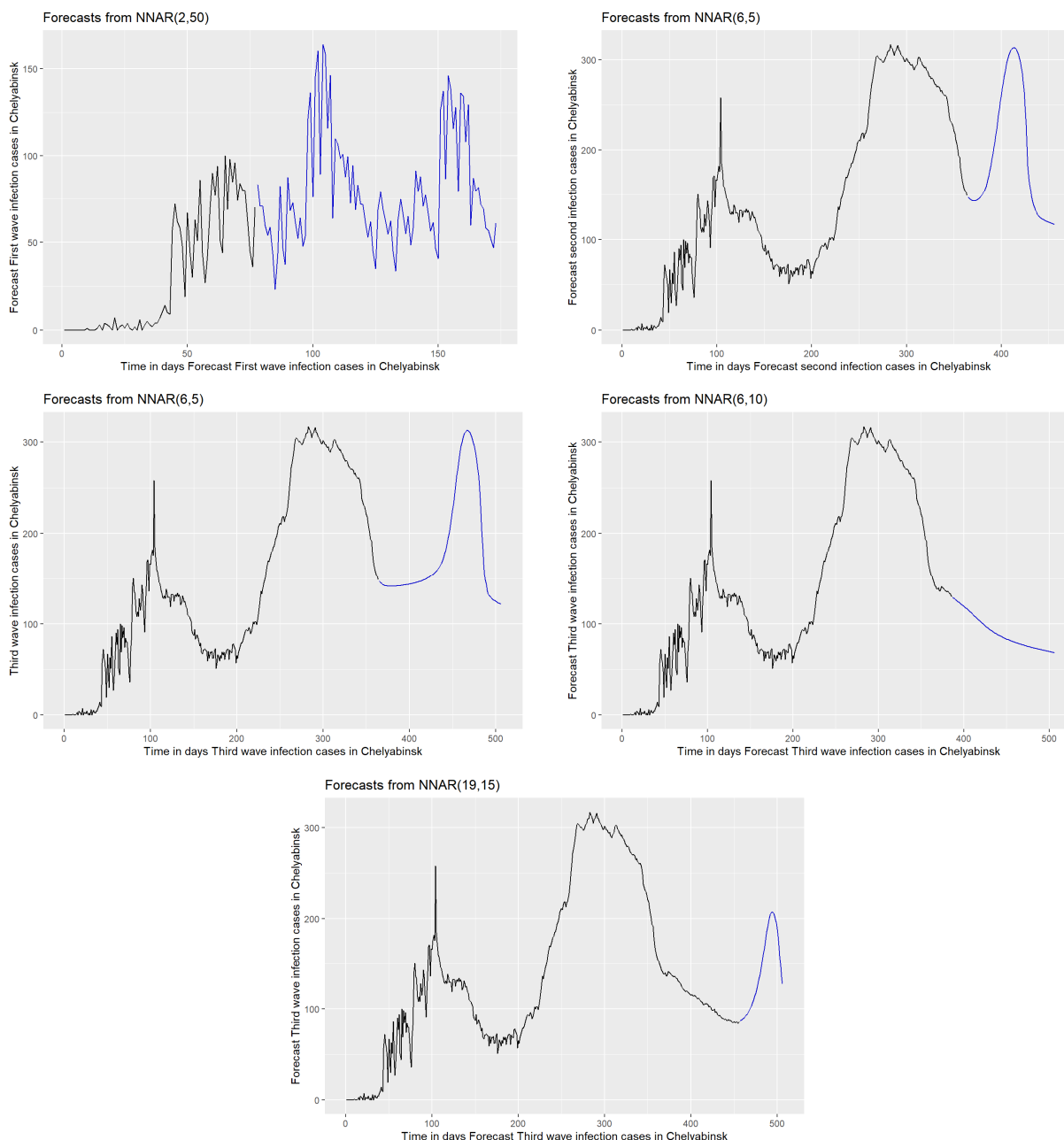


Fig. 4. Forecast of peaks of infection waves in the Chelyabinsk region

Despite the low (compared to time series models) forecasting accuracy using the NNAR model, this model can be successfully used to construct not only short-term, but also medium-term and long-term forecasts. Consider the results of using the NNAR model to predict infection peaks (Table 2, Fig. 4).

It can be seen from Table 2 that the peak of infections in the first two waves was accurately predicted by the corresponding models. Thus, there is reason to expect the peak of the next wave (provided that the existing restrictions and management decisions are preserved) at the predicted time, which makes it possible to proactively make some decisions and, possibly, influence the current situation.

Table 3
Modeling in a different time for the two Scenario for forecast the third wave in Chelyabinsk

Scenario NNAR (\mathcal{P}, k)	Lagged inputs \mathcal{P} for forecasting the output y_t	Number of neurons in the hidden layer k
The first scenario NNAR(6,5)	6	5
The second scenario NNAR(6,10)*	6	10
The Third scenario NNAR(19,15)	19	15

* it is forecasted stable in daily infection cases (won't wave happen).

Table 3 shows the NNAR (\mathcal{P}, k) to indicate there are \mathcal{P} lagged inputs and k nodes in the hidden layer. We used NNAR (6,5) model to obtain forecast for the first scenario, NNAR (6,10) model for the second scenario, and NNAR (19,15) model for the third scenario respectively. Hence, both models present a neural network with the last six observations used as $(y_t - 1, y_t - 2, y_t - 3, y_t - 4, y_t - 5, y_t - 6)$ inputs for forecasting the output y_t for first and second scenario, and present a neural network with the last 19 observations for the third scenario. In addition to with five neurons in the hidden layer in the first scenario, five neurons in the hidden layer in the second scenario, and 15 neurons in the hidden layer in the third scenario. So the only difference between the three scenarios is the number of neural, but we obtain MAPE 6.984% for the first scenario, 1.636% for the second scenario, and 0.955% for the third scenario. One more difference is that we are testing the last 60 days for the second scenario, the last 30 days for the first scenario, and last 7 days for the third scenario. The lower error for the third scenario depends on the number of neurons in the network, and the size of training data. Hence, it is not necessary to increase the number of neurons for increasing accuracy, as in our case, the increase in the number of neurons led to increasing accuracy, as there are other cases where the error is reduced in case of reducing the number of neurons, and this depends on COVID -19 infection spreading pattern. To get a very accurate forecast, we recommend re-running the algorithm weekly (Table 4).

Table 4
Forecasting the lowest and highest daily COVID-19 infection cases till the end of July 2021

Scenario NNAR (\mathcal{P}, k)	Forecasted the Lowest daily infection cases	Forecasted the Highest daily infection cases
The first scenario NNAR (6,5)	122	313
The second scenario NNAR (6,10)	69	85
The Third scenario NNAR (19,15)	94	208

Conclusion

The article discusses a new algorithm implemented with R, predicting COVID-19 cases and choosing the best model (BATS, TBATS, Holt's linear model, ARIMA, SIR, and NNAR) for forecasting. The model selection criterion is the MAPE error. The developed algorithm helped to identify the pattern of COVID-19 infection. It should be noted that the considered models make it possible to form short-term forecasts with sufficient accuracy. For medium-range forecasting, only the NNAR model can be used from among those considered. The development of methods for highly accurate medium and long-term forecasting of COVID-19 cases is an open task. It is also an open task to take into account the number of vaccinated population when making forecasts.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract No. 02.A03.21.0011. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government order FENU-2020-0022).

References

1. Barbarash O.L., Karetnikova V.N., Kashtalap V.V., Zvereva T.N., Kochergina A.M. [New coronavirus disease (COVID-19) and cardiovascular disease]. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 17–28. (in Russ.)
2. Abotaleb M.S.A. Predicting COVID-19 Cases Using Some Statistical Models: An Application to the Cases Reported in China Italy and USA. *Academic Journal of Applied Mathematical Sciences*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 32–40. DOI: 10.32861/ajams.64.32.40
3. Tian Y., Ishika L., Xi Zh. Forecasting COVID-19 cases using Machine Learning. *medRxiv, 33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019)*, Vancouver, Canada., 2020. DOI: 10.1101/2020.07.02.20145474
4. Gecili E., Assem Z., Rhonda D.S. Forecasting COVID-19 confirmed cases, deaths and recoveries: Revisiting established time series modeling through novel applications for the USA and Italy. *PloS one*, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1371/journal.pone.0244173
5. Hussain N., Baoming L. Using R-studio to examine the COVID-19 Patients in Pakistan Implementation of SIR Model on Cases. *International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies*, 2020, vol. 6, no. 8, pp. 54–59. DOI: 10.13140/RG.2.2.32580.04482
6. *Koronavirus. Statistika* [Coronavirus. Statistics]. Available at: <https://yandex.ru/covid19/stat>.
7. Moein S., Nickaeen N., Roointan A., Borhani N., Heidary Z., Javanmard S.H., Ghaisari J., Gheisari Y. Inefficiency of SIR models in forecasting COVID-19 epidemic: a case study of Isfahan. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11 (1), pp. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-021-84055-6
8. De Livera A.M., Hyndman R.J., Snyder R.D. Forecasting Time Series with Complex Seasonal Patterns Using Exponential Smoothing. *Journal of the American statistical association*, 2011, vol. 106, pp. 1513–1527. DOI: 10.1198/jasa.2011.tm09771
9. Lakman I.A., Agapitov A.A., Sadikova L.F., Chernenko O.V., Novikov S.V., Popov D.V., Pavlov V.N., Gareeva D.F., Idrisov B.T., Bilyalov A.R., Zagidullin N.S. [COVID-19 mathematical forecasting in the Russian Federation]. *Hypertension*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 288–294. (in Russ.)
10. Shokeralla A.A.A., Sameeh F.R.I., Musa A.G.M., Zahrani S. Prediction the daily number of confirmed cases of Covid-19 in Sudan with ARIMA and Holt-Winters exponential smoothing. *International Journal of Development Research*, 2020, vol. 10, no. 8, pp. 39408–39413. DOI: 10.37118/ijdr.19811.08.2020
11. Makarovskikh T.A., Abotaleb M.S.A. [Automatic Selection of ARIMA Model Parameters to Forecast COVID-19 Infection and Death Cases]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 20–37. (in Russ.) DOI: 10.14529/cmse210202
12. Banerjee M., Tokarev A., Volpert V. Immuno-epidemiological model of two-stage epidemic growth. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, 2020, vol. 15 (27), pp. 1–11. DOI: 10.1051/mmnp/2020012
13. Sun D., Duan L., Xiong J., Wang D. Modelling and forecasting the spread tendency of the COVID-19 in China. *Advances in Difference Equations*, 2020, vol. 1: 489. DOI: 10.1186/s13662-020-02940-2
14. Barzon G., Rugel W., Manjunatha K.K.H., Orlandini E., Baiesi M. Modelling the deceleration of COVID-19 spreading. *Journal of Physics A Mathematical and Theoretical*, 2021, vol. 54 (4). DOI: 10.1088/1751-8121/abd59e
15. Ponce M. Covid19.analytics: An R Package to Obtain, Analyze and Visualize Data from the Corona Virus Disease Pandemic. *The Journal of Open Source Software*, 2021, vol. 6 (60): 2995. DOI: 10.21105/joss.02995
16. Abotaleb M, Makarovskikh T. Analysis of Neural Network and Statistical Models Used for Forecasting of Covid-19 Cases. Available at: <https://rpubs.com/abotalebmostafa/752378>.
17. Abotaleb M, Makarovskikh T. Epidemic.Network Used for Forecasting of Covid-19 Cases. Available at: <https://github.com/abotalebmostafa11/Epidemic.Network>.

Received 28 April 2021

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ЛУЧШЕЙ МОДЕЛИ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЛУЧАЕВ COVID-19

М.С.А. Аботалеб, Т.А. Макаровских

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Анализ временных рядов является одной из наиболее исследуемых областей знаний во время распространения Covid-19 по всему миру. Проблема моделирования и прогнозирования случаев заражения COVID-19, летальных исходов, выздоровлений и прочих параметров остается актуальной и по сей день. **Цель исследования.** Данная статья посвящена исследованию классических статистических и нейросетевых моделей, которые могут быть использованы для прогнозирования случаев COVID-19. **Материалы и методы.** В статье обсуждается модель нейронной сети NNAR, проводится ее сравнение с линейными и нелинейными моделями (BATS, TBATS, линейный тренд Холта, ARIMA, классическая эпидемиологическая модель SIR). В статье приводится алгоритм Emedic.Network, реализованный с использованием языка программирования R. Этот алгоритм принимает временные ряды в качестве входных данных и выбирает лучшую модель из SIR, статистических моделей и модели нейронной сети. Критерием выбора модели является ошибка MAPE. Рассмотрена реализация данного алгоритма для анализа временных рядов распространения COVID-19 в Челябинской области и прогнозирования возможного пика третьей волны, рассматриваются три возможных сценария. Отметим, что рассмотренный алгоритм может работать для любых временных рядов, а не только для эпидемиологических. **Полученные результаты.** Разработанный алгоритм позволил выявить закономерность заражения COVID-19 для Челябинской области с использованием моделей, реализованных в составе рассматриваемого алгоритма. Следует отметить, что рассмотренные модели позволяют с достаточной точностью формировать краткосрочные прогнозы. Мы показываем, что увеличение количества нейронов привело к повышению точности, так как есть другие случаи, когда ошибка уменьшается в случае уменьшения количества нейронов, и это зависит от характера распространения инфекции COVID-19. **Заключение.** Следовательно, чтобы получить очень точный прогноз, рекомендуется повторный запуск алгоритма еженедельно. Для среднесрочного прогнозирования из рассмотренных может использоваться только модель NNAR, но она также позволяет получать хорошие прогнозы только с горизонтом в 1–2 недели.

Ключевые слова: BATS, TBATS, ARIMA, линейная модель Холта, модель SIR, NNAR, COVID-19, прогнозирование.

Литература

1. Новая коронавирусная болезнь (Covid-19) и сердечно-сосудистые заболевания / О.Л. Барбараш, В.Н. Каретникова, В.В. Капиталов и др. // *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*. – 2020. – Т. 17, № 28. – С. 17–28.
2. Abotaleb, M.S.A. Predicting COVID-19 Cases Using Some Statistical Models: An Application to the Cases Reported in China Italy and USA / M.S.A. Abotaleb // *Academic Journal of Applied Mathematical Sciences*. – 2020. – Vol. 6, no. 4. – P. 32–40. DOI: 10.32861/ajams.64.32.40
3. Tian, Y. Forecasting COVID-19 Cases Using Machine Learning / Y. Tian, L. Ishika, Zh. Xi // *medRxiv, 33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019), Vancouver, Canada, 2020*. DOI: 10.1101/2020.07.02.20145474
4. Gecili, E. Forecasting COVID-19 confirmed cases, deaths and recoveries: Revisiting established time series modeling through novel applications for the USA and Italy / E. Gecili, Z. Assem, D.S. Rhonda // *PloS one*. – 2021. – Vol. 16, no. 1. – P. 1–11. – DOI: 10.1371/journal.pone.0244173
5. Hussain, N. Using R-studio to Examine the COVID-19 Patients in Pakistan Implementation of SIR Model on Cases / N. Hussain, L. Baoming // *International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies*. – 2020. – Vol. 6, no. 8. – P. 54–59. DOI: 10.13140/RG.2.2.32580.04482

6. Коронавирус. Статистика. – <https://yandex.ru/covid19/stat>.
7. Inefficiency of SIR models in forecasting COVID-19 epidemic: a case study of Isfahan / S. Moein, N. Nickaen, A. Roointan et al. // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11 (1). – P. 1–9. DOI: 10.1038/s41598-021-84055-6
8. De Livera, A.M. Forecasting Time Series with Complex Seasonal Patterns Using Exponential Smoothing / A.M. De Livera, R.J. Hyndman, R.D. Snyder // *Journal of the American statistical association*. – 2011. – Vol. 106. – P. 1513–1527. DOI: 10.1198/jasa.2011.tm09771
9. Возможности математического прогнозирования коронавирусной инфекции в Российской Федерации / И.А. Лакман, А.А. Агапитов, Л.Ф. Садикова и др. // *Артериальная гипертензия*. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 288–294.
10. Prediction the Daily Number of Confirmed Cases of Covid-19 in Sudan with ARIMA and Holt-Winters Exponential Smoothing / A.A.A. Shokeralla, F.R.I. Sameeh, A.G.M. Musa, S. Zahrani // *International Journal of Development Research*. – 2020. – Vol. 10, no. 8. – P. 39408–39413. DOI: 10.37118/ijdr.19811.08.2020
11. Макаровских, Т.А. Автоматический подбор параметров модели ARIMA для прогноза количества случаев заражения и смерти от Covid-19 / Т.А. Макаровских, М.С.А. Аботалев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. – 2021. – Т. 10, № 2. – С. 20–37. DOI: 10.14529/cmse210202
12. Banerjee, M. Immuno-epidemiological Model of Two-stage Epidemic Growth / M. Banerjee, A. Tokarev, V. Volpert // *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. – 2020. – Vol. 15 (27). – P. 1–11. DOI: 10.1051/mmnp/2020012
13. Modelling and forecasting the spread tendency of the COVID-19 in China / D. Sun, L. Duan, J. Xiong, D. Wang // *Advances in Difference Equations*. – 2020. – Vol. 1: 489. DOI: 10.1186/s13662-020-02940-2
14. Modelling the Deceleration of COVID-19 Spreading / G. Barzon, W. Rugel, K.K.H. Manjunatha et al. // *Journal of Physics A Mathematical and Theoretical*. – 2021. – Vol. 54 (4). DOI: 10.1088/1751-8121/abd59e
15. Ponce, M. Covid19.analytics: An R Package to Obtain, Analyze and Visualize Data from the Corona Virus Disease Pandemic / M. Ponce // *The Journal of Open Source Software*. – 2021. – Vol. 6 (60): 2995. DOI: 10.21105/joss.02995
16. Abotaleb, M. Analysis of Neural Network and Statistical Models Used for Forecasting of Covid-19 Cases / M. Abotaleb, T. Makarovskikh. – <https://rpubs.com/abotalebmostafa/752378>.
17. Abotaleb, M. Epidemic.Network Used for Forecasting of Covid-19 Cases / M. Abotaleb, T. Makarovskikh. – <https://github.com/abotalebmostafa11/Epidemic.Network>.

Аботалев Мостафа Салахелдин Абделсалам, аспирант, кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; abotalebmostafa@yandex.ru.

Макаровских Татьяна Анатольевна, д-р.физ.-мат. наук, доцент, кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Makarovskikh.T.A@susu.ru.

Поступила в редакцию 28 апреля 2021 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Abotaleb, M.S.A. Development of Algorithms for Choosing the Best Time Series Models and Neural Networks to Predict COVID-19 Cases / M.S.A. Abotaleb, T.A. Makarovskikh // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 26–35. DOI: 10.14529/ctcr210303

FOR CITATION

Abotaleb M.S.A., Makarovskikh T.A. Development of Algorithms for Choosing the Best Time Series Models and Neural Networks to Predict COVID-19 Cases. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 26–35. DOI: 10.14529/ctcr210303

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ARIMA НА КАЧЕСТВО ПРОГНОЗА ДЛЯ КОРОТКИХ НАБОРОВ ДАННЫХ

М.Н. Фелькер, В.В. Чеснов

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

Временные ряды – это данные, собираемые в различные отрезки времени, которые, в свою очередь, в зависимости от задачи могут отличаться. Временные ряды используются для принятия решений. Анализ временных рядов позволяет получить некоторый результат, который определит характер принимаемого решения. Анализом временных рядов занимались в очень давние времена, например, следствием анализа стали различные календари. Позднее анализ временных рядов применялся для исследования и прогнозирования экономических, социальных и других систем. Временные ряды появились очень давно. Когда-то древнеави-лонские астрономы, изучая положение звезд, обнаружили периодичность затмений, что позволило в дальнейшем прогнозировать их появление. Позднее анализ временных рядов подобным образом привел к созданию различных календарей, например, урожайных. В дальнейшем помимо естественных областей добавились социальные и экономические. **Цель исследования:** поиск классификационных признаков временных рядов, позволяющих понять, можно ли для их краткосрочного (3 отсчета) прогноза применять модель *ARIMA*. **Материалы и методы.** Разработано специальное программное обеспечение, реализующее модели семейства *ARIMA* и необходимые интерфейсы. В работе были исследованы 59 наборов годовых данных с малой длиной, менее 20 значений. Данные обрабатывались с помощью *Python* библиотек *Statsmodels*, *Pandas*. Для определения стационарности ряда использовался тест Дики – Фуллера. Стационарность временного ряда позволяет более качественно строить прогнозы. Для выбора наилучшей модели применялся информационный критерий Акаике. Получены рекомендации по обоснованному подбору параметров настройки *ARIMA*-моделей. Показана зависимость настроек от категории годовых рядов. **Заключение.** После обработки данных были выделены четыре категории, или шаблона, годовых рядов. В зависимости от категории были подобраны диапазоны параметров для настройки *ARIMA*-моделей. Предлагаемые диапазоны позволят определить начальные параметры для исследования аналогичных наборов данных. Даны рекомендации по улучшению качества постпрогноза и прогноза при помощи *ARIMA*-модели за счет подбора настроек.

Ключевые слова: *ARIMA*, эконометрика, анализ, временные ряды.

Введение

Временные ряды появляются в результате измерения неких показаний, полученных от технических, природных, социальных, экономических и других систем [1, 2–7]. В зависимости от задачи, рисков и требуемой скорости принятия решения могут быть различные промежутки между сборами [1, 8]. Например, системы с высоким риском, такие как биржи, собирают статистику с секундным периодом, так как в любой момент (секунду) времени может поменяться тенденция биржевого курса. Менее рискованные системы используют часовые или суточные сборы. Для безрисковых систем или систем со слабым риском необходимость в частых сборах отсутствует и для таких систем используется ежемесячный, ежеквартальный, ежегодный период сбора.

Анализ временных рядов позволяет получить некоторый результат, который каким-либо образом повлияет на принятие решения. Опять же на примере биржи: анализ ряда приведет к быстрому принятию решения, что в свою очередь позволит увеличить доход или минимизировать потери.

1. Модель *ARIMA*

Интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего (*ARIMA*) – одна из моделей, предназначенных для анализа временных рядов. Основана на модели *ARMA* с тем отличием, что

позволяет работать с нестационарными временными рядами, которые можно сделать стационарными, используя разность некоторого порядка от исходного ряда [1, 8, 9].

Стационарность – свойство процесса сохранять свои статистические характеристики с течением времени. Должны сохраняться постоянство мат. Ожидания, дисперсии и независимость от времени. Стационарность позволяет более точно строить прогноз [1, 8, 9].

Модель ARMA состоит из нескольких моделей – модель авторегрессии (AR) и модель скользящего среднего (MA) [10].

AR основывается на линейной зависимости текущих значений ряда от предыдущих [11, 12]:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p a_i X_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где a_i – параметры модели; c – константа; ε_t – белый шум.

MA используется для моделирования случайных ошибок временных рядов [13]:

$$X_t = c + \sum_{j=1}^q a_j \varepsilon_{t-j}, \quad (2)$$

где a_i – параметры модели; ε_t – белый шум.

Для анализа временных рядов с помощью модели ARIMA используются три параметра: p , d , q [9].

График (диаграмма) функции корреляции – коррелограмма [9].

P – порядок модели AR: порядок, определяемый с помощью коррелограммы функции частичной автокорреляции (PACF). Здесь используется корреляция между y_t и y_{t-k} :

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \beta_2 y_{t-2} + \dots + \beta_k y_{t-k} + \varepsilon_t; \quad (3)$$

d – порядок интегрированного ряда (I): порядок, определяемый количеством разностей для получения из нестационарного ряда стационарного;

Q – порядок модели MA: порядок, определяемый с помощью коррелограммы функции автокорреляции (ACF).

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Для того чтобы определить порядок (d) интегрированного временного ряда, проводится тест Дики – Фуллера [1, 14]:

$$\Delta y = \alpha + \beta t + \gamma y_{t-1} + \delta_1 \Delta y_{t-1} + \dots + \delta_{p-1} \Delta y_{t-p+1} + \varepsilon_t, \quad (5)$$

где α – константа, предполагается, что единичный корень один ($\alpha = 1$); β – коэффициент тренда; p – лаг процесса авторегрессии.

Данный тест проводится для поиска единичных корней, т. е. характеризующих свойств нестационарных временных рядов. Если исходный ряд не стационарен, то его можно сделать стационарным путем взятия разности временного ряда с исходным с некоторым сдвигом:

$$\Delta y = y_t - y_{t-1}. \quad (6)$$

Например, если первая разность ряда стационарна, то это интегрированный ряд первого порядка.

Другой способ определения – на основе коррелограмм ACF, PACF.

Коррелограмма ACF стационарного временного ряда быстро убывает с ростом k (значение коррелограммы после 1, 2, 3-го лага стремится к нулю). Аналогичным образом стационарность определяется коррелограммой PACF.

Еще один метод – наглядный. Нестационарный ряд можно определить по графику. Если на графике виден тренд, то временной ряд нестационарный.

После определения порядка (d) интегрированного временного ряда определяются порядки (p и q) компонент AR и MA.

В различных источниках [9, 15, 16] упоминаются два способа определения значений p , q .

Первый способ – подсчет количества лагов на коррелограммах.

Для q – количество значимых лагов на коррелограмме ACF, после которых значения функции резко падает, пример на рис. 1.

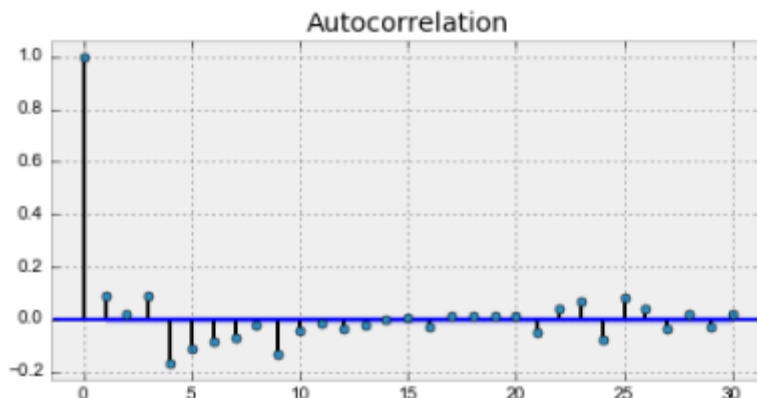


Рис. 1. Пример коррелограммы ACF
Fig. 1. An example of an ACF correlogram

На данной диаграмме видно, что после первого лага происходит резкое снижение значений функции.

Для p – количество лагов на коррелограмме PACF, сильно отличных от нуля, пример на рис. 2.

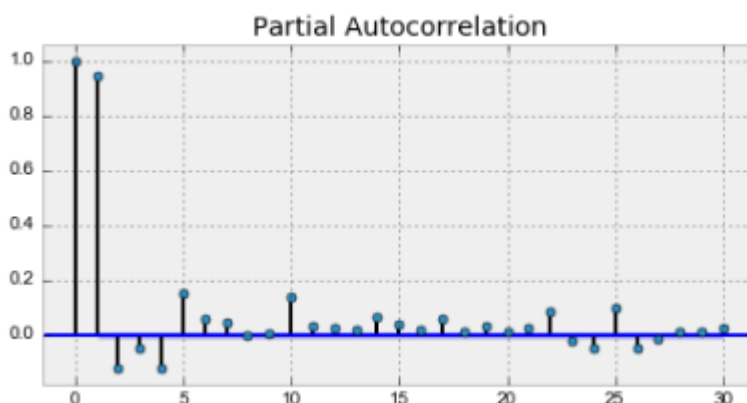


Рис. 2. Пример коррелограммы PACF
Fig. 2. An example of a PACF correlogram

На данной диаграмме видно, что только два лага сильно отличны от нуля.

Далее полученные значения p , d , q подставляются в модель ARIMA и применяется для исследуемого временного ряда.

Второй – модификация первого, для параметров берутся значения p и q с запасом. Для всех перестановок значений p и q в диапазонах $[0; p + n]$ и $[0; q + m]$, n и m больше или равно 1, и известной d вычисляется наилучшая модель для исследуемого временного ряда.

Наилучшая модель выбирается с помощью некоторого информационного критерия. В данном исследовании при выборе лучшей модели был задействован критерий Акаике для малых наборов данных (AICc) [16, 17]:

$$AICc = AIC + 2k \frac{k+1}{n-k-1} = 2k - 2\ln(L) + 2k \frac{k+1}{n-k-1}, \quad (7)$$

где k – число параметров модели; L – максимум функции правдоподобия; n – объем выборки.

На основании полученной модели можно спрогнозировать дальнейшее поведение системы, описываемой временным рядом. Для проверки качества модели проводится постпрогноз. Постпрогноз – метод, при котором известные последние значения ряда реакции принимаются неизвестными, после прогнозируют их с использованием модели, оснащенной на сокращенном интервале, и исходных рядов факторов, а затем сравнивают найденные значения с исходными.

Цель работы – поиск классификационных признаков временных рядов, позволяющих понять, можно ли для их краткосрочного (3 отсчета) прогноза применять модель ARIMA.

2. Анализ наборов данных и выделение основных категорий

Для данной работы были исследованы 59 наборов годовых рядов данных о больших социально-экономических системах и объектах, в том числе численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками в России, уровень преступности в России, анализ продуктовой корзины и другие. Длина наборов данных – от 5 до 18 значений. На основе графиков наборов данных были выявлены четыре категории шаблонов.

Первая категория – наборы данных, график которых напоминает прямую и имеет явный тренд (рис. 3).

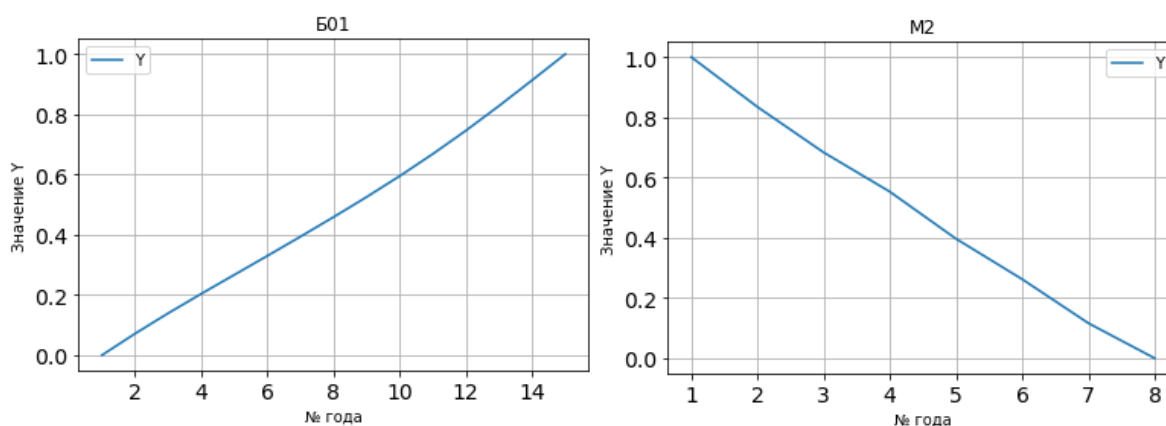


Рис. 3. Примеры графиков первой категории
Fig. 3. Examples of graphs of the first category

Схожесть с прямой можно описать математически: в первую очередь необходимо найти ее уравнение. Для этого используется уравнение прямой по двум точкам:

$$\frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8)$$

Затем сравниваются значения исходных данных со значениями прямой. Схожесть графика с прямой – максимальное отклонение между значениями набора данных и прямой. Чем меньше отклонение, тем больше схожесть с прямой.

При прогнозировании наборов данных первой категории трудностей нет. Параметр $d = 1$, это можно определить любым способом, описанным ранее, однако в данном случае тренд очевиден. Первый порядок интегрированности временного ряда достаточен для дальнейшего использования. Параметры p и q для данной категории лежат в диапазоне от 1 до 3.

В качестве примеров приведены графики наборов данных B01 и M2. Для обоих наборов наилучшая ARIMA-модель найдена при использовании параметров $p = 1$, $d = 1$, $q = 1$. Графики постпрогноза и прогноза представлены на рис. 4.

Вторая категория – это наборы данных, график которых не попадает в первую категорию, однако по-прежнему на графике можно наглядно определить направленный тренд. Примеры графиков таких наборов представлены на рис. 5.

При прогнозировании наборов данных второй категории начинаются трудности, они имеют более высокий порядок интегрированности $d \in [2, 3]$ из-за более сложной формы. Дальнейшее увеличение d приводит к изменению направления функции и появлению сильных неадекватных выбросов. Параметры p и q находятся в диапазоне $[1, 3]$.

В качестве примеров приведены графики наборов данных B07, B09, B24, M24. Для набора данных B07 найдена наилучшая модель ARIMA с параметрами: $p = 2$, $d = 2$, $q = 2$, для B09: $p = 1$, $d = 3$, $q = 1$, для B24: $p = 3$, $d = 2$, $q = 3$ и для M24: $p = 2$, $d = 2$, $q = 1$.

Графики постпрогноза и прогноза для B07, M24, представлены на рис. 6.

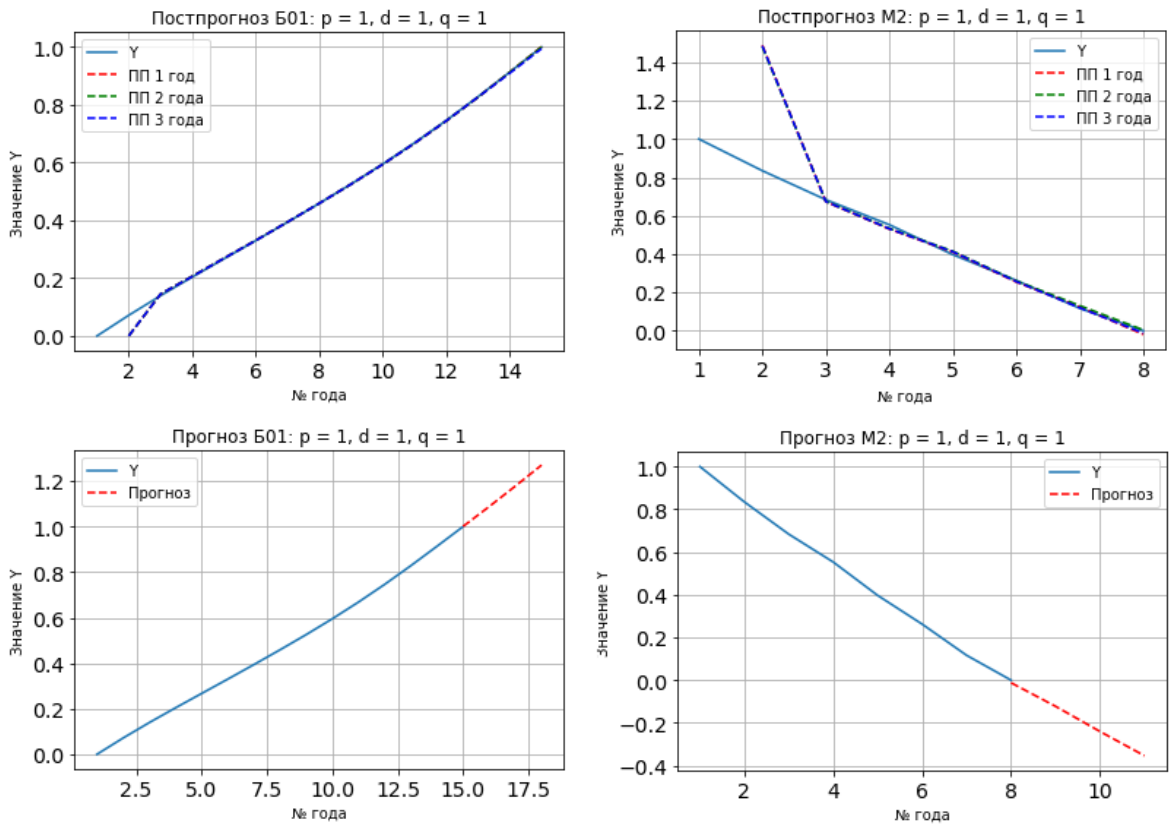


Рис. 4. Графики постпрогноза и прогноза наборов данных первой категории
 Fig. 4. Graphs of post-forecast and forecast of data sets of the first category

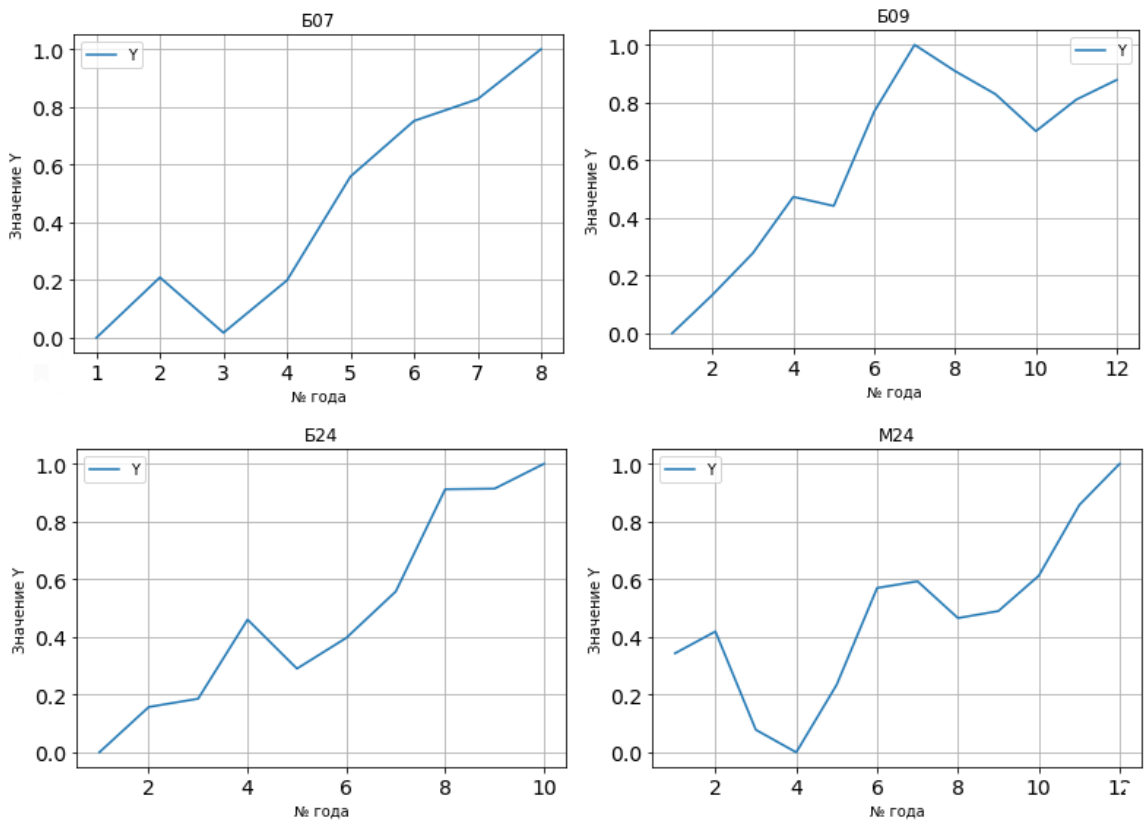


Рис. 5. Примеры графиков второй категории
 Fig. 5. Examples of graphs of the second category

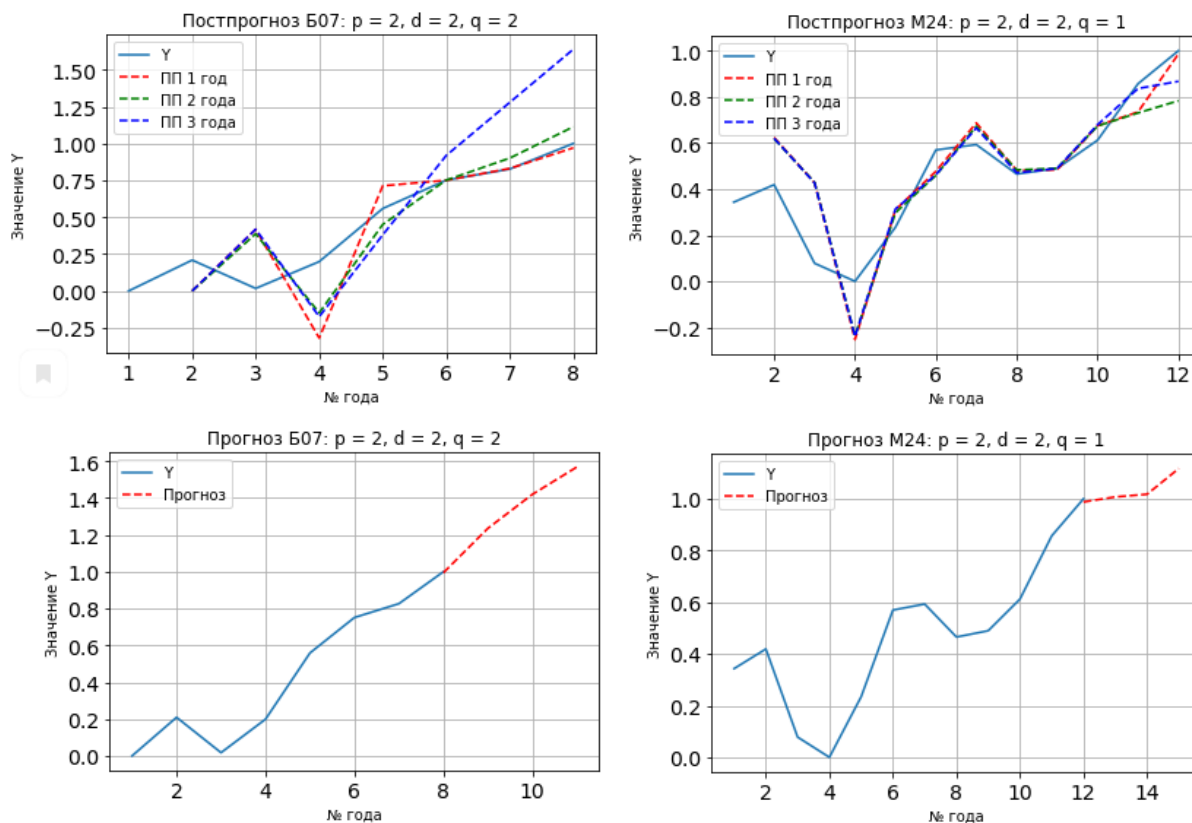


Рис. 6. Графики постпрогноза и прогноза наборов данных второй категории
 Fig. 6. Graphs of post-forecast and forecast of data sets of the second category

В данном случае автор рекомендует находить лучшую ARIMA модель через перебор параметров p, d, q ($3 \cdot 2 \cdot 3$ итерации).

Третья категория, наборы данных, график которых сложно оценить и имеет слабый наглядный тренд (рис. 7).

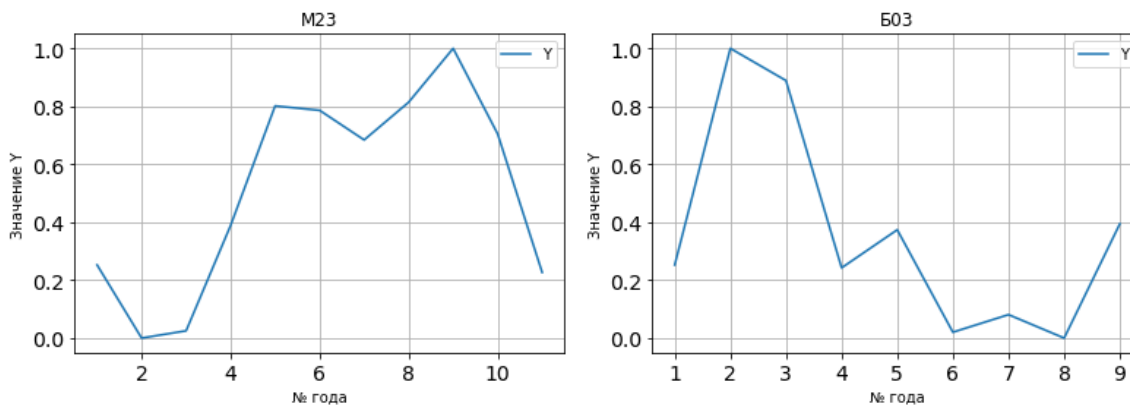


Рис. 7. Примеры графиков третьей категории
 Fig. 7. Examples of graphs of the third category

Данная категория интересна тем, что значение d может принимать как малые, так и большие значения ($d \in [1, 5]$). В это же время коррелограммы будут показывать всего один лаг для p и q .

В данном случае автор рекомендует находить лучшую ARIMA модель через перебор параметров p, d, q с запасом ($2 \cdot 5 \cdot 2$ итерации). Качество постпрогноза и прогноза для этой категории оставляет желать лучшего. Автор предполагает, что в данном случае на ухудшении качества прогноза сказывается малая длина набора данных.

Информатика и вычислительная техника

В качестве примеров приведены графики наборов данных М23 и Б03. Для первого набора наилучшая *ARIMA*-модель найдена при использовании параметров $p = 1, d = 1, q = 1$, для второго: $p = 1, d = 2, q = 1$. Графики постпрогноза и прогноза представлены на рис. 8.

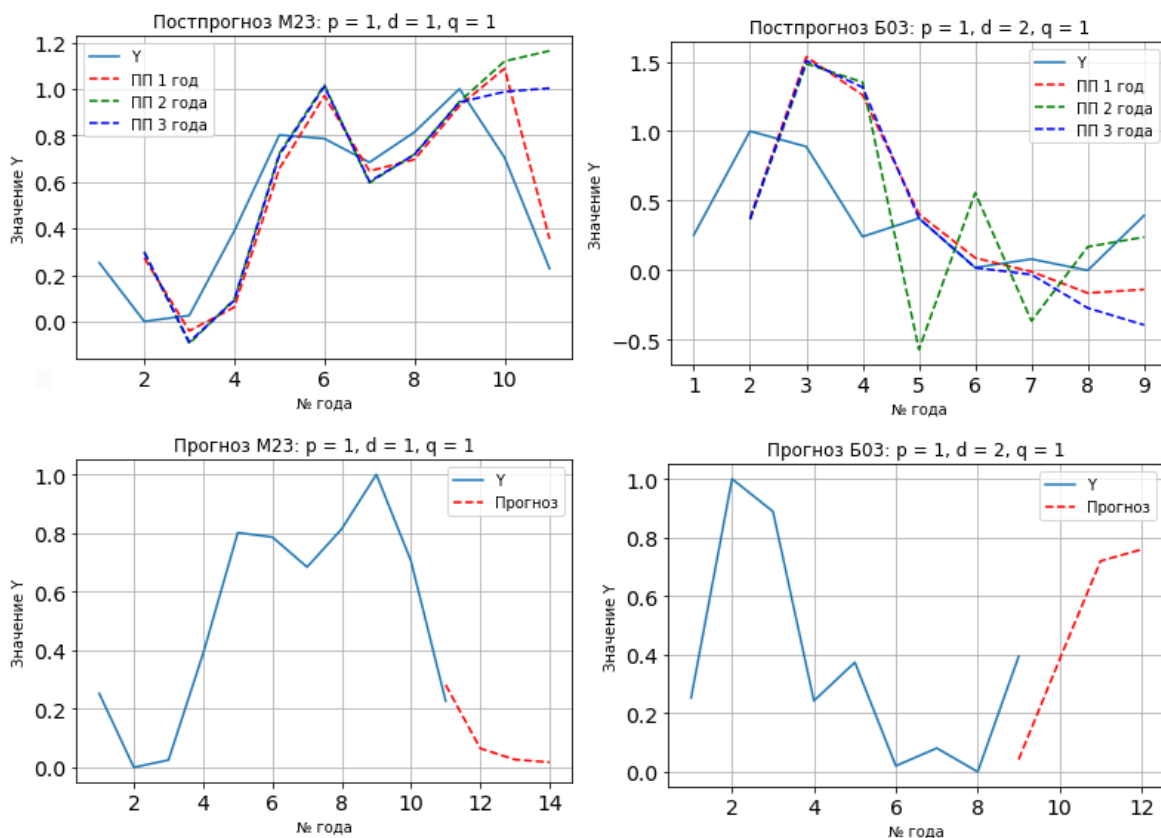


Рис. 8. Графики постпрогноза и прогноза наборов данных третьей категории
Fig. 8. Graphs of post-forecast and forecast of data sets of the third category

Четвертая категория, наборы данных, график которых сложно оценить, тренд отсутствует или сложно определить наглядно (рис. 9).

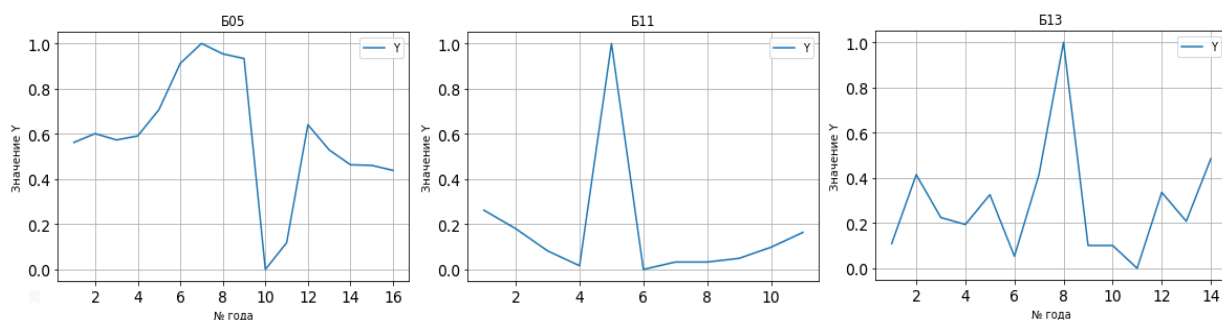


Рис. 9. Примеры графиков четвертой категории
Fig. 9. Examples of graphs of the fourth category

Данная категория интересна тем, что ряд может оказаться стационарным и модель *ARIMA* теряет свой смысл для наборов данных этой категории. Однако если взять малые значения ($d \in [1, 2]$) порядка интегрирования временного ряда, то модель может с нулевыми значениями p и q построить удовлетворительный прогноз. По некоторым опытам было обнаружено, что нулевые значения p и q дают более качественный прогноз. Автор рекомендует использовать малые значения параметров p, d, q .

В качестве примеров приведены графики наборов данных Б05, Б11, Б13. Для всех наборов наилучшая *ARIMA*-модель найдена при использовании параметров $p = 0, d = 2, q = 0$. Графики постпрогноза и прогноза представлены на рис. 10.

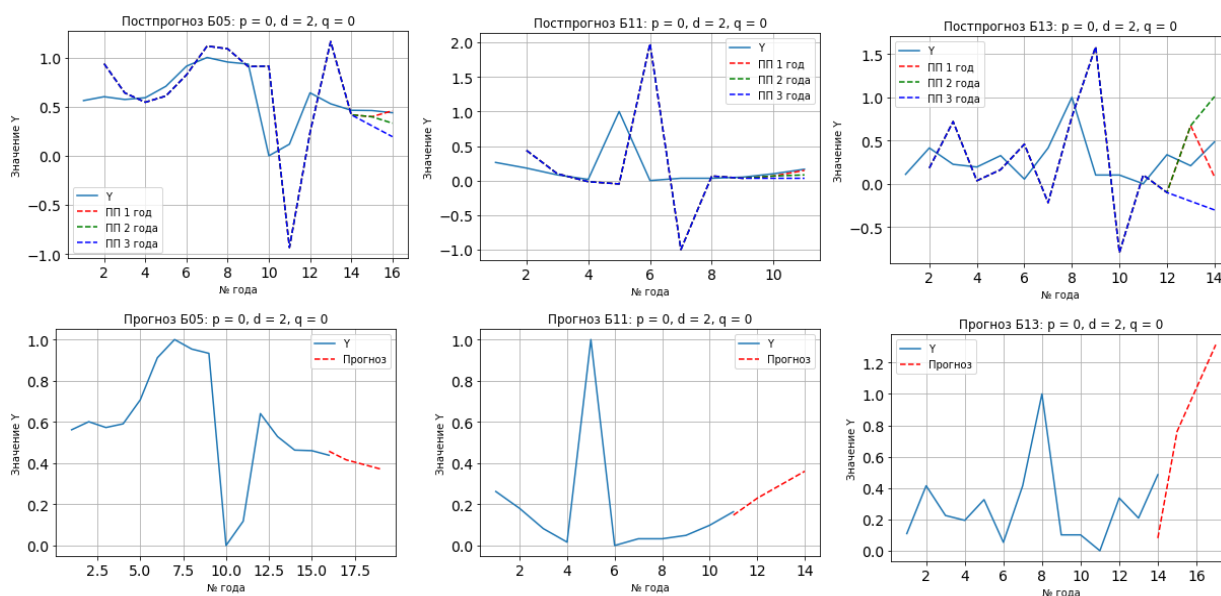


Рис. 10. Графики постпрогноза и прогноза наборов данных четвертой категории
Fig. 10. Graphs of post-forecast and forecast of data sets of the fourth category

Заключение

В результате исследования была достигнута цель работы – поиск классификационных признаков временных рядов, позволяющих понять – можно ли для их краткосрочного (3 отсчета) прогноза применять модель *ARIMA*, и с каким качеством.

По обработанным данным были получены четыре категории графиков и найдены диапазоны значений параметров для настройки модели *ARIMA* для каждой категории:

- 1) график похож на прямую и имеет четкий тренд: $d = 1, p \in [1, 3], q \in [1, 3]$, прогнозируются без каких-либо проблем;
- 2) график с четким трендом: $d \in [2, 3], p \in [1, 3], q \in [1, 3]$ прогнозируются без каких-либо проблем;
- 3) график сложно оценить и имеет слабый тренд: $d \in [1, 5], p \in [1, 2], q \in [1, 2]$, качество прогноза может быть плохим, автор предполагает, что в данном случае на ухудшении качества прогноза сказывается малая длина набора данных;
- 4) график сложно оценить, тренд отсутствует или сложно определить наглядно: $d \in [1, 2], p \in [0, 2], q \in [0, 2]$, может возникнуть ситуация, при которой ряд окажется стационарным, в применении модели *ARIMA* не будет смысла, однако если ей воспользоваться, то при нулевых AR и MA можно получить качественные прогнозы.

Литература

1. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; пер. с англ. под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974. – Кн. 1. – 406 с.
2. Семенов, А.В. Анализ временных рядов в политической науке: возможности и ограничения / А.В. Семенов // Политическая наука. – 2021. – № 1. – С. 76–97.
3. Khan, F.M. ARIMA and NAR based prediction model for time series analysis of COVID-19 cases in India / F.M. Khan, R. Gupta // Journal of Safety Science and Resilience. – 2020. – Vol. 1, iss. 1. – P. 12–18. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2020.06.007
4. Abonazel, M.R. Forecasting Egyptian GDP Using ARIMA Models / M.R. Abonazel, A.I. Abd-Elfтах // Reports on Economics and Finance. – 2019. – Vol. 5, no. 1. – P. 35–47. DOI: 10.12988/ref.2019.81023

5. Comparison of ARIMA and Random Forest time series models for prediction of avian influenza H5N1 outbreaks / M.J. Kane, N. Price, M. Scotch et al. // *BMC Bioinformatics* 15. – 2014. – Vol. 276. DOI: 10.1186/1471-2105-15-276

6. Верзунов, С.Н. Краткосрочное прогнозирование индекса качества воздуха на основе ARIMA-моделей / С.Н. Верзунов, Н.М. Лыченко // *Сборник материалов VII Международной научной конференции, посвященной памяти С.С. Ефимова*. – Омск, 2020. – С. 76–78.

7. Раднаев, Б.Б. ARIMA-модель пульсового сигнала / Б.Б. Раднаев, А.С. Цыбиков, Б.В. Хабитиев // *Вестник БГУ. Математика, информатика*. – 2017. – № 1. – С. 78–85.

8. Янченко, Т.В. Метод управления развитием социального ресурса региона на основе регрессионно-дифференциального моделирования / Т.В. Янченко, А.В. Затонский // *Управление большими системами: сб. тр.* – 2015. – № 54. – С. 86–113.

9. Затонский, А.В. Преимущества дифференциальной модели сложной экономической системы / А.В. Затонский, Н.А. Сиротина // *Образование. Наука. Научные кадры*. – 2012. – № 8. – С. 98–102.

10. Дуброва, Т.А. *Статистические методы прогнозирования: учеб. пособие для вузов* / Т.А. Дуброва. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 206 с.

11. Wang, W. Autoregressive Model-Based Gear Fault Diagnosis / W. Wang, A.K. Wong // *Journal of Vibration and Acoustics*. – 2002. – Vol. 124 (2). – P. 172–179. DOI: 10.1115/1.1456905

12. Gupta, R. The impact of US uncertainty on the Euro area in good and bad times: evidence from a quantile structural vector autoregressive model / R. Gupta, C.K.M. Lau, M.E. Wohar // *Empirica*. – 2018. – Vol. 46. – P. 353–368. DOI: 10.1007/s10663-018-9400-3

13. Multistage fusion approaches based on a generative model and multivariate exponentially weighted moving average for diagnosis of cardiovascular autonomic nerve dysfunction / M. Mehedi Hassan, Sh. Huda, J. Yearwood et al. // *Information Fusion*. – 2018. – Vol. 41. – P. 105–118. DOI: 10.1016/j.inffus.2017.08.004

14. Optimized Dickey-Fuller Test Refines Sign and Boundary Problems Compare to Traditional Dickey-Fuller Test / I. Masudul, A. Afroza, M. Sirajum et al. // *International Journal of Statistics and Probability*. – 2018. – Vol. 7, no. 5. – P. 19–27. DOI: 10.5539/ijsp.v7n5p19

15. Forecasting E-Commerce Products Prices by Combining an Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Model and Google Trends Data / S. Carta, A. Medda, A. Pili et al. // *Future Internet*. – 2019. – Vol. 11 (1), 5. DOI: 10.3390/fi11010005

16. Akaike, H. A new look at the statistical model identification / H. Akaike // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1974. – Vol. 19. – P. 716–723.

17. Akaike's Information Criterion, Cp and estimators of loss for elliptically symmetric distributions / A. Boisbunon, S. Canu, D. Fourdrinier et al. // *International Statistical Review*. – 2014. – Vol. 82 (3). – P. 422–439. DOI: 10.1111/insr.12052

Фелькер Мария Николаевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; eymarya@yandex.ru.

Чеснов Владислав Вадимович, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; tazaqsp@mail.ru.

Поступила в редакцию 14 июня 2021 г.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CHANGING THE PARAMETERS OF THE ARIMA MODEL ON THE QUALITY OF THE FORECAST FOR SHORT DATA SETS

M.N. Fel'ker, axl_mail_box@mail.ru,
V.V. Chesnov, grisha@molniya-ufa.ru

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

Time series, i.e. data collected at various times. The data collection segments may differ depending on the task. Time series are used for decision making. Time series analysis allows you to get some result that will determine the format of the decision. Time series analysis was carried out in very ancient times, for example, various calendars became a consequence of the analysis. Later, time series analysis was applied to study and forecast economic, social and other systems. Time series appeared a long time ago. Once upon a time, ancient Babylonian astronomers, studying the position of the stars, discovered the frequency of eclipses, which allowed them to predict their appearance in the future. Later, the analysis of time series, in a similar way, led to the creation of various calendars, for example, harvest calendars. In the future, in addition to natural areas, social and economic ones were added. **Aim.** Search for classification patterns of time series, allowing to understand whether it is possible to apply the *ARIMA* model for their short-term (3 counts) forecast. **Materials and methods.** Special software with *ARIMA* implementation and all need services is made. We examined 59 data sets with a short length and step equal a year, less than 20 values in the paper. The data was processed using Python libraries: Statsmodels and Pandas. The Dickey–Fuller test was used to determine the stationarity of the series. The stationarity of the time series allows for better forecasting. The Akaike information criterion was used to select the best model. Recommendations for a reasonable selection of parameters for adjusting *ARIMA* models are obtained. The dependence of the settings on the category of annual data set is shown. **Conclusion.** After processing the data, four categories (patterns) of year data sets were identified. Depending on the category ranges of parameters were selected for tuning *ARIMA* models. The suggested ranges will allow to determine the starting parameters for exploring similar datasets. Recommendations for improving the quality of post-forecast and forecast using the *ARIMA* model by adjusting the settings are given.

Keywords: ARIMA, econometrics, analysis, time series.

References

1. Boks, Dzh. *Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie* [Time series analysis, forecasting and management]. Moscow, Mir Publ., 1974. 406 p.
2. Semenov A.V. [Time series analysis in political science: opportunities and limitations]. *Political science*, 2021, no. 1, pp. 76–97. (in Russ.)
3. Khan F.M., Gupta R. ARIMA and NAR based prediction model for time series analysis of COVID-19 cases in India. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2020, vol. 1, iss. 1, pp. 12–18. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2020.06.007
4. Abonazel M.R., Abd-Elftah A.I. Forecasting Egyptian GDP Using ARIMA Models. *Reports on Economics and Finance*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 35–47. DOI: 10.12988/ref.2019.81023
5. Kane M.J., Price N., Scotch M. Comparison of ARIMA and Random Forest time series models for prediction of avian influenza H5N1 outbreaks. *BMC Bioinformatics* 15, 2014, vol. 276. DOI: 10.1186/1471-2105-15-276
6. Verzunov S.N., Lychenko N.M. [Short-term forecasting of the air quality index based on ARIMA models]. *Collection of materials of the VII International Scientific Conference dedicated to the memory of S.S. Efimov*, Omsk, 2020, pp. 76–78. (in Russ.)
7. Radnaev B.B., Cybikov A.S., Habituev B.V. [ARIMA-pulse signal model]. *Bulletin of the BSU. Mathematics, computer science*, 2017, no. 1, pp. 78–85. (in Russ.)
8. Janchenko T.V., Zatonskij A.V. [The method of managing the development of the social resource

of the region on the basis of regression-differential modeling]. *Managing large systems: a collection of works*, 2015, no. 54, pp. 86–113. (in Russ.)

9. Zatonskij A.V., Sirotnina N.A. [Advantages of the differential model of a complex economic system]. *Education. The science. Scientific personnel*, 2012, no. 8, pp. 98–102. (in Russ.)

10. Dubrova, T.A. *Statisticheskie metody prognozirovaniya* [Statistical methods of forecasting]. Moscow, YUNITI-DANA, 2003. 206 p.

11. Wang W., Wong A.K. Autoregressive Model-Based Gear Fault Diagnosis. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2002, vol. 124 (2), pp. 172–179. DOI: 10.1115/1.1456905

12. Gupta R., Lau C.K.M., Wohar M.E. The impact of US uncertainty on the Euro area in good and bad times: evidence from a quantile structural vector autoregressive model. *Empirica*, 2018, vol. 46, pp. 353–368. DOI: 10.1007/s10663-018-9400-3

13. Mehedi Hassan M., Huda Sh., Yearwood J., Jelinek H. F., Almogren A. Multistage fusion approaches based on a generative model and multivariate exponentially weighted moving average for diagnosis of cardiovascular autonomic nerve dysfunction. *Information Fusion*, 2018, vol. 41, pp. 105–118. DOI: 10.1016/j.inffus.2017.08.004

14. Masudul I., Afroza A., Sirajum M., Salauddin Khan Md. & Monzur Murshed Md. Optimized Dickey-Fuller Test Refines Sign and Boundary Problems Compare to Traditional Dickey-Fuller Test. *International Journal of Statistics and Probability*, 2018, vol. 7, no. 5, pp. 19–27. DOI: 10.5539/ijsp.v7n5p19

15. Carta S., Medda A., Pili A., Reforgiato Recupero D., Saia R. Forecasting E-Commerce Products Prices by Combining an Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Model and Google Trends Data. *Future Internet*, 2019, vol. 11 (1), 5. DOI: 10.3390/fi11010005

16. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, pp. 716–723.

17. Boisbunon A., Canu S., Fourdrinier D., Strawderman W., Wells M.T. Akaike's Information Criterion, Cp and estimators of loss for elliptically symmetric distributions. *International Statistical Review*, 2014, vol. 82 (3), pp. 422–439. DOI: 10.1111/insr.12052

Received 14 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Фелькер, М.Н. Исследование влияния изменения параметров модели ARIMA на качество прогноза для коротких наборов данных / М.Н. Фелькер, В.В. Чеснов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 36–46. DOI: 10.14529/ctcr210304

FOR CITATION

Fel'ker M.N., Chesnov V.V. Study of the Influence of Changing the Parameters of the ARIMA Model on the Quality of the Forecast for Short Data Sets. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 36–46. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210304

ВЫПИСЫВАНИЕ ФОРМУЛ ВЫЧИСЛЕНИЯ СИЛ В СОЧЛЕНЕНИЯХ МАНИПУЛЯТОРОВ В СТАТИКЕ

С.Г. Пудовкина, А.И. Телегин

*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе,
г. Миасс, Россия*

Решается проблема громоздкости математических моделей манипуляционных систем промышленных роботов. Здесь рассматриваются формулы вычисления статических реакций в сочленениях и активных сил, уравновешивающих силы тяжести, действующие на тела манипулятора в его неподвижном состоянии. В этом состоянии манипулятор находится, например, перед захватом объекта манипулирования и его освобождением, при выполнении некоторых сборочных операций, в процессе точечной сварки, в медленных (квазистатических) процессах дуговой сварки и покраски. **Цель исследования.** Вывести общие рекуррентные и конечные формулы вычисления сил реакций в сочленениях, а также их проекций на оси системы координат, жестко связанной с выбранным телом. Формулы проекций сил выразить через направляющие косинусы и обосновать их оптимальность в смысле минимума арифметических операций. Вывести общие обратные рекуррентные формулы для выписывания направляющих косинусов осей, связанных с подвижными телами системы координат относительно неподвижной системы координат. **Методы исследования** относятся к векторной механике и системному анализу, а также алгоритмизации вычислений путем их сведения к использованию рекуррентных формул. **Результаты.** Выполнен системный анализ общих формул, в которых выделены все возможные регулярные выражения, однозначно соответствующие кинематическим параметрам манипуляторов. Эти регулярные выражения используются в программном обеспечении аналитического моделирования манипулятора, в частности, аналитического решения задач статики манипулятора. Описана методика аналитической верификации выписанных формул. Решены задачи выписывания оптимальных формул вычисления проекций сил статических реакций в сочленениях, а также активных сил в поступательных сочленениях универсальных манипуляторов с шестью степенями свободы, работающих в декартовой, цилиндрической, сферической и ангулярной системах координат. Выполнена аналитическая верификация выписанных уравнений статики. Продемонстрированы примеры повторного использования выписанных формул для манипуляторов с совпадающими кинематическими схемами их подсистем. **Заключение.** Выражения уравнений статики манипуляторов через направляющие косинусы осей связанных систем координат их тел позволяют записать эти уравнения через известные параметры ориентации тел. Рекуррентный вид формул вычисления направляющих косинусов позволяет в их программной реализации использовать рекурсивные функции, т. е. повысить вычислительную эффективность ПО.

Ключевые слова: движущие силы, силы реакции, задачи статики, направляющие косинусы, верификация формул, регулярные выражения, оптимизация вычислений.

Введение

Основная проблема механики манипуляционных систем (МС) роботов – громоздкость формул математических моделей МС, что является следствием сложности МС, зависящей от количества её подвижных тел, связей между ними и числа степеней подвижности. К сложным относятся, например, МС универсальных промышленных и специализированных роботов [1]. Такие МС состоят из шести следующих друг за другом тел и имеют шесть степеней подвижности в пространстве. Как правило, первые три управляемых тела переносят захват в нужную точку рабочей области. Последние три управляемых тела обеспечивают необходимую ориентацию в пространстве объекта манипулирования в захвате, например, переносимого груза, горелки сварочного аппарата, краскораспылителя, гаечного ключа и т. д. [2]. По уровню возрастания сложности шести-

степенные МС можно выстроить в следующий ряд: МС с декартовой, цилиндрической, сферической и ангулярной системой координат (СК) [3].

Математические модели МС содержат уравнения кинематики, статики и динамики. Для увеличения быстродействия и точности решения различных задач эти уравнения приводят к аналитическим видам с минимальным числом арифметических операций. Предлагаются новые способы решения прямых и обратных задач кинематики МС промышленных роботов [4], шагающих аппаратов [5], трех и шестиколесных мобильных роботов [6, 7], роботов с параллельной кинематикой [8–10]. Для быстрого решения обратных задач кинематики используются генетические алгоритмы [11], где обратная задача кинематики формулируется как задача оптимизации.

В решении задач статики рассматриваются квазистатические режимы функционирования МС, что упрощает математические модели без существенной потери точности вычислений. Например, при решении задач управления сверхмощным шестиногим шагающим аппаратом в квазистатическом режиме ходьбы потеря точности вычисления движущих моментов сил не превышала пяти процентов, что подтверждено результатами динамического анализа в программной среде ADAMS [12].

Существенную роль в математических моделях МС играют направляющие косинусы (НК) как параметры ориентации тел в пространстве [13]. В классических работах по механике представлены выражения всех известных параметров ориентации тел в пространстве через НК, что позволяет перейти от уравнений в НК к уравнениям в других параметрах ориентации тел [14–16]. Поэтому задача выписывания оптимальных (в смысле быстродействия вычислений) аналитических формул для НК сложных МС и использование их в математических моделях МС является актуальной.

Постановка задачи. Вывести общие векторные и скалярно-координатные формулы вычисления сил реакций и движущих сил в сочленениях МС. Вывести общие рекуррентные формулы вычисления направляющих косинусов осей связанных систем координат тел относительно неподвижных осей. Обосновать вычислительную эффективность полученных формул и продемонстрировать их на примерах основных схем построения промышленных роботов.

1. Используемые понятия и обозначения

Два связанных тела МС образуют кинематическую пару (КП). Неподвижное относительно земли тело, образующее КП с первым телом МС, назовем неподвижным телом отсчета (НТО). Количество подвижных тел МС обозначим буквой N . Следующие друг за другом тела МС занумеруем числами $1, 2, \dots, N$. Для произвольных номеров тел используем обозначения i, j, k . Если номер тела равен i , то это тело и его массу обозначим через m_{oi} . Цифрой 0 (ноль) занумеруем НТО.

Рассмотрим произвольное тело m_{ok} . Если оно образует КП с одним телом МС, то m_{ok} является концевым телом и $k = N$. Если тело m_{ok} образует КП с двумя соседними телами, то тело m_{ok-1} назовем базовым телом (БТ) для тела m_{ok} , а тело m_{ok+1} назовем смежным телом для тела m_{ok} . У единственного концевого тела m_{oN} нет смежного тела. Базу тела m_{ok} обозначим через БТ(k). Тело m_{ok} и его БТ(k) образуют КП(k). Здесь и далее число в скобках после аббревиатуры указывает на номер тела. Номер КП равен номеру ее смежного тела, т. е. тела с большим номером в паре. Поэтому тело m_{o1} и НТО образуют КП(1).

Для описания положений тела m_{oi} введем в обращение точку O_i . Жестко свяжем ее с этим телом. Назовем ее полюсом тела (ПТ) m_{oi} или ПТ(i). С НТО жестко свяжем точку отсчета O . Для каждого тела введем связанную систему координат (ССК) с началом в его полюсе, и орты осей ССК(i) обозначим через $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$. Произвольное положение тела m_{oi} можно описать координатами ПТ(i) и параметрами ориентации ССК(i). Различают относительное и абсолютное положение тела m_{oi} . Положение тела m_{oi} относительно БТ(i) называют относительным. Положение тела m_{oi} относительно НТО называют абсолютным. С НТО жестко свяжем неподвижную систему координат (НСК). В исходном положении тел МС оси всех ССК направим параллельно соответствующим осям НСК с ортами $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$. Ось абсцисс $O\bar{x}$ направим горизонтально вправо, ось ординат $O\bar{y}$ направим вертикально вверх и ось аппликат $O\bar{z}$ направим так, чтобы НСК была правой.

Из уравнений кинематики здесь выписываются формулы вычисления направляющих косинусов (НК) осей КП в НСК. Для сокращения записей таких формул введем в обращение грече-

ские буквы ξ, η, ζ , принимающие значения на множестве символов $\{x, y, z\}$. Тогда, например, девять известных формул скалярных произведений орт осей СК можно коротко записать в виде $\bar{\xi} \cdot \bar{\xi} = 1, \bar{\xi} \cdot \bar{\eta} = 0$, где $\xi \neq \eta$. Для произвольных НК используем обозначение

$$\xi_{ji}^{\eta} = \bar{\xi}_j \cdot \bar{\eta}_i = \bar{\eta}_i \cdot \bar{\xi}_j = \cos(\bar{\eta}_i, \bar{\xi}_j), \quad (1)$$

где $\xi_{ji}^x, \xi_{ji}^y, \xi_{ji}^z$ – НК орта $\bar{\xi}_j$ в ССК(i) и $i \leq j$.

2. Силы и моменты сил в КП

Мерой взаимодействия двух тел является сила. Для формального описания взаимодействия тел КП(k) приведем к ПТ(k) систему сил, действующих на тело m_{ok} со стороны БТ(k). Получим главный вектор \bar{F}_k и главный момент \bar{M}_k этой системы сил относительно ПТ(k).

Связью для тела m_{ok} в КП(k) является БТ(k), которое ограничивает свободу относительного перемещения тела m_{ok} , т. е. перемещения смежного тела КП(k) относительно БТ(k). Эту связь можно мысленно разорвать. Для описания разрываемой связи используют принцип освобождения от связи, где мысленно разрываемую связь заменяют соответствующей силой и моментом силы относительно выбранной точки. Здесь мысленно разрываемая связь тел КП(k) заменяется силой \bar{F}_k и моментом силы \bar{M}_k относительно ПТ(k).

Из \bar{F}_k и \bar{M}_k можно выделить реакции связей (реактивные составляющие), а также активные составляющие, т. е. силы и/или моменты сил, развиваемые приводами в КП(k). Реактивные составляющие удерживают тело m_{ok} от относительных движений, не допускаемых связями в КП(k). В статике активные составляющие обеспечивают равновесие тела m_{ok} в направлениях, допускаемых связями КП(k). Выделим из \bar{F}_k, \bar{M}_k реактивные и активные составляющие в КП(k) МС, т. е. в поступательных КП (ПКП) и вращательных КП (ВКП).

В ПКП(k) тело m_{ok} может двигаться поступательно относительно БТ(k) вдоль оси $O_k \bar{p}_k$, жестко связанной с БТ(k), где \bar{p}_k – орт оси ПКП(k), указывающий положительное направление возможного относительного поступательного движения, допускаемого связью. Реактивной в ПКП(k) является сила \bar{F}_{rk} , перпендикулярная оси $O_k \bar{p}_k$, и момент силы \bar{M}_k , неизвестный по модулю и направлению. Для \bar{F}_{rk} неизвестны модуль и направление в плоскости, перпендикулярной оси $O_k \bar{p}_k$. К активной в ПКП(k) относится сила $F_k = \bar{p}_k \cdot \bar{F}_k$, включающая силу трения. Проекция вектора \bar{F}_k на плоскость, перпендикулярную оси $O_k \bar{p}_k$, равна \bar{F}_{rk} , т. е. $\bar{F}_k = \bar{F}_{rk} + F_k \bar{p}_k$, где $\bar{p}_k \cdot \bar{F}_{rk} = 0$.

В ВКП(k) тело m_{ok} может вращаться относительно БТ(k) вокруг оси $O_k \bar{q}_k$, где \bar{q}_k – орт оси ВКП(k), неподвижный как в теле m_{ok} , так и в БТ(k). К реактивной в ВКП(k) относится сила \bar{F}_k , неизвестная по модулю и направлению, и момент \bar{M}_{rk} относительно ПТ(k) силы реакции, перпендикулярный оси $O_k \bar{q}_k$. Активным в ВКП(k) является момент силы $M_k = \bar{q}_k \cdot \bar{M}_k$ относительно оси $O_k \bar{q}_k$, т. е. $\bar{M}_k = \bar{M}_{rk} + M_k \bar{q}_k$, где $\bar{q}_k \cdot \bar{M}_{rk} = 0$. M_k содержит момент сил трения в ВКП(k).

Если мысленно разорвать связи тела m_{ok} с БТ(k) с телом m_{ok+1} , то на тело m_{ok} со стороны его смежного тела m_{ok+1} будут действовать сила $(-\bar{F}_{k+1})$ и момент силы $(-\bar{M}_{k+1})$ относительно ПТ($k+1$). Следовательно, с учётом силы тяжести $m_{ok} \bar{g}$, действующей на тело m_{ok} , получим следующее уравнение равновесия сил $m_{ok} \bar{g} + \bar{F}_k - \bar{F}_{k+1} = 0$. Отсюда получим

$$\bar{F}_k = -m_{ok} \bar{g} + \bar{F}_{k+1}. \quad (2)$$

Из обратной рекуррентной формулы $\bar{F}_i = -m_{oi} \bar{g} + \bar{F}_{i+1}$, где $i = N, N-1, \dots, k$ и $\bar{F}_{N+1} = 0$, после рекуррентных вложений получим

$$\bar{F}_k = -\sum_{i=k}^N m_{oi} \bar{g} = -\bar{g} \sum_{i=k}^N m_{oi} = -m_k \bar{g}, \quad (3)$$

где $m_k = \sum_{i=k}^N m_{oi} = m_{ok} + m_{k+1} - \dots - m_{oN}$ – масса и обозначение $-i$ подсистемы, т. е. части МС, состоящей из тел $m_{ok}, m_{ok+1}, \dots, m_{oN}$.

Формулы (2), (3) можно получить из уравнения равновесия подсистемы m_k в поле сил тяжести. Действительно, если мысленно разорвать связь тела m_{ok} с БТ(k), то получим сле-

дующее уравнение статического равновесия $\bar{F}_k + m_k \bar{g} = 0$, т. е. формулу (3). Отсюда имеем $\bar{F}_{k+1} = -m_{k+1} \bar{g} = -(m_k - m_{ok}) \bar{g} = -\bar{F}_k + m_{ok} \bar{g}$, т. е. получаем формулу (2).

Учитывая, что $\bar{g} = -g\bar{y}$, проекцию силы \bar{F}_k на ось $O_i \bar{\eta}_i$ ССК(i) можно вычислять по формуле $F_{ki}^\eta = \bar{F}_k \cdot \bar{\eta}_i = m_k g \bar{y} \cdot \bar{\eta}_i = m_{gk} \eta_{i0}^y$, где $m_{gk} = m_k g$. В случае $i = k$:

$$F_k^\eta = m_{gk} \eta_{k0}^y \quad (4)$$

– проекция силы \bar{F}_k на ось $O_k \bar{\eta}_k$ ССК(k), где $\eta_{k0}^y = \bar{y}_0 \cdot \bar{\eta}_k$, $\bar{y}_0 = \bar{y}$ – орт вертикали.

3. Выписывание НК

В отличие от вывода формул процесс их выписывания не требует выполнения математических операций. Выписывание сводится к подстановке конкретных значений входных параметров МС в общие формулы, что приводит к конкретизации этих формул. Найдем общие формулы связи НК осей ССК(j) в ССК(i) и в ССК($i - 1$), где $i \leq j$.

По обозначению (1) $\eta_{ji}^x, \eta_{ji}^y, \eta_{ji}^z$ – проекции орта $\bar{\eta}_j$ ССК(j) на оси ССК(i), где $i \leq j$. Следовательно, $\bar{\eta}_j = \eta_{ji}^x \bar{x}_i + \eta_{ji}^y \bar{y}_i + \eta_{ji}^z \bar{z}_i$. В ПКП(i) $\bar{x}_i = \bar{x}_{i-1}$, $\bar{y}_i = \bar{y}_{i-1}$, $\bar{z}_i = \bar{z}_{i-1}$. Следовательно, по определению

$$\eta_{ji-1}^x = \bar{\eta}_j \cdot \bar{x}_{i-1} = \bar{\eta}_j \cdot \bar{x}_i = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{x}_i + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{x}_i + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{x}_i = \eta_{ji}^x.$$

Аналогично

$$\eta_{ji-1}^y = \bar{\eta}_j \cdot \bar{y}_{i-1} = \bar{\eta}_j \cdot \bar{y}_i = \eta_{ji}^y, \quad \eta_{ji-1}^z = \bar{\eta}_j \cdot \bar{z}_i = \eta_{ji}^z.$$

Для ВКП(i) рассмотрим три случая. В случае $\bar{q}_i = \bar{x}_i$ имеем $\bar{x}_i = \bar{x}_{i-1}$ и $q_i = \angle(O_i \bar{y}_{i-1}, O_i \bar{y}_i) = \angle(O_i \bar{z}_{i-1}, O_i \bar{z}_i)$ – угол между осями $O_i \bar{y}_{i-1}$ и $O_i \bar{y}_i$ или равный ему угол между осями $O_i \bar{z}_{i-1}$ и $O_i \bar{z}_i$. Тогда по определению:

$$\eta_{ji-1}^x = \bar{\eta}_j \cdot \bar{x}_{i-1} = \bar{\eta}_j \cdot \bar{x}_i = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{x}_i + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{x}_i + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{x}_i = \eta_{ji}^x,$$

$$\eta_{ji-1}^y = \bar{\eta}_j \cdot \bar{y}_{i-1} = \eta_{ji}^x \bar{x}_{i-1} \cdot \bar{y}_{i-1} + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{y}_{i-1} + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{y}_{i-1} = \\ = \eta_{ji}^y \cos(q_i) + \eta_{ji}^z \cos(90^\circ + q_i) = c_i \eta_{ji}^y - s_i \eta_{ji}^z,$$

$$\eta_{ji-1}^z = \bar{\eta}_j \cdot \bar{z}_{i-1} = \eta_{ji}^x \bar{x}_{i-1} \cdot \bar{z}_{i-1} + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{z}_{i-1} + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{z}_{i-1} = \\ = \eta_{ji}^y \cos(90^\circ - q_i) + \eta_{ji}^z \cos(q_i) = s_i \eta_{ji}^y + c_i \eta_{ji}^z,$$

где $s_i = \sin(q_i)$, $c_i = \cos(q_i)$.

В случае $\bar{q}_i = \bar{y}_i$ имеем $\bar{y}_i = \bar{y}_{i-1}$ и $q_i = \angle(O_i \bar{x}_{i-1}, O_i \bar{x}_i) = \angle(O_i \bar{z}_{i-1}, O_i \bar{z}_i)$ – угол между осями $O_i \bar{x}_{i-1}$ и $O_i \bar{x}_i$ или равный ему угол между осями $O_i \bar{z}_{i-1}$ и $O_i \bar{z}_i$. Тогда

$$\eta_{ji-1}^x = \bar{\eta}_j \cdot \bar{x}_{i-1} = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{x}_{i-1} + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{x}_{i-1} + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{x}_{i-1} = \\ = \eta_{ji}^x \cos(q_i) + \eta_{ji}^z \cos(90^\circ - q_i) = c_i \eta_{ji}^x + s_i \eta_{ji}^z,$$

$$\eta_{ji-1}^y = \bar{\eta}_j \cdot \bar{y}_{i-1} = \bar{\eta}_j \cdot \bar{y}_i = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{y}_i + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{y}_i + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{y}_i = \eta_{ji}^y,$$

$$\eta_{ji-1}^z = \bar{\eta}_j \cdot \bar{z}_{i-1} = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{z}_{i-1} + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{z}_{i-1} + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{z}_{i-1} = \\ = \eta_{ji}^x \cos(90^\circ + q_i) + \eta_{ji}^z \cos(q_i) = -s_i \eta_{ji}^x + c_i \eta_{ji}^z.$$

В случае $\bar{q}_i = \bar{z}_i$ имеем $\bar{z}_i = \bar{z}_{i-1}$ и $q_i = \angle(O_i \bar{x}_{i-1}, O_i \bar{x}_i) = \angle(O_i \bar{y}_{i-1}, O_i \bar{y}_i)$ – угол между осями $O_i \bar{x}_{i-1}$ и $O_i \bar{x}_i$ или равный ему угол между осями $O_i \bar{y}_{i-1}$ и $O_i \bar{y}_i$. Тогда

$$\eta_{ji-1}^x = \bar{\eta}_j \cdot \bar{x}_{i-1} = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{x}_{i-1} + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{x}_{i-1} + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{x}_{i-1} = \\ = \eta_{ji}^x \cos(q_i) + \eta_{ji}^y \cos(90^\circ + q_i) = c_i \eta_{ji}^x - s_i \eta_{ji}^y,$$

$$\eta_{ji-1}^y = \bar{\eta}_j \cdot \bar{y}_{i-1} = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{y}_{i-1} + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{y}_{i-1} + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{y}_{i-1} = \\ = \eta_{ji}^x \cos(90^\circ - q_i) + \eta_{ji}^y \cos(q_i) = s_i \eta_{ji}^x + c_i \eta_{ji}^y,$$

$$\eta_{ji-1}^z = \bar{\eta}_j \cdot \bar{z}_{i-1} = \bar{\eta}_j \cdot \bar{z}_i = \eta_{ji}^x \bar{x}_i \cdot \bar{z}_i + \eta_{ji}^y \bar{y}_i \cdot \bar{z}_i + \eta_{ji}^z \bar{z}_i \cdot \bar{z}_i = \eta_{ji}^z.$$

Перед практическим использованием полученных общих формул рекомендуется записать выражения орта осей КП(i) через орты осей ССК(i). Для этого можно использовать следующие свойства МС. Для ПКП(i) $\bar{p}_i = \bar{\eta}_i$ и по умолчанию $\bar{q}_i = 0$. Для ВКП(i) $\bar{q}_i = \bar{\eta}_i$ и по умолчанию $\bar{p}_i = 0$. Здесь $\bar{\eta}_i$ для каждого i принимает одно значение из множества символов $\{\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i\}$ в зави-

Так как $\bar{q}_2 = \bar{q}_1 = 0$, получим $\bar{\eta}_{60} = \bar{\eta}_{61} = \bar{\eta}_{62}$.

Таким образом, $F_6^x = m_{g6}x_{60}^y = m_{g6}x_{62}^y = m_{g6}x_{64}^y = m_{g6}s_5c_6$,

$F_6^y = m_{g6}y_{60}^y = m_{g6}y_{64}^y = m_{g6}c_5$, $F_6^z = m_{g6}z_{60}^y = m_{g6}z_{62}^y = m_{g6}z_{64}^y = m_{g6}s_5s_6$.

Выполним аналитическую верификацию выписанных формул.

Общий подход аналитической верификации заключается в доказательстве совпадения известного решения задачи с решением, которое получается из выписанных формул. Например, заметим, что из формулы (2) следует $|\bar{F}_k| = m_k g = m_{gk}$. Используя выписанные формулы, полу-

чим: $|\bar{F}_6| = \sqrt{F_6^{x2} + F_6^{y2} + F_6^{z2}} = \sqrt{m_{g6}^2(s_5^2c_6^2 + c_5^2 + s_5^2s_6^2)} = m_{g6}$. Результаты для $k = 6$ совпали.

Можно рассмотреть конкретные положения тел МС, в которых решение задачи очевидно, и доказать, что аналогичное решение следует из выписанных формул для рассматриваемого положения тел МС. Например, очевидно, что в исходном положении тел МС на рис. 1 $F_6^x = F_6^z = 0$, $F_6^y = m_{gk}$. Выписанные формулы в случае $q_5 = q_6 = 0$ дают такой же результат.

4. Повторное использование формул НК

Если кинематические схемы подсистем двух МС совпадают, то очевидно совпадают НК орт ССК несомых тел относительно орт ССК несущих тел этих подсистем.

Задача 2. МС с цилиндрической СК на рис. 2 имеет следующие выражения орт КП через орты ССК: $\bar{q}_1 = \bar{y}_1$, $\bar{p}_2 = \bar{x}_2$, $\bar{q}_3 = \bar{y}_3$, $\bar{p}_4 = -\bar{y}_4$, $\bar{q}_5 = \bar{z}_5$, $\bar{q}_6 = \bar{y}_6$.

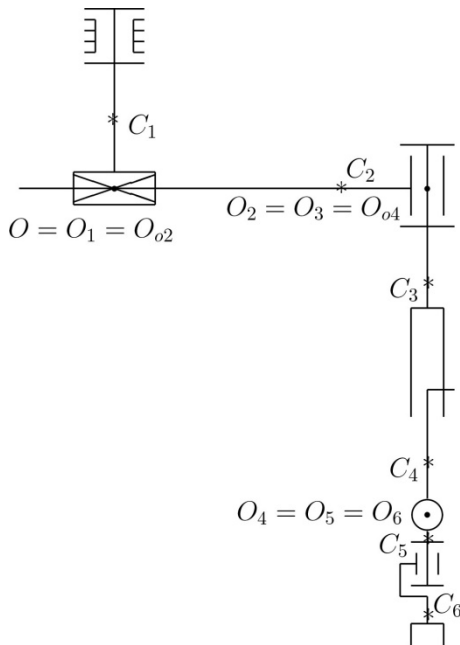


Рис. 2. МС с цилиндрической СК
Fig. 2. MS with cylindrical CS

Выписать проекции орта \bar{y}_6 на оси НСК.

Заметим, что кинематические схемы подсистем m_3 для МС на рис. 1–4 совпадают. Следовательно, для МС на рис. 1–4 формулы вычисления НК $\eta_{6i}^x, \eta_{6i}^y, \eta_{6i}^z$ для $i = 6, 5, 4, 3, 2$ совпадают. В частности, для МС на рис. 2 имеем

$$\begin{aligned} \bar{x}_{62} &= (c_3x_{64}^x - s_3s_6, x_{64}^y, -s_3x_{64}^x - c_3s_6); \bar{y}_{62} = \\ &= (-c_3s_5, c_5, s_3s_5); \\ \bar{z}_{62} &= (c_3z_{64}^x + s_3c_6, z_{64}^y, -s_3z_{64}^x + c_3c_6), \end{aligned} \quad (9)$$

где $x_{64}^x = c_5c_6$, $x_{64}^y = s_5c_6$, $z_{64}^x = c_5s_6$, $z_{64}^y = s_5s_6$. Здесь повторно использованы выписанные в задаче 1 формулы вычисления НК осей ССК(6) в ССК(2).

Для $i = 2$ имеем $\bar{q}_2 = 0$. Тогда по формуле (5) $\bar{\eta}_{61} = \bar{\eta}_{62}$.

Для $i = 1$ имеем $\bar{q}_1 = \bar{y}_1$ и $\bar{\eta}_{60} = (c_1\eta_{61}^x + s_1\eta_{61}^z, \eta_{61}^y, -s_1\eta_{61}^x + c_1\eta_{61}^z)$, т. е.

$$\begin{aligned} y_{60}^x &= c_1y_{61}^x + s_1y_{61}^z = -c_1c_3s_5 + s_1s_3s_5 = \\ &= -(c_1c_3 - s_1s_3)s_5, y_{60}^y = y_{61}^y = c_5, \\ y_{60}^z &= -s_1y_{61}^x + c_1y_{61}^z = s_1c_3s_5 + c_1s_3s_5 = \\ &= (s_1c_3 + c_1s_3)s_5. \end{aligned}$$

Используя тригонометрические формулы косинуса и синуса суммы двух углов, получим:

$$c_{13} = \cos(q_1 + q_3) = c_1c_3 - s_1s_3, s_{13} = \sin(q_1 + q_3) = s_1c_3 + c_1s_3.$$

Следовательно, $y_{60}^x = -c_{13}s_5$, $y_{60}^y = c_5$, $y_{60}^z = s_{13}s_5$.

Задача 3. МС с ангулярной (в горизонтали) СК на рис. 3 имеет следующие выражения орт КП через орты ССК: $\bar{q}_1 = \bar{y}_1$, $\bar{q}_2 = \bar{y}_2$, $\bar{q}_3 = \bar{y}_3$, $\bar{p}_4 = -\bar{y}_4$, $\bar{q}_5 = \bar{z}_5$, $\bar{q}_6 = \bar{y}_6$.

Выписать проекции орта \bar{y}_6 на оси НСК.

Повторно используя формулы (9) для МС на рис. 3 получим:

$$\bar{y}_{62} = (y_{62}^x, y_{62}^y, y_{62}^z) = (-c_3s_5, c_5, s_3s_5).$$

Для $i = 2$ имеем $\bar{q}_2 = \bar{y}_2$. Тогда по формуле (7) выпишем:

$$y_{61}^x = c_2y_{62}^x + s_2y_{62}^z = -c_2c_3s_5 + s_2s_3s_5 = -(c_2c_3 - s_2s_3)s_5 = -c_{23}s_5,$$

где $c_{23} = c_2c_3 - s_2s_3 = \cos(q_2 + q_3)$; $y_{61}^y = y_{62}^y = c_5$;
 $y_{61}^z = -s_2y_{62}^x + c_2y_{62}^z = s_2c_3s_5 + c_2s_3s_5 = (s_2c_3 + c_2s_3)s_5 = s_{23}s_5$,
 где $s_{23} = s_2c_3 + c_2s_3 = \sin(q_2 + q_3)$.
 Для $i = 1$ имеем $\bar{q}_1 = \bar{y}_1$. Тогда по формуле (7) выпишем:
 $y_{60}^x = c_1y_{61}^x + s_1y_{61}^z = -c_1c_{23}s_5 + s_1s_{23}s_5 = -(c_1c_{23} - s_1s_{23})s_5 = -c_{123}s_5$,
 где $c_{123} = c_1c_{23} - s_1s_{23} = \cos(q_1 + q_2 + q_3)$; $y_{60}^y = y_{61}^y = c_5$;
 $y_{60}^z = -s_1y_{61}^x + c_1y_{61}^z = s_1c_{23}s_5 + c_1s_{23}s_5 = (s_1c_{23} + c_1s_{23})s_5 = s_{123}s_5$,
 где $s_{123} = s_1c_{23} + c_1s_{23} = \sin(q_1 + q_2 + q_3)$. Таким образом,
 $y_{60}^x = -c_{123}s_5$, $y_{60}^y = c_5$, $y_{60}^z = s_{123}s_5$.

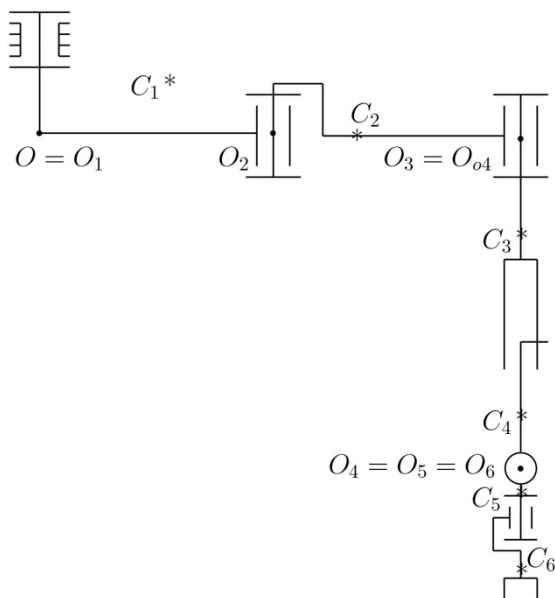


Рис. 3. МС с ангулярной СК (в горизонтали)
 Fig. 3. MS with angular CS (horizontal)

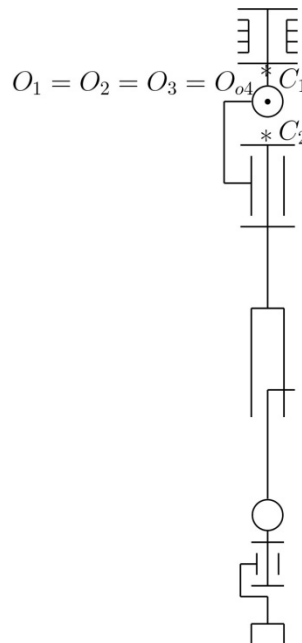


Рис. 4. МС со сферической СК
 Fig. 4. MS with spherical CS

Задача 4. Портальная МС со сферической СК на рис. 4 имеет следующие выражения орт КП через орты ССК: $\bar{q}_1 = \bar{y}_1$, $\bar{q}_2 = \bar{z}_2$, $\bar{q}_3 = \bar{y}_3$, $\bar{p}_4 = -\bar{y}_4$, $\bar{q}_5 = \bar{z}_3$, $\bar{q}_6 = \bar{y}_5$.

Выписать проекции орта \bar{y}_6 на оси НСК.

Повторно используя формулы (9) для МС на рис. 4 получим:

$$\bar{y}_{62} = (y_{62}^x, y_{62}^y, y_{62}^z) = (-c_3s_5, c_5, s_3s_5).$$

Для $i = 2$ имеем $\bar{q}_2 = \bar{z}_2$. Тогда по формуле (8) выпишем:

$$y_{61}^x = c_2y_{62}^x - s_2y_{62}^y = c_2y_{62}^x - s_2c_5,$$

$$y_{61}^y = s_2y_{62}^x + c_2y_{62}^y = s_2y_{62}^x + c_2c_5, y_{61}^z = y_{62}^z = c_5.$$

Для $i = 1$ имеем $\bar{q}_1 = \bar{y}$. Тогда по формуле (7) выпишем:

$$y_{60}^x = c_1y_{61}^x + s_1y_{61}^z = c_1y_{61}^x + s_1c_5, y_{60}^y = y_{61}^y, y_{60}^z = -s_1y_{61}^x + c_1y_{61}^z = -s_1y_{61}^x + c_1c_5.$$

5. Таблицы значений НК

Значения НК осей ССК соседних КП являются простыми, т. е. для ВКП(j) они принадлежат множеству $\{0, 1, c_j, s_j, -s_j\}$. Очевидно, что для ВКП(j) простые значения НК можно взять из табл. 1.

Использование табл. 1 при выписывании формул вычисления НК упрощает выполнение первого шага, на котором всегда получаются простые значения НК. Например, если тело m_{o6} вращается вокруг оси $O_6\bar{y}_6$, то НК осей ССК(6) находятся в блоке $\bar{q}_j = \bar{y}_j$, где $j = 6$, т. е. $x_{65}^x = c_6$, $y_{65}^x = 0$, $z_{65}^x = s_6$ и т. д.

Простые направляющие косинусы

Таблица 1

The simple direction cosines

Table 1

	$\bar{q}_j = \bar{x}_j$			$\bar{q}_j = \bar{y}_j$			$\bar{q}_j = \bar{z}_j$		
	x_j	y_j	z_j	x_j	y_j	z_j	x_j	y_j	z_j
x_{j-1}	1	0	0	c_j	0	s_j	c_j	$-s_j$	0
y_{j-1}	0	c_j	$-s_j$	0	1	0	s_j	c_j	0
z_{j-1}	0	s_j	c_j	$-s_j$	0	c_j	0	0	1

При выписывании НК на втором шаге можно использовать табл. 2, в ячейках которой представлены простые значения НК или простые формулы их вычисления. Простые формулы следуют из общих формул (6)–(8) для $i = j - 1$.

Направляющие косинусы для двух поворотов

Таблица 2

The direction cosines for two turns

Table 2

	$\bar{q}_j = \bar{x}_j$			$\bar{q}_j = \bar{y}_j$			$\bar{q}_j = \bar{z}_j$		
	x_j	y_j	z_j	x_j	y_j	z_j	x_j	y_j	z_j
x_{j-2}	1	0	0	c_j	0	s_j	c_j	$-s_j$	0
y_{j-2}	0	$c_{j-1,j}$	$-s_{j-1,j}$	$s_{j-1}s_j$	c_{j-1}	$-s_{j-1}c_j$	$c_{j-1}s_j$	$c_{j-1}c_j$	$-s_{j-1}$
z_{j-2}	0	$s_{j-1,j}$	$c_{j-1,j}$	$-c_{j-1}s_j$	s_{j-1}	$c_{j-1}c_j$	$s_{j-1}s_j$	$s_{j-1}c_j$	c_{j-1}
x_{j-2}	c_{j-1}	$s_{j-1}s_j$	$s_{j-1}c_j$	$c_{j-1,j}$	0	$s_{j-1,j}$	$c_{j-1}c_j$	$-c_{j-1}s_j$	s_{j-1}
y_{j-2}	0	c_j	$-s_j$	0	1	0	s_j	c_j	0
z_{j-2}	$-s_{j-1}$	$c_{j-1}s_j$	$c_{j-1}c_j$	$-s_{j-1,j}$	0	$c_{j-1,j}$	$-s_{j-1,j}c_j$	$s_{j-1}s_j$	c_{j-1}
x_{j-2}	c_{j-1}	$-s_{j-1}c_j$	$s_{j-1}s_j$	$c_{j-1}c_j$	$-s_{j-1}$	$c_{j-1}s_j$	$c_{j-1,j}$	$-s_{j-1,j}$	0
y_{j-2}	s_{j-1}	$c_{j-1}c_j$	$-c_{j-1}s_j$	$s_{j-1}c_j$	c_{j-1}	$s_{j-1}s_j$	$s_{j-1,j}$	$c_{j-1,j}$	0
z_{j-2}	0	s_j	c_j	$-s_j$	0	c_j	0	0	1

Табл. 2 состоит из девяти блоков (трех колонок с названиями $\bar{q}_j = \bar{x}_j$, $\bar{q}_j = \bar{y}_j$, $\bar{q}_j = \bar{z}_j$ и трех полос). В каждом блоке по девять ячеек, содержащих НК. Блоки отделены друг от друга двойными линиями. Для выбора нужного значения необходимо выбрать блок и в нем ячейку. Например, если тело m_{oj} вращается вокруг оси $O_j\bar{y}_j$, то нужный блок находится среди трех блоков в

колонке с заголовком $\bar{q}_j = \bar{y}_j$ таблицы (по вертикали). Если при этом тело m_{oj-1} вращается вокруг оси $O_{j-1}\bar{z}_{j-1}$, то искомым является последний блок этой колонки (блок в третьей полосе). Выбор ячейки в найденном блоке определяется по обозначению НК. Например, значение НК x_{jj-2}^z расположено на пересечении столбца x_j и строки z_{j-2} найденного блока.

В табл. 2 приняты обозначения: $s_{jj-1} = \sin(q_j + q_{j-1})$, $c_{jj-1} = \cos(q_j + q_{j-1})$.

Задача 5. Ангулярная (в вертикали) МС на рис. 5 имеет следующие выражения орт КП через орты ССК: $\bar{q}_1 = \bar{y}_1$, $\bar{q}_2 = \bar{z}_2$, $\bar{q}_3 = \bar{z}_3$, $\bar{q}_4 = \bar{y}_4$, $\bar{q}_5 = \bar{z}_5$, $\bar{q}_6 = \bar{y}_6$.

Выписать формулы вычисления НК $y_{51}^x, y_{51}^y, y_{51}^z$.

Для $j = 5$ имеем $\bar{q}_5 = \bar{z}_5$. Следовательно, по табл. 1 получим:

$$y_{54}^x = -s_5, y_{54}^y = c_5, y_{54}^z = 0.$$

Для $i = 4$ имеем $\bar{q}_4 = \bar{y}_4$. Следовательно, нужный блок расположен в последней колонке ($\bar{q}_j = \bar{z}_j$) и средней полосе табл. 2. Искомые НК находятся в столбце \bar{y}_j , т. е.

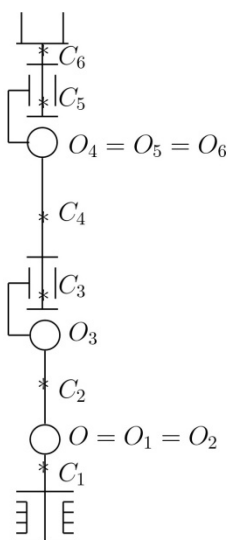


Рис. 5. Ангулярная СК
Fig. 5. Angular CS

$$y_{53}^x = -c_4 s_5, y_{53}^y = c_5, y_{53}^z = s_4 s_5.$$

Для $i = 3$ имеем $\bar{q}_3 = \bar{z}_3$. Тогда по формуле (8) выпишем:

$$y_{52}^x = c_3 y_{53}^x - s_3 y_{53}^y = c_3 y_{53}^x - s_3 c_5, y_{52}^y = s_3 y_{53}^x + c_3 y_{53}^y = s_3 y_{53}^x + c_3 c_5, y_{52}^z = y_{53}^z.$$

Для $i = 2$ имеем $\bar{q}_2 = \bar{z}_2$. Тогда по формуле (8) выпишем:

$$y_{51}^x = c_2 y_{52}^x - s_2 y_{52}^y = c_2 (c_3 y_{53}^x - s_3 c_5) - s_2 (s_3 y_{53}^x + c_3 c_5) =$$

$$= (c_2 c_3 - s_2 s_3) y_{53}^x - (c_2 s_3 + s_2 c_3) c_5 = c_{23} y_{53}^x - s_{23} c_5,$$

$$y_{51}^y = s_2 y_{52}^x + c_2 y_{52}^y = s_2 (c_3 y_{53}^x - s_3 c_5) + c_2 (s_3 y_{53}^x + c_3 c_5) =$$

$$= (s_2 c_3 + c_2 s_3) y_{53}^x + (c_2 c_3 - s_2 s_3) c_5 = s_{23} y_{53}^x + c_{23} c_5, y_{51}^z = y_{52}^z,$$

где $c_{23} = c_2 c_3 - s_2 s_3 = \cos(q_2 + q_3)$; $s_{23} = s_2 c_3 + c_2 s_3 = \sin(q_2 + q_3)$.

$$\text{Таким образом, } \bar{y}_{51} = (c_{23} y_{53}^x - s_{23} c_5, c_{23} c_5 - s_{23} y_{53}^x, y_{53}^z).$$

6. Автоматическое выписывание НК

Выписанные НК для различных универсальных МС являются или простыми, как в табл. 1, или вычисляются по простым формулам, как в табл. 2, или представляются суммой произведений двух величин, как в формулах (6)–(8). То есть НК являются регулярными выражениями, содержащими минимальное число арифметических операций. Для автоматического выписывания таких математических выражений можно использовать методику, описанную в статьях [17–19].

Заключение

Предложенный формализм ручного и автоматического выписывания формул вычисления НК осей ССК тел МС используется не только для решения задач статики МС, но в основном в процессах выписывания уравнений динамики МС и решения второй задачи динамики методом построения степенных рядов времени. Следует также отметить, что через НК выражаются известные параметры описания ориентации тела в пространстве, например, углы Эйлера и Брайнта, параметры Родрига – Гамильтона и Кейли – Клейна, кватернионы и бикватернионы [20]. Поэтому запись математических моделей МС в НК позволяет перейти к записи этих моделей в перечисленных параметрах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-41-740019).

Литература

1. Anderson, C. *Makers: The New Industrial Revolution* / C. Anderson. – Publisher: Crown Business, 2016. – 257 p.
2. Jordan, J.M. *Robots*. / J.M. Jordan. – Publisher: The MIT Press, 2016. – 274 p.
3. Miller, R. *Robots and Robotics: Principles, Systems, and Industrial Applications* / Rex Miller, Mark R. Miller. – Publisher: McGraw-Hill Education, 2017 – 400 p.
4. Boschetti, G. *Novel Kinematic Directional Index for Industrial Serial Manipulators*. / Giovanni Boschetti // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10 (17), 5953. DOI: 10/3390/app10175953
5. Alwan, H.M. *Singularity Analysis of Parallel Robot with Six Degrees-Of-Freedom of Six Legs* / H.M. Alwan, H.S. Ahmed // *Eng & Tech. Journal*. – 2014. – Vol. 32, part (A), no. 4. – P. 960–972.
6. Alwan, H.M. *Path Tracking Simulation of a Wheeled Mobile Robot with Three Mecanum Wheels* / H.M. Alwan // *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*. – 2020. – Vol. 14, no. 8. – P. 516–522.
7. Alwan, H.M. *Solution of Inverse and Forward Kinematics Problems for Mobile Robot with Six Mecanum Wheels* / H.M. Alwan, A.N. Volkov, A. Shbani // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – P. 1–11. DOI: 10.1088/1757-899X/1094/1/012071
8. Trung, T.T. *A Techniques to Downgrade Objective Function in Parallel Robot Kinematics Problem* / T.T. Trung, L.W. Guang, P.T. Long // *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. – 2015. – Vol. 4, no. 3. –P. 186–195.
9. Seibel, A. *On the Direct Kinematics Problem of Parallel Mechanism* / A. Seibel, S. Schulz, J. Schlattmann // *Hindawi Journal of Robotics*. – 2018. – Article ID 2412608. – 9 p.
10. Faugère, J.-C. *On solving the direct kinematics problem for parallel robots* / J.-C. Faugère, J.-P. Merlet, F. Rouillier // *Research Report RR-5923*. – 2006. – 21 p.

11. Momani, S. *Solution of Inverse Kinematics Problem using Genetic Algorithms* / S. Momani, Z.S. Abo-Hammour, O. Ahmadi // *Applied Mathematics & Information Sciences*. – 2016. – Vol. 10 (1). – P. 1–9.
12. Zhuang, H.-C. *Analysis Method of Articulated Torque of Heavy-Duty Six-Legged Robot under Its Quadrangular Gait* / H.-C. Zhuang, H.-B. Gao, Z.-Q. Deng // *Applied Sciences*. – 2016. – Vol. 6 (11), 323. DOI: 10.3390/app6110323
13. Smeresky, B. *Kinematics: On Direction Cosine Matrices* / B. Smeresky, A. Rizzo // *IntechOpen*. – 2019. – 15 p.
14. Журавлев, В.Ю. *Основы теоретической механики* / В.Ю. Журавлев. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
15. Челноков, Ю.Н. *Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения* / Ю.Н. Челноков. – М.: Физматлит, 2006. – 512 с.
16. Лурье, А.И. *Аналитическая механика* / А.И. Лурье. – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.
17. Телегин, А.И. *Метод автоматического выписывания выражений математической модели системы из общего вида математической модели класса систем* / А.И. Телегин, М.И. Кайгородцев, Д.И. Читалов // *Сборник научных трудов «Ракетодинамика. Энергетика. Информатика»*. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 162–184.
18. Кайгородцев, М.И. *XML-ориентированная программа выписывания математического выражения* / М.И. Кайгородцев // *Сборник научных трудов «Ракетодинамика. Энергетика. Информатика»*. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 191–199.
19. Телегин, А.И. *Программно-методический комплекс для автоматического выписывания математических моделей плоских шарнирных механизмов* / А.И. Телегин, М.И. Кайгородцев // *Сборник научных трудов «Ракетодинамика. Энергетика. Информатика»*. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 200–219.
20. Голубев, Ю.Ф. *Основы теоретической механики* / Ю.Ф. Голубев. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 720 с.

Пудовкина Светлана Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и ракетодинамики, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, г. Миасс; pudovkinasg@susu.ru.

Телегин Александр Иванович, д-р. физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры автоматки, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, г. Миасс; teleginai@susu.ru.

Поступила в редакцию 28 апреля 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210305

WRITING OUT OF FORMULAS FOR CALCULATING FORCES IN THE JOINTS OF MANIPULATORS IN STATICS

S.G. Pudovkina, pudovkinasg@susu.ru,

A.I. Telegin, teleginai@susu.ru

South Ural State University, Miass, Russian Federation

The problem of bulkiness of mathematical models of manipulative systems of industrial robots is solved. Here we consider formulas for calculating static reactions in joints and formulas for active forces that balance the forces of gravity acting on the manipulator's bodies in its stationary state. The manipulator can be in such a state when it is before capturing the object of manipulation and releasing it, or when it is performing some assembly operations, or it is during spot welding and

in slow (quasi-static) arc-welding and painting processes. Aim. The aim is to derive general recurrence and finite formulas for calculating the reaction forces in joints and their projections to the axes of the coordinate system rigidly connected with the selected body. Express the formulas of force projections in terms of guiding cosines and justify their optimality in terms of the minimum of arithmetic operations. Derive general inverse recurrence formulas for writing out the guide cosines of the axes associated with the moving bodies of the coordinate system with respect to the stationary coordinate system. **Research methods.** The methods of research relate to vector mechanics and systems analysis, and the algorithmization of calculations by reducing them to the use of recurrent formulas. **Results.** A systematic analysis of general formulas, in which all possible regular expressions are highlighted which are corresponding unambiguously to the kinematic parameters of manipulators, is performed. These regular expressions are used in software for analytical modeling of manipulator, in particular, for the analytical solution of problems of statics of a manipulator. The method of analytical verification of the prescribed formulas is described. The tasks of writing out optimal formulas for calculating the projections of static reaction forces in joints have been solved. And the tasks of writing out optimal formulas for calculating active forces in progressive joints of universal manipulators with six degrees of freedom, operating in Cartesian, cylindrical, spherical and angular coordinate systems, have been solved also. Analytical verification of the derived equations of statics is performed. Examples of the reuse of the derived formulas for manipulators with the same kinematic schemes of their subsystems. **Conclusion.** Expressions of the equations of statics of manipulators through the guide cosines of the axes of the associated coordinate systems of their bodies allow us to write these equations through the known parameters of body orientation. The recurrent formulas for calculating directional cosines allows to use recursive functions in their software implementation, i.e. to increase the computational efficiency of the software.

Keywords: driving forces, forces of reaction, static problems, direction cosines, verification of formulas, regular expressions, optimization of calculations.

References

1. Anderson C. *Makers: The New Industrial Revolution*. Publisher: Crown Business, 2012. 257 p.
2. John M. Jordan. *Robots*. Publisher: The MIT Press, 2016. 274 p.
3. Rex Miller, Mark R. Miller. *Robots and Robotics: Principles, Systems, and Industrial Applications*. Publisher: McGraw-Hill Education, 2017. 400 p.
4. Giovanni Boschetti. Novel Kinematic Directional Index for Industrial Serial Manipulators. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10 (17), 5953. DOI: 10/3390/app10175953
5. Hassan M. Alwan, Hyder Sabah Ahmed. Singularity Analysis of Parallel Robot with Six Degrees-Of-Freedom of Six Legs. *Eng. & Tech. Journal*, 2014, vol.32, part (A), no. 4, pp. 960–972.
6. Hassan M. Alwan. Path Tracking Simulation of a Wheeled Mobile Robot with Three Mecanum Wheels. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, 2020, vol. 14, no. 8, pp. 516–522.
7. Hassan M. Alwan, A.N. Volkov, A. Shbani. Solution of Inverse and Forward Kinematics Problems for Mobile Robot with Six Mecanum Wheels. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, pp. 1–11. DOI: 10.1088/1757-899X/1094/1/012071
8. Trang Thanh Trung, Li Wei Guang, Pham Thanh Long. A Techniques to Downgrade Objective Function in Parallel Robot Kinematics Problem. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 186–195.
9. Arthur Seibel, Stefan Schulz, Josef Schlattmann. On the Direct Kinematics Problem of Parallel Mechanism. *Hindawi Journal of Robotics*, 2018, Article ID 2412608, 9 p.
10. Jean-Charles Faugère, Jean-Pierre Merlet, Fabrice Rouillier. On solving the direct kinematics problem for parallel robots. *Research Report RR-5923*, 2006, 21 p.
11. Shaher Momani, Zaer S. Abo-Hammour, Othman MK. Alsmadi. Solution of Inverse Kinematics Problem using Genetic Algorithms. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2016, vol. 10 (1), pp. 1–9.
12. Hong-Chao Zhuang, Hai-Bo Gao, Zong-Quan Deng. Analysis Method of Articulated Torque of Heavy-Duty Six-Legged Robot under Its Quadrangular Gait. *Applied Sciences*, 2016, vol. 6 (11), 323. DOI: 10.3390/app6110323
13. Brendon Smeresky, Alex Rizzo. Kinematics: On Direction Cosine Matrices. *IntechOpen*, 2019, 15 p.

14. Zhuravlev V.U. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki* [Foundations of theoretical mechanics]. 2nd ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 320 p.
15. Chelnokov Y.N. *Kvaternionnye i bikvaternionnye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya* [Quaternion and biquaternion models and methods of rigid body mechanics and their applications]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 512 p.
16. Lurie A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical mechanics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961. 824 p.
17. Telegin A.I., Kaigorodtsev M.I., Chitalov D.I. [The method of automatic writing out expressions of the mathematical model of a system from the general view of the mathematical model of a class of systems]. *Sbornik nauchnykh trudov "Raketodinamika. Energetika. Informatika"* [Collection of scientific papers "Rocket dynamics. Power engineering. Informatics"]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012, pp. 162–184. (in Russ)
18. Kaigorodtsev M.I. [XML-oriented program for writing out a mathematical expression]. *Sbornik nauchnykh trudov "Raketodinamika. Energetika. Informatika"* [Collection of scientific papers "Rocket dynamics. Power engineering. Informatics"]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012, pp. 191–199. (in Russ)
19. Telegin A.I., Kaigorodtsev M.I. [A software-methodical complex for automatic writing out of mathematical models of flat hinged mechanisms]. *Sbornik nauchnykh trudov "Raketodinamika. Energetika. Informatika"* [Collection of scientific papers "Rocket dynamics. Power engineering. Informatics"]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2012, pp. 200–219. (in Russ)
20. Golubev U.F. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki* [Foundations of theoretical mechanics]. Publishing house of Moscow State University, 2000. 720 p.

Received 28 April 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Пудовкина, С.Г. Выписывание формул вычисления сил в сочленениях манипуляторов в статике / С.Г. Пудовкина, А.И. Телегин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 47–58. DOI: 10.14529/ctcr210305

FOR CITATION

Pudovkina S.G., Telegin A.I. Writing out of Formulas for Calculating Forces in the Joints of Manipulators in Statics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 47–58. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210305

ON ONE PROBLEM OF CONTROL OF VOLTAGE DURING SIGNAL TRANSMISSION IN A LONG LINE

N.D. Livanov, nikita.livanov.mail@gmail.com,

V.I. Ukhobotov, ukh@csu.ru

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation

This article discusses the problem of controlling the process of electromagnetic oscillations in a long-distance transmission line. A long line is understood as an electrical line formed, in the simplest case, by two parallel current conductors, the length of which exceeds the wavelength of the transmitted electromagnetic waves, and the distance between the conductors is much less than the wavelength. Such a line is characterized by four distributed parameters, namely the ohmic resistance of the conductor, inductance, electrical capacity and leakage coefficient. A signal generator is connected to the left end of the line, and the right is grounded, but not of high quality. When transmitting a signal, the current and voltage make small oscillation. The control is the voltage at the left end of the long line, and the disturbance voltage at the right end, the values of which are limited. The boundaries of their permissible values are set. The magnitude of the aggregate of external disturbances acting on the conductor is not known exactly, but only its variation limits are given.

Aim. The purpose of the control process is that at a given moment in time, the average value of the voltage value is in a given interval. This average is calculated using the specified function.

Materials and methods. To solve the problem, the method of optimizing the guaranteed result was applied. **Results.** A transition was made to a new one-dimensional variable, with the help of which the considered problem was reduced to a control problem of the same type in the presence of interference. This made it possible to find the necessary and sufficient conditions under which it is possible to achieve the set goals with any admissible set of external forces and interference at the right end. A corresponding algorithm for constructing the law of voltage change at the left end of the conductor is proposed. An example is analyzed that clearly shows how management is built that guarantees the achievement of the set goal. **Conclusion.** If the found necessary and sufficient conditions are fulfilled, then it is always possible to construct such a law of voltage variation at the left end, which will lead to the achievement of the goal for any admissible interference.

Keywords: control, telegraph equations, guaranteed result, interference, long-distance transmission line.

Introduction

In the study of controlled processes of electromagnetic oscillations in long lines with distributed parameters, mathematical problems of control of hyperbolic equations arise [1–7]. There are problems of controlling the signal transmission process when the exact value of external influences is not known, in practice. External disturbances that generate travelling wave in the lines distort the transmitted signal. When studying problems of this kind, you can apply the method of optimizing the guaranteed result [8]. This method is based on the theory of differential games [9].

In this paper, we consider the problem when the control is the limited in magnitude voltage of the signal generator at the left end of the long line. The interference consists of external disturbances and limited voltage at the right end of the conductor. The exact value of the magnitude of the external disturbance acting on the conductor is not known. Its limits of change are known. The purpose of the control process is that at a given moment in time the average value of the voltage value is in a given interval. The average is calculated using the specified function. The problem is reduced to a control problem of the same type in the presence of interference by changing the variable. For problems that are considered in the theory of differential games, optimal controls of the players are constructed [10].

Formulation of the problem

Consider a homogeneous, long line length is equal to l with a given resistance R , inductance L , electrical capacity C , leakage factor G [11]. The signal generator is at the left end of the line, and the right

end of the conductor is grounded. When transmitting a signal in a long-distance transmission line, the current in the wires is not the same in different sections of the line. It causes a voltage drop in the active resistance of the wires and creates an alternating magnetic field, which in turn induces self-induction EMF along the entire line. Therefore, the voltage between the wires also does not remain constant along the line [12, 13].

Let's associate a coordinate system with a long line, the X axis of which is directed along the wire. The densities of the aggregate of external disturbances on current and voltage are given by continuous functions $f_i(t, x)$, $i = 1, 2$, where we assume x – abscissa of a certain cross-section of the conductor when the long line is at rest. We denote $J(t, x)$ change in the current and $V(t, x)$ voltage of the line at the time t . The control is limited and is the voltage at the left end of the long line. The system of differential equations describing voltage and current fluctuations takes the form of telegraph equations [14].

$$\begin{cases} \frac{\partial J(t, x)}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} - \frac{R}{L} J(t, x) + f_1(t, x), \\ \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} = -\frac{1}{C} \frac{\partial J(t, x)}{\partial x} - \frac{G}{C} V(t, x) + f_2(t, x), \end{cases} \quad (1)$$

where $x \in [0, l]$, $t \in [0, p]$.

This system of equations is considered under the given initial conditions

$$J(0, x) = g_1(x), V(0, x) = g_2(x), \quad (2)$$

where the functions $g_i(x)$, $i = 1, 2$ are continuous on the segment $[0, l]$. By condition, the voltage at the ends of the line is limited. Therefore, they can be written as

$$V(t, l) = \lambda_1(t) - \alpha_1(t)\eta, |\eta| \leq 1, \alpha_1(t) \geq 0, \quad (3)$$

$$V(t, 0) = \lambda_2(t) - \alpha_2(t)\xi, |\xi| \leq 1, \alpha_2(t) \geq 0. \quad (4)$$

The parameter ξ is a control, and η is a interference.

We assume that the densities $f_i(x, t)$ of the magnitudes of external disturbances are not exactly known. The following estimates are known

$$\bar{f}_i(t, x) \leq f_i(t, x) \leq \underline{f}_i(t, x), i = 1, 2, x \in [0, l], t \in [0, p]. \quad (5)$$

Where $\bar{f}_i(t, x): [0, p] \times [0, l] \rightarrow \mathbb{R}$, and $\underline{f}_i(t, x): [0, p] \times [0, l] \rightarrow \mathbb{R}$ are continuous functions.

Let's set the number $k \in \mathbb{R}$, $\varepsilon \geq 0$. The purpose of the choice of control ξ (4) is to implement the inequality

$$\left| \int_0^l (V(p, x)\sigma_1(x) + J(p, x)\sigma_2(x)) dx - k \right| \leq \varepsilon \quad (6)$$

for any realization of external disturbances, the density of which satisfies the condition (5). Here the functions $\sigma_i: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, 2$ are continuous and satisfy the conditions

$$\sigma_i(0) = \sigma_i(l) = 0. \quad (7)$$

Formalization of the problem

Let us describe the admissible rule for the formation of control ξ (4). It means that each moment of time $0 \leq \vartheta < p$ and each possible function $V(\vartheta, x)$, $J(\vartheta, x)$ is assigned a function $\xi: [\vartheta, p] \rightarrow [0, 1]$. This rule will be denoted

$$\xi(t) = \mathcal{N}(t, V(\vartheta, \cdot), J(\vartheta, \cdot)), t \in [\vartheta, p]. \quad (8)$$

We fix the partition of the segment $[0, p]$

$$\omega: 0 < t_0 < t_1 < \dots < t_j < t_{j+1} < \dots < t_{m+1} = p,$$

where a diameter $d(\omega) = \max_{0 \leq j \leq p} (t_{j+1} - t_j)$. Let us fix control (8), the density of external disturbances $f_i(t, x)$ at $x \in [0, l]$, $0 \leq t \leq p$. Let us construct solutions $V_\omega(t, x)$, $J_\omega(t, x)$ $0 \leq x \leq l$, $0 \leq t \leq p$, to problem (1)–(3).

Assume $g_{i0}(x) = g_i(x)$, $i = 1, 2$ at $0 \leq x \leq l$. The functions $V_\omega(x, t)$ и $J_\omega(t, x)$ at $t_0 \leq t \leq t_1$, $0 \leq x \leq l$ are defined as a solution to the following problem:

$$\begin{cases} \frac{\partial J_\omega(t_j, x)}{\partial t} = -\frac{1}{L} \frac{\partial V_\omega(t_j, x)}{\partial x} - \frac{R}{L} J_\omega(t_j, x) + f_1(t_j, x), \\ \frac{\partial V_\omega(t_j, x)}{\partial t} = -\frac{1}{C} \frac{\partial J_\omega(t_j, x)}{\partial x} - \frac{G}{C} V_\omega(t_j, x) + f_2(t_j, x), \end{cases} \quad (9)$$

$$J_\omega(t_j, x) = g_{1j}(x), V_\omega(t_j, x) = g_{2j}(x), \quad (10)$$

$$V_\omega(t, 0) = \lambda(t) - \alpha(t)\xi, V_\omega(t, l) = 0, \quad (11)$$

$$\xi_i = \mathcal{N}(t, V_\omega(\vartheta, \cdot), J_\omega(\vartheta, \cdot)). \quad (12)$$

Where $j = 0, x \in [0, l], t \in [t_0, t_1]$.

Let the functions $V_\omega(x, t), J_\omega(t, x)$ be defined for $t_0 \leq t \leq t_{i-1}, 0 \leq x \leq l$. Suppose $g_{1j}(x) = J_\omega(t_{j-1}, x), g_{2j}(x) = V_\omega(t_{j-1}, x)$. We construct the functions $V_\omega(t, x), J_\omega(t, x)$ at $t_{j-1} \leq t \leq t_j$ using formulas (9)–(12).

We say that control (8) guarantees the fulfillment of the set goal (6) if for any number $w > \varepsilon$ there is a number $\rho > 0$ such that for any partition ω with diameter $d(\omega) < \rho$ and for any continuous functions $f_i(t, x)$, satisfying the condition (5), the inequality

$$\left| \int_0^l (V_\omega(p, x)\sigma_1(x) + J_\omega(p, x)\sigma_2(x)) dx - k \right| \leq w. \quad (13)$$

Transition to a one-dimensional problem

Let the functions $\psi(\tau, x), \varphi(\tau, x)$ at $0 \leq x \leq l, 0 \leq \tau \leq p$ be a solution to the following problem:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(\tau, x)}{\partial \tau} = \frac{1}{L} \frac{\partial \psi(\tau, x)}{\partial x} - \frac{G}{C} \varphi(\tau, x), \\ \frac{\partial \psi(\tau, x)}{\partial \tau} = \frac{1}{C} \frac{\partial \varphi(\tau, x)}{\partial x} - \frac{R}{L} \psi(\tau, x). \end{cases} \quad (14)$$

$$\varphi(\tau, 0) = 0, \varphi(\tau, l) = 0, 0 \leq \tau \leq p, \quad (15)$$

$$\varphi(0, x) = \sigma_1(x), \psi(0, x) = \sigma_2(x), 0 \leq x \leq l. \quad (16)$$

It follows from equality (7) that the matching conditions at the ends of the segment are satisfied.

From equalities (5) we obtain that

$$\int_0^l f_1(t, x) \psi(p-t, x) dx = \beta_1(t) + \gamma_1(t)\eta_1, |\eta_1| \leq 1, \quad (17)$$

$$\int_0^l f_2(t, x) \varphi(p-t, x) dx = \beta_2(t) + \gamma_2(t)\eta_2, |\eta_2| \leq 1.$$

When at $i = 1, 2$

$$\beta_i(t) = \frac{1}{2} \int_0^1 (\bar{f}_i(t, x) + \underline{f}_i(t, x)) \psi(p-t, x) dx, \quad (18)$$

$$\gamma_i(t) = \frac{1}{2} \left| \int_0^1 (\bar{f}_i(t, x) - \underline{f}_i(t, x)) \psi(p-t, x) dx \right| \geq 0.$$

Suppose

$$\theta_\omega(t) = \int_0^l (J_\omega(t, x) \psi(p-t, x) + V_\omega(t, x) \varphi(p-t, x)) dx. \quad (19)$$

That

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_\omega(t) &= \int_0^l \left(\frac{\partial J_\omega(t, x)}{\partial t} \psi(p-t, x) + \frac{\partial V_\omega(t, x)}{\partial t} \varphi(p-t, x) \right) dx - \\ &- \int_0^l \left(J_\omega(t, x) \frac{\partial \psi(p-t, x)}{\partial \tau} + V_\omega(t, x) \frac{\partial \varphi(p-t, x)}{\partial \tau} \right) dx. \end{aligned}$$

Let us take into account equations (9), (14) and (17), (18). We get

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_\omega(t) &= \beta_1(t) + \gamma_1(t)\eta_1 + \beta_2(t) + \gamma_2(t)\eta_2 - \int_0^l \left(J_\omega(t, x) \frac{\partial \psi(p-t, x)}{\partial \tau} + V_\omega(t, x) \frac{\partial \varphi(p-t, x)}{\partial \tau} \right) dx + \\ &+ \int_0^l \left(\left(-\frac{1}{L} \frac{\partial V_\omega(t, x)}{\partial x} - a_2 J_\omega(t, x) \right) \psi(p-t, x) + \left(-\frac{1}{C} \frac{\partial J_\omega(t, x)}{\partial x} - b_2 V_\omega(t, x) \right) \varphi(p-t, x) \right) dx, \quad (20) \end{aligned}$$

at $t_j \leq t \leq t_{j+1}$.

Further, integrating by parts and taking into account the boundary conditions (11), (15), we obtain

$$\int_0^l \left(\frac{\partial V_\omega(t, x)}{\partial x} \psi(p-t, x) \right) dx = (\lambda_1(t) - \alpha_1(t)\eta) \psi(p-t, l) -$$

$$-(\lambda_2(t) - \alpha_2(t)\xi) \psi(p-t, 0) - \int_0^l \left(V_\omega(t, x) \frac{\partial \psi(p-t, x)}{\partial x} \right) dx,$$

$$\int_0^l \left(\frac{\partial J_\omega(t, x)}{\partial x} \varphi(p-t, x) \right) dx = - \int_0^l \left(J_\omega(t, x) \frac{\partial \varphi(p-t, x)}{\partial x} \right) dx.$$

From this and (20) it follows that at $t_j \leq t \leq t_{j+1}$,

$$\beta(t) = \beta_1(t) + \beta_2(t) + \lambda_1(t), \gamma(t) = \gamma_1(t) + \gamma_2(t) + \alpha_1(t) \geq 0,$$

$$v_j = \frac{\gamma_1(t)}{\gamma(t)} \eta_1 + \frac{\gamma_2(t)}{\gamma(t)} \eta_2 + \frac{\alpha_1(t)}{\gamma(t)} \eta, |v_j| \leq 1,$$

$$\dot{\theta}_\omega(t) = - \left| \frac{1}{L} \alpha_2(t) \psi(p-t, 0) \right| u_j + \gamma(t) v_j + \beta(t) + \frac{1}{L} \lambda_2(t) \psi(p-t, 0).$$

When

$$\xi = \text{sign} \left(\frac{1}{L} \alpha_2(t) \psi(p - t, 0) \right) u. \quad (21)$$

Suppose, that $\text{sign} 0 = 1$.

Denote

$$z_\omega(t) = \theta_\omega(t) + \int_t^p \left(\beta(r) + \frac{1}{L} \lambda_2(r) \psi(p - r, 0) \right) dr - k. \quad (22)$$

That for $t_j \leq t \leq t_{j+1}$,

$$\dot{z}_\omega(t) = -a(t)u_j + b(t)v_j, |u_i| \leq 1, |v_i| \leq 1. \quad (23)$$

Here it is denoted

$$a(t) = \left| \frac{1}{L} \alpha_2(t) \psi(p - t, 0) \right| \geq 0, b(t) = \gamma(t) \geq 0. \quad (24)$$

Further, taking into account condition (11) and formulas (19), (22), we rewrite inequality (13) in the following form:

$$|z_\omega(p)| \leq w. \quad (25)$$

Termination possibility conditions in a one-dimensional problem

Consider the one-dimensional problem (23), (25). Note that functions (24) are continuous. Let's build broken lines

$$z_\omega(t) = z_\omega(t_j) - \int_{t_j}^t a(r) dr u_j + \int_{t_j}^t b(r) dr v_j, t_j \leq t \leq t_{j+1}, \quad (26)$$

where $z_\omega(0) = z(0)$ is the initial condition. The family of these broken lines is uniformly bounded and equicontinuous, defined on the segment $[0, p]$ [10, p. 46]. By Arzela's theorem [15, p. 104] from any sequence of polygonal lines (26), one can select a subsequence that converges uniformly to the segment $[0, p]$.

Let in (26)

$$u_j = \text{sign } z_\omega(t_j), j = \overline{0, m}, \quad (27)$$

and the function $z(t)$ at $0 \leq t \leq p$ is the uniform limit of the polygonal sequence $z_{\omega_n}(t)$ (26), for which the diameter of the partition $d(\omega_n) \rightarrow 0$. Then [10, Theorem 8.1] the inequality

$$|z(p)| \leq F(z(0)).$$

Here it is denoted

$$F(z) = \max(|z| + \int_0^p (b(r) - a(r)) dr; \max_{0 \leq t \leq p} \int_t^p (b(r) - a(r)) dr).$$

Let the number $\varepsilon \geq F(z(0))$. Then it can be shown that for any number $w > \varepsilon$ there is a number $\delta > 0$ such that inequality (25) holds for any broken line (26) with the partition diameter $d(\omega) < \delta$ and control (27).

Let in (26)

$$v_j = \text{sign } z_\omega(t_j), j = \overline{0, m}, \quad (28)$$

and the function $z(t)$ at $0 \leq t \leq p$ is the uniform limit of a sequence of polygonal lines $z_{\omega_n}(t)$ (26), for which $d(\omega_n) \rightarrow 0$. Then [10, Theorem 8.2], the inequality

$$|z(p)| \geq F(z(0)).$$

From this it can be obtained that if the numbers $\varepsilon < w < F(z(0))$, then there exists a number $\delta > 0$ such that to $|z_\omega(p)| > w$, for any broken line $z_\omega(t)$ (26) with the partition diameter $d(\omega) < \delta$ and with v_j (28).

Thus, it is possible to construct control (8), which guarantees the fulfillment of the set goal (13) if and only if $F(z(0)) \leq \varepsilon$.

From formulas (21), (27) we obtain that

$$\xi = \text{sign} \left(z a_2(t) \int_0^t \psi(p - t, x) dx \right) u.$$

When z is defined by formulas (19) and (22) with given in (22) $V_\omega(x, t), J_\omega(t, x)$ on $V(t, x), J(t, x)$.

Example

Let the function

$$\sigma_2(x) = \frac{b^2}{\frac{1}{a^2} - \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right),$$

when

$$a = \frac{1}{\sqrt{LC}}, b = \frac{\sqrt{\frac{1}{4}(RC+GL)^2 - LRCC}}{LC},$$

then condition (7) is satisfied. Consider the function

$$\psi(\tau, x) = b^2 e^{-\frac{\sqrt{LC}(RC+GL)\tau}{2}} \left(\frac{1}{\frac{1}{a^2} - \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} \sin\left(\frac{\pi}{l}x\right) + \frac{1}{a^2-1} \sin(\tau) \right),$$

that satisfies Eq. (14) and conditions (15), (16). Substitute the function $\psi(x, \tau)$ into formula (19) at $V_\omega(x, t) = V(t, x)$. Then it follows from (22) that

$$z(t) = b^2 \int_0^l \left(V_\omega(t, x) e^{-\frac{\sqrt{LC}(RC+GL)(p-t)}{2}} \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{l}x\right)}{\frac{1}{a^2} - \left(\frac{\pi}{l}\right)^2} + \frac{\sin(p-t)}{a^2-1} \right) \right) dx + \\ + \int_t^p \left(\beta(r) + \frac{a_1 b^2}{a^2-1} \lambda(r) e^{-\frac{\sqrt{LC}(RC+GL)(p-r)}{2}} \sin(p-r) \right) dr - k.$$

Conclusion

The impact of interference on a long line leads to distortion of information, to a decrease in the quality of transmission and subsequent processing of data until the destruction of the communication lines themselves. However, it is possible to construct such a law of voltage variation at the left end, which will lead to the achievement of the goal with any admissible interference, with known estimates of the set of negative effects and the fulfillment of the necessary and sufficient conditions found. The analyzed example clearly demonstrates how the corresponding law of voltage change is constructed.

The research was funded by Russian Foundation for Basic Research and Chelyabinsk Region, project number 20-41-740027.

References

1. Osipov Yu.S., Oxezin S.P. [On the theory of positional control in hyperbolic systems]. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1977, vol. 233, no. 4, pp. 551–554. (in Russ.)
2. Lions J.-L. *Optimal'noye upravleniye sistemami, opisyyvayemyimi uravneniyami s chastnymi proizvodnymi* [The optimal control of systems described by partial differential equations]. Moscow, Mir Publ., 1972. 416 p.
3. Vasil'yev F.P. *Metody resheniya ekstremal'nykh zadach* [Methods for solving extreme problems]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 400. p.
4. Wu X., Yang X., Shen H., Zhou Q. Research on the Long-distance Transmission. *Energy and Power Engineering*, 2013, pp. 1293–1297. DOI: 10.4236/epe.2013.54B245
5. Dos Santos M.L., Jardini J.A., Casolari R.P. et al. Power Transmission Over Long Distances: Economic Comparison Between HVDC and Half-Wavelength Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, no. 29 (2), pp. 502–509. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2274333
6. Egorov A.I. [Elastic vibration control]. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Ser. Phys.-mat. and tech. sciences*, 1986, no. 5, pp. 60–63. (in Russ.)
7. Osipov Yu.S., Korotkiy A.I. [Dynamic modeling of parameters in hyperbolic systems]. *Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Tech. cybernetics*, 1991, no. 2, pp. 154–164. (in Russ.)
8. Krasovskiy N.N. *Upravleniye dinamicheskoy sistemoy* [Dynamic system control]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 520 p.
9. Krasovskiy N.N., Subbotin A.I. *Pozitsionnyye differentsial'nyye igry* [Positional differential games]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 456 p.
10. Ukhobotov V.I. *Metod odnomernogo proyektirovaniya v lineynykh differentsial'nykh igrakh s integral'nymi ogranicheniyami* [One-dimensional design method in linear differential games with integral constraints. Tutorial]. Chelyabinsk, Chelyabinsk State University Publ., 2005. 124 p.
11. Prasad Rao K.P., Srinivasa Varma P. Analysis of Very Long Distance AC Power Transmission Line. *Project: Power Systems*, 2019.
12. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepey* [Fundamentals of circuit theory. Textbook for universities]. Moscow, Energiya Publ., 1975, pp. 513–576.

13. Abhisek Ukil. Theoretical Analysis of Tuned HVAC Line for Low Loss Long Distance Bulk Power Transmission. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, no. 73 (4). DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.05.021

14. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Osnovnyye differentsial'nyye uravneniya matematicheskoy fiziki* [Basic differential equations of mathematical physics]. Moscow, Publishing house phys.-mat. literature, 1962. 768 p.

15. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 496 p.

Received 5 May 2021

УДК 517.977

DOI: 10.14529/ctcr210306

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ СИГНАЛА В ДЛИННОЙ ЛИНИИ

Н.Д. Ливанов, В.И. Ухоботов

Челябинский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В данной статье рассматривается задача управления процессом электромагнитных колебаний в длинной линии. Под длинной линией понимается электрическая линия, образованная в простейшем случае двумя параллельными проводниками тока, длина которых превышает длину волны передаваемых электромагнитных колебаний, а расстояние между проводниками значительно меньше длины волны. Подобная линия характеризуется четырьмя распределёнными параметрами, а именно омическим сопротивлением проводника, индуктивностью, ёмкостью и коэффициентом утечки. К левому концу линии подключен генератор сигнала, а правый заземлен, но некачественно. При передаче сигнала ток и напряжение совершают малые колебания. Управлением является напряжение на левом конце длинной линии, а помехой – напряжение на правом конце, величины которых ограничены. Границы их допустимых значений заданы. Величина совокупности внешних возмущений, действующих на проводник, точно не известна, а заданы только её границы изменения. **Цель исследования.** Цель процесса управления заключается в том, чтобы в заданный момент времени среднее значение величины напряжения находилось в заданном промежутке. Это среднее значение вычисляется с помощью заданной функции. **Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи был применен метод оптимизации гарантированного результата. **Результаты.** Был осуществлен переход к новой одномерной переменной, с помощью которой рассматриваемая задача была сведена к однотипной задаче управления при наличии помехи. Это позволило найти необходимые и достаточные условия, при выполнении которых можно осуществить поставленные цели при любой допустимой совокупности внешних возмущений и помехе на правом конце. Предложен соответствующий алгоритм построения закона изменения напряжения на левом конце проводника. Разобран пример, который наглядно показывает, как строится управление, гарантирующее достижение поставленной цели. **Заключение.** Если выполнены найденные необходимые и достаточные условия, то всегда можно построить такой закон изменения напряжения на левом конце, который приведет к достижению цели при любой допустимой помехе.

Ключевые слова: управление, телеграфные уравнения, гарантированный результат, помеха, длинная линия.

Литература

1. Осипов, Ю.С. *К теории позиционного управления в гиперболических системах* / Ю.С. Осипов, С.П. Охезин // Докл. АН СССР. – 1977. – Т. 233, № 4. – С. 551–554.

2. Лионс, Ж.-Л. *Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными* / Ж.-Л. Лионс. – М.: Мир, 1972. – 416 с.

3. Васильев, Ф.П. Методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука, 1981. – 400 с.
4. Research on the Long-distance Transmission / X. Wu, X. Yang, H. Shen, Q. Zhou // *Energy and Power Engineering*. – 2013. – P. 1293–1297. DOI: 10.4236/epe.2013.54B245
5. Power Transmission Over Long Distances: Economic Comparison Between HVDC and Half-Wavelength Line / M.L. dos Santos, J.A. Jardini, R.P. Casolari et al. // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2014. – No. 29 (2). – P. 502–509. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2274333
6. Егоров, А.И. Управление упругими колебаниями / А.И. Егоров // *ДАН УССР. Сер. физ.-мат. и техн. наук*. – 1986. – № 5. – С. 60–63.
7. Осипов, Ю.С. Динамическое моделирование параметров в гиперболических системах / Ю.С. Осипов, А.И. Короткий // *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика*. – 1991. – № 2. – С. 154–164.
8. Красовский, Н.Н. Управление динамической системой / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1985. – 520 с.
9. Красовский, Н.Н. Позиционные дифференциальные игры / Н.Н. Красовский, А.И. Субботин. – М.: Наука, 1974. – 456 с.
10. Ухоботов, В.И. Метод одномерного проектирования в линейных дифференциальных играх с интегральными ограничениями: учеб. пособие / В.И. Ухоботов. – Челябинск: Челябинский государственный университет, 2005. – 124 с.
11. Prasad Rao, K.P. Analysis of Very Long Distance AC Power Transmission Line / K.P. Prasad Rao, P. Srinivasa Varma // *Project: Power Systems*. – 2019.
12. Основы теории цепей: учеб. для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – С. 513–576.
13. Abhisek Ukil. Theoretical Analysis of Tuned HVAC Line for Low Loss Long Distance Bulk Power Transmission / Abhisek Ukil // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2015. – No. 73 (4). DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.05.021
14. Кошляков, Н.С. Основные дифференциальные уравнения математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 768 с.
15. Колмогоров, А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1972. – 496 с.

Ливанов Никита Дмитриевич, аспирант кафедры теории управления и оптимизации, Челябинский государственный университет, г. Челябинск; nikita.livanov.mail@gmail.com.

Ухоботов Виктор Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой теории управления и оптимизации, Челябинский государственный университет, г. Челябинск; ukh@csu.ru.

Поступила в редакцию 5 мая 2021 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Livanov, N.D. On One Problem of Control of Voltage during Signal Transmission in a Long Line / N.D. Livanov, V.I. Ukhobotov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 59–65. DOI: 10.14529/ctcr210306

FOR CITATION

Livanov N.D., Ukhobotov V.I. On One Problem of Control of Voltage during Signal Transmission in a Long Line. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 59–65. DOI: 10.14529/ctcr210306

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.396.969.18

DOI: 10.14529/ctcr210307

БЕЗЭХОВАЯ КАМЕРА, ВСТРАИВАЕМАЯ В ПОМЕЩЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.В. Аксёнов¹, А.А. Ларин², Н.В. Самбуров¹

¹ АО «Тайфун», г. Калуга, Россия,

² Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

Рассматриваются вопросы проектирования безэховых камер для антенных измерений определенного типа – встраиваемых в помещения промышленного назначения. Достоинством таких камер является положительный экономический эффект, связанный как со снижением издержек на строительные работы, так и с возможностью совместного использования вспомогательных систем помещения в процессе эксплуатации. Известные подходы к проектированию камер для антенных измерений основываются либо на обеспечении минимального уровня безэховости, либо минимальных габаритных размеров. В данном случае необходимо обеспечить компромисс между параметрами безэховости и габаритными размерами при обеспечении технологической доступности всей полезной площади помещения. **Целью** работы является обоснование формы и геометрических размеров камеры. **Методы исследования.** В процессе исследования использовались методы геометрической оптики. При обосновании формы камеры учитывались практические аспекты, а именно: распространенная форма помещений промышленного назначения и цехов, а также возможность эффективного использования пространственных радиопоглощающих материалов для покрытия камеры изнутри. В процессе нахождения оптимальных действующих геометрических размеров функционалами качества были приняты параметры безэховости и габариты. **Результаты.** Камера в форме прямоугольной трапеции является оптимальной для встраивания в помещения промышленного назначения. Найдены выражения для геометрических размеров камеры, обеспечивающей отсутствие отражений первого и второго порядка в рабочей зоне. Найдено оптимальное значение угла отклонения задней стенки безэховой камеры. **Заключение.** На основании вышеприведенной методики была реализована безэховая камера компактного полигона для антенных измерений.

Ключевые слова: компактный антенный полигон, радиопоглощающий материал, безэховая камера, коллиматор, отражение.

Введение

Для измерения параметров антенно-фидерных устройств и обтекателей широко используются так называемые компактные антенные полигоны, наиболее габаритной составляющей которых является безэховая камера (БЭК) [1]. Одним из вариантов существенного снижения себестоимости компактных полигонов является совместное использование полезной площади существующих помещений производственного назначения (ППН), а именно – встраивание полигона внутрь таких помещений. Достоинством такого варианта для организации полигонов является экономический эффект, связанный как со снижением издержек на строительные работы, так и с возможностью совместного использования вспомогательных систем помещения, таких как:

- системы экранировки;
- системы отопления и кондиционирования воздуха;
- устройства подъема и транспортировки грузов;
- системы пожаротушения.

Недостатком в этом случае являются ограничения, накладываемые размерами и геометрической формой помещения на реализуемые геометрические размеры и форму БЭК.

В зависимости от назначения количество радиопоглощающего материала (РПМ), необходимое для облицовки внутренней части БЭК, может достигать порядка сотен квадратных метров. Поэтому одним из определяющих факторов при выборе РПМ для камеры является его стоимость, что обосновывает использование материалов с компромиссными технико-экономическими показателями. Доступные на сегодняшний день широкополосные материалы имеют коэффициент отражения порядка 20...30 дБ (в зависимости от диапазона частот), что недостаточно для проведения измерений на компактных полигонах, так как величина УБЛ современных антенных устройств может доходить до 40...50 дБ. Форма камеры позволяет улучшить коэффициент безэховости, ограничиваемый для камер простой формы величинами коэффициентов поглощения и рассеяния РПМ.

Стоит заметить, что возможность применения аппаратных средств для снижения уровня безэховости (способы пространственно-временной селекции [2, 3]) ограничивается формой АЧХ испытуемых антенн. В дополнение к этому в ряде практических приложений, где необходимо сопоставление абсолютных ДН нескольких антенн, применение пространственно-временной селекции не корректно, так как в этом случае настройка временной области режекции должна производиться для каждой антенны отдельно. Это приводит к фактическому различию коэффициента передачи измерительных трактов для полезного сигнала, а значит, и к ошибкам восстановления абсолютных ДН антенн. Поэтому прямые (конструктивные) методы снижения уровня безэховости продолжают оставаться актуальными.

В [4] приводится безэховая камера в форме прямоугольной трапеции, встроенная в ППН. Целью статьи является обоснование формы и геометрических размеров камеры.

1. Форма камеры

Обычно качество БЭК оценивается коэффициентом безэховости ($K_{БЭ}$) в рабочей зоне. Коэффициент безэховости есть отношение полного потока мощности, рассеянного камерой ($P_{\text{расс}}$), к потоку мощности (P_0), пришедшему от излучателя: $K_{БЭ} = P_{\text{расс}}/P_0$. При этом предельное значение коэффициента ограничено неравенством

$$K_{БЭ} \leq p^n, \quad (1)$$

где p – коэффициент отражения по мощности материала покрытия стенок камеры; n – минимальное число переотражений не прямых лучей из зоны излучения в зону приема [5].

Знак в неравенстве (1) указывает, что величина $K_{БЭ}$ может ухудшаться за счет фактической зависимости величины p от угла падения волны на РПМ, непосредственно формы камеры, а также наличия различных паразитных эффектов (дифракция на краях коллиматорного зеркала, просачивание энергии от облучателя в рабочую зону и прочее).

Простейшей формой БЭК является прямоугольная [6], что удачно согласуется с общепринятой формой ППН. Однако из-за наличия в рабочей зоне отражений первого порядка ($n=1$) (от задней стенки) безэховость камеры будет ограничена величинами коэффициентов поглощения и рассеяния используемого РПМ.

В процессе развития техники и теории антенных измерений при построении БЭК большое внимание уделяли геометрической форме и конфигурации БЭК. Для компактных полигонов на основе коллиматорного зеркала известно два конструктивных направления снижения коэффициента безэховости камеры [7]:

- 1) выбор сложной формы поверхности (камеры с криволинейными либо ломаными профилями стен);
- 2) использование поверхности простой формы с профилированными элементами (например, профилирование экранами, вертикальными или горизонтальными гофрами, а также рассеивающими пирамидами различных форм и размеров).

Оба направления направлены на увеличение величины n и отличаются конструктивными способами перенаправления или рассеивания паразитной волны. Недостатками данных камер

являются: для первого случая – большие габаритные размеры и сложный конструктив, а во втором – конструкция камеры, содержащая локальные элементы сложной формы. Кроме локального утяжеления конструкции камеры присутствие профилированных элементов плохо согласовывается с формой РПМ (например – для РПМ пирамидального типа). Это приводит к повышенной конструктивной и технологической сложности покрытия кромок профилированных элементов распространенным (серийным) пирамидальным РПМ, нарушению его целостности и повышенному расходу.

Некоторым компромиссом является трапециевидальная форма камеры со скошенной задней стенкой, описанная в [4]. Отличие от известных камер – камер с наклонной задней стенкой и камеры с задней стенкой в виде наклонного клина [6] – заключается в следующем: отражение «прожекторного» луча происходит только в горизонтальной плоскости в одном направлении, а также отсутствует профилированный элемент (клин). Организация переотражения в горизонтальной плоскости позволяет снизить зависимость формы и конечного уровня безэховости камеры от высоты ППН, так как полезная высота помещения (с учетом организации совместного использования систем подъема и транспортировки грузов и систем отопления и кондиционирования) ограничена и значительно меньше ее ширины.

Таким образом, форма рассматриваемой камеры [4] обладает конструктивной простотой, позволяющей сохранить внешние габариты и не утяжелять конструкцию дополнительными элементами, а также обеспечивает возможность качественного покрытия внутренней поверхности РПМ. С помощью асимметрии формы камеры относительно фокальной оси коллиматорного зеркала обеспечивается снижение безэховости. При этом дополнительная часть площади ППН, необходимая для увеличения габаритов камеры, может быть использована для сквозного прохода (внутрицехового проезда) (рис. 1), а также перемещения антенных устройств внутрь БЭЖ для установки в рабочую зону (РЗ).

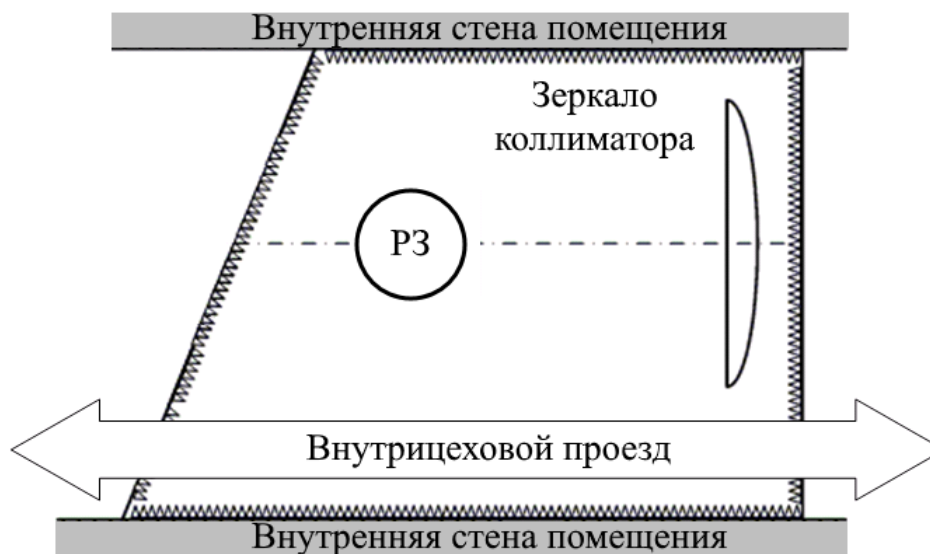


Рис. 1. Форма камеры и пример ее расположения в ППН
Fig. 1. Form and location option of the chamber

2. Действующие геометрические размеры камеры

Для обоснования действующих размеров рассмотрим ход лучей волны, переизлучаемой коллиматорным зеркалом в приближении геометрической оптики [7, 8]. На рис. 2 приводится геометрия задачи для камеры в области отражений 1-го и 2-го порядка.

Условные границы «прожекторного луча» обозначены штриховыми линиями, рабочая зона принята цилиндрической формы с радиусом основания $a/2$. Угол наклона задней стенки 1 относительно нормали к первичному коллиматорному фронту волны равен α . Стенка 2 параллельна направлению распространения коллиматорного фронта волны.

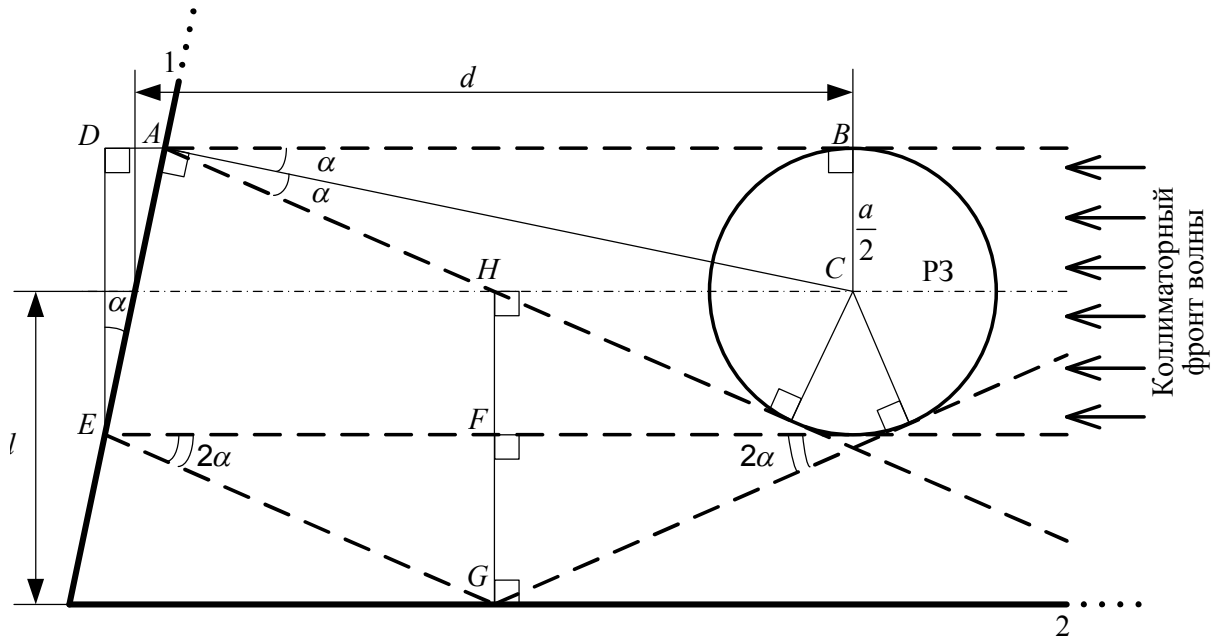


Рис. 2. Геометрия задачи
Fig. 2. Geometry of problem

Условие отсутствия отражений первого порядка

Искомый угол поворота задней стенки камеры α определяется на основе известного расстояния d до задней стенки 1 и размера рабочей зоны a , исходя из подобия треугольников ABC и ADE (см. рис. 2). Данный угол определяет отсутствие отражений первого порядка:

$$\alpha \geq \arctg\left(\frac{d - \sqrt{d^2 - a^2}}{a}\right). \quad (2)$$

Условие отсутствия отражений второго порядка

Камера имеет асимметрию относительно фокальной оси зеркала коллиматора, при которой выполняется условие отсутствия отражений второго порядка. Данная асимметрия определяется расстоянием l от оси коллиматора до дальней боковой стенки 2 как сумма длин двух отрезков HF и FG (см. рис. 2.).

Длина отрезка HF равна половине размера рабочей зоны a .

Длину FG определяем на основе известных параметров a , d и α как катет треугольника EFG .

В результате получаем

$$l \geq HF + FG = \frac{a}{2} + \operatorname{tg} 2\alpha \left(\frac{d}{2} + \frac{a}{2} \operatorname{tg} \alpha \right).$$

Таким образом, итоговое отсутствие отражений определяется следующей системой:

$$\begin{cases} \alpha \geq \arctg\left(\frac{d - \sqrt{d^2 - a^2}}{a}\right); \\ l \geq \frac{a}{2} \cos^{-1} 2\alpha + \frac{d}{2} \operatorname{tg} 2\alpha. \end{cases} \quad (3)$$

3. Критерий качества

Так как объектом исследования является безэховая камера, встраиваемая в ППН, то критерием качества можно принять параметры безэховости и габариты. В качестве критерия, характеризующего уровень безэховости камеры, будем использовать величину затухания плоской ЭМВ, формируемой зеркалом коллиматора, проникающей в рабочую зону после переотражений от

стен. То есть критерием является предельный коэффициент безэховости ($K_{БЭ}$) без учета дифракционных явлений от краев зеркала и других эффектов формирования плоского фронта волны коллиматорным зеркалом. Данный критерий качества может быть сформулирован на основе принципов геометрической оптики:

$$K = \prod_{i=1}^n p_i(\varphi_i),$$

где $p_i(\varphi)$ – функция коэффициента отражения РПМ для i -й поверхности от угла падения волны φ , а φ_i – угол падения на i -ю поверхность.

Рассмотрим случай, часто встречающийся на практике, когда материал покрытия стен используется одного вида – пирамидального, а соотношение высоты пирамид РПМ и длины волны соответствует рассеянию смешанного типа (зеркального и диффузионного).

Величина $p_i(\varphi_i)$ для известного φ_i может быть найдена из так называемой индикатрисы рассеяния РПМ ($p_i(\varphi)$). Однако информация об индикатрисе для конкретного РПМ либо труднодоступна для потребителя (покупателя), либо может отсутствовать вовсе. Организация практического измерения $p_i(\varphi)$ на образцах РПМ является обособленной технической задачей [6, 7], необходимость корректного решения которой для плоского фронта волны значительно усложняет техническую возможность реализации подобных измерений [9].

Рассмотрев параметры ряда известных РПМ [10, 11] и результаты моделирования [12], можно с приемлемой точностью положить, что форма индикатрисы рассеивания пирамидального РПМ соответствует (подчиняется) закону Ламберта. На основании этого можно найти зависимости $p_i(\varphi)$ для различных типов РПМ, причем для вышеописанной камеры: $n=3$, $\varphi_1 = \alpha$, $\varphi_2 = \varphi_3 = (\pi/2) - 2\alpha$, причем из условия $\varphi_i > 0$ следует, что $\alpha < \pi/4$.

На рис. 3 показаны результаты расчета зависимости $K(\alpha)$ для трех различных параметров РПМ (графики 1–3): затухание ЭМВ при нормальном падении ($p_i(0)$) соответственно: 20, 25, 30 дБ. Графики ограничены условием (2) для отношения $d/a < 5$, обоснованного практическими соображениями.

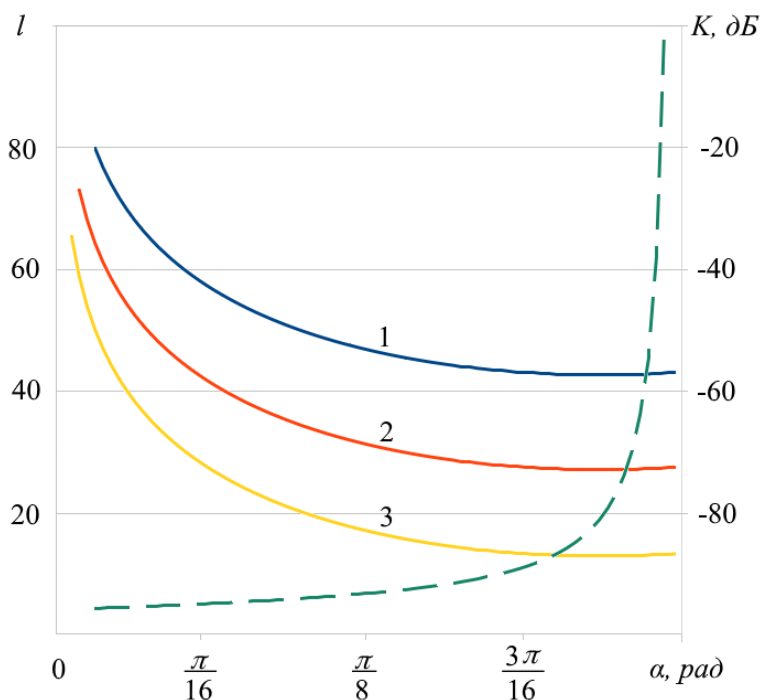


Рис. 3. График зависимостей $K(\alpha)$ и $I(\alpha)$

Fig. 3. Plot of $K(\alpha)$ and $I(\alpha)$

Величина $K(\alpha)$ имеет монотонно спадающую зависимость от α , при этом, начиная с области $\alpha \approx \alpha_0$ ($\alpha_0 = \pi/8$), величина K практически постоянна. На рис. 3 показана зависимость $l(\alpha)$, характеризующая поперечные габариты камеры для вышеприведенных условий. Зависимость $l(\alpha)$ является монотонно возрастающей, при этом до $\alpha \approx \alpha_0$ имеет относительно малые значения. Таким образом, при значении $\alpha \approx \alpha_0$ обеспечивается некий компромисс между уровнем безэховости и габаритными размерами камеры.

На рис. 4 показана зависимость $l_{\min}(d)$, нормированная к размеру рабочей зоны (a) для $\alpha = \alpha_0$. Данная зависимость может быть использована при обосновании оптимальных размеров БЭК рассматриваемой конструкции.

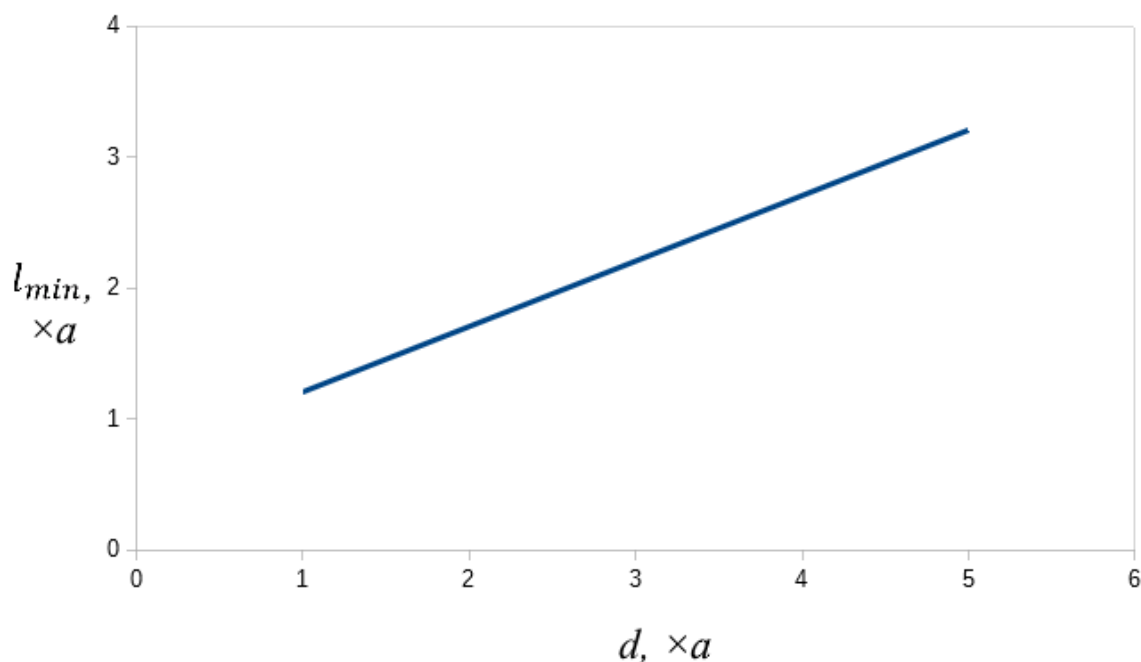


Рис. 4. Зависимость $l(a,d)$ для $\alpha = \alpha_0$

Fig. 4. Plot of $l(a,d)$ for $\alpha = \alpha_0$

Стоит отметить, что величины φ_i , полученные для условия $\alpha = \alpha_0$ при вышеприведенных допущениях на форму индикатрисы рассеяния, не превышают значений предельных углов падения для ряда распространенных пирамидальных РПМ [7, с. 47], что подтверждает практическую значимость исследования.

Заключение

Форма камеры была оптимизирована для встраивания в помещения промышленного назначения. Отличительной особенностью является простота конструкции и формы камеры (постоянное поперечное сечение), а также эффективное использование полезной площади помещения, вспомогательных систем и оборудования. Действующие размеры вышеописанной камеры могут быть определены по (3), при этом оптимальной можно считать величину $\alpha \approx \pi/8$.

На основании вышеприведенной методики была реализована безэховая камера (рис. 5) компактного полигона для антенных измерений [13].

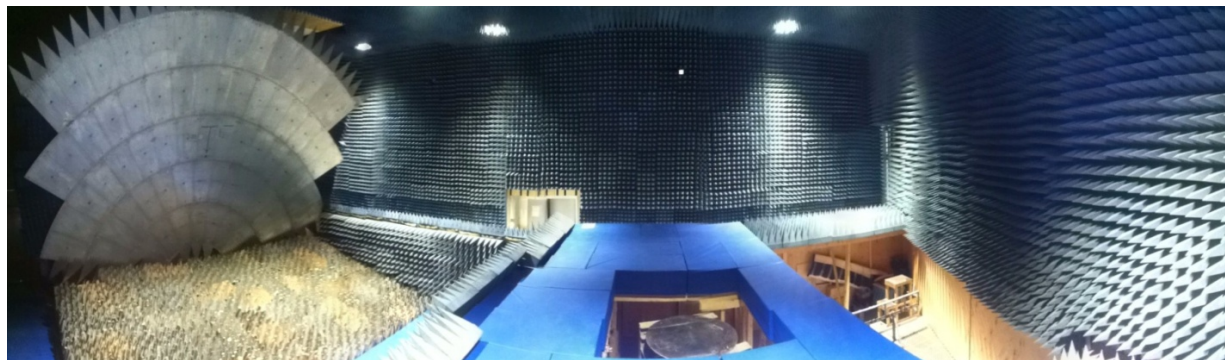


Рис. 5. Вид безэховой камеры изнутри [4]
Fig. 5. Inside view of chamber [4]

В данной камере была реализована описанная в [14] методика измерения параметров обтекателей для случая сверхмалых потерь, чувствительная к параметрам безэховости, а также успешно подтверждены результаты апробации методики дефектоскопии [15–17].

Литература

1. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчин и др.; под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
2. Николаев, П.В. Антенные измерения с использованием метода временной селекции / П.В. Николаев // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2013. – Вып. 10, т. 18. – С. 24–27.
3. Калинин, А.В. Многочастотные методики измерения характеристик антенн и аттестации измерительных установок / А.В. Калинин // *Антенны*. – 2004. – Вып. 12 (91). – С. 28–33.
4. Самбуров, Н.В. Компактный антенный полигон в условиях геометрически ограниченных помещений / Н.В. Самбуров, Д.Ю. Рыбаков, Н.Г. Иванов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2014. – Т. 19, № 10. – С. 25–32.
5. Бутакова, С.В. Безэховые камеры с гладкими криволинейными профилями / С.В. Бутакова // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. – 1996. – Т. 39, № 9–10. – С. 69–76. DOI: 10.20535/S002134701996100093
6. Балабуха, Н.П. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов / Н.П. Балабуха, А.С. Зубов, В.С. Солосин. – М.: Наука, 2007. – 266 с.
7. Мицмакер, М.Ю. Безэховые камеры СВЧ / М.Ю. Мицмакер, В.А. Торгованов. – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.
8. Chung, B.K. Design and Construction of a Multipurpose Wideband Anechoic Chamber / B.K. Chung, H.T. Chuah // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – December 2003. – Vol. 45, no. 6. – P. 41–47. DOI: 10.1109/MAP.2003.1282178
9. Монин, М.А. О корректности характеристик отражения радиопоглощающих материалов / М.А. Монин // *Радиотехника*. – 1984. – № 9. – С. 83–84.
10. Оптимизация безэховых камер в дециметровом диапазоне длин волн / А.Н. Борцов, Н.Г. Князев, К.А. Кузнецов и др. // *Антенны*. – 2019. – Вып. 6 (260). – С. 58–65. DOI: 10.18127/j03209601-201906-06
11. Будаи, А.Г. Электродинамический анализ модифицированных РПМ пирамидального типа / А.Г. Будаи, В.П. Кныш, С.В. Малый // 15-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2005. – С. 645–646.
12. Рытов, С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч.2. Случайные поля. / С.М. Рытов, Ю.А. Кравцов, В.И. Татарский. – М.: Наука, 1978. – 463 с.
13. Промышленный образец РФ № 115865/10-04, 09.01.2019.
14. Самбуров, Н.В. Многочастотный способ измерения потерь в обтекателях / Н.В. Самбуров // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 83–94. DOI: 10.14529/ctcr150311

15. Bodryshev, V.V. Flaw Detection Method for Radomes in Weakly Anechoic Conditions / V.V. Bodryshev, A.A. Larin, L.N. Rabinskiy // TEM Journal. – 2020. – Vol. 9, iss 1. – P. 169–176. DOI: 10.18421/TEM91-24

16. Ларин, А.А. Методы экспериментального исследования конструкций радиопрозрачных укрытий, поиска и локализации дефектов / А.А. Ларин // XIX Международная конференция «Авиация и космонавтика». Москва, 23–27 ноября 2020 г. – 2020. – С. 762–764.

17. Бодрышев, В.В. Дефектоскопия крупногабаритных радиопрозрачных укрытий / В.В. Бодрышев, А.А. Ларин // Международная конференция «Космические системы»: тезисы. Москва, 27 апреля 2021 года. – М.: Изд-во «Перо», 2021 – С. 29–30.

Аксёнов Анатолий Валерьевич, инженер-конструктор, АО «Тайфун», г. Калуга; an.aksionov2014@yandex.ru.

Ларин Артем Андреевич, аспирант кафедры 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения», Московский авиационный институт, г. Москва; larintema@ya.ru.

Самбуров Николай Викторович, начальник отдела, АО «Тайфун», г. Калуга; samburov.n.v@yandex.ru.

Поступила в редакцию 21 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210307

AN ANECHOIC CHAMBER BUILT INTO INDUSTRIAL ROOMS

A.V. Aksenov¹, an.aksionov2014@yandex.ru,

A.A. Larin², larintema@ya.ru,

N.V. Samburov¹, samburov.n.v@yandex.ru

¹ Typhoon JSC, Kaluga, Russian Federation,

² Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

The issues of designing anechoic chambers for antenna measurements of a certain type – embedded in the premises of industrial purpose are considered. The advantage of such chambers is a positive economic effect associated with both the reduction of costs for construction work, and with the possibility of joint use of auxiliary room systems in the process of operation. Known approaches to the design of chambers for antenna measurements are based either on ensuring a minimum level of aesthetics, or minimum overall dimensions. In this case, it is necessary to provide a compromise between the parameters of anechoic stability and overall dimensions while ensuring the technological accessibility of the entire usable area of the room. **Aim.** The aim of the work is to justify the form and geometric dimensions of the chamber. **Research Methods.** In the process of research used the methods of geometric optics. When justifying the form of the chamber, practical aspects were taken into account, namely, the common form of industrial premises and workshops, as well as the possibility of effective use of common radio-absorbing materials to cover the chamber from the inside. In the process of finding the optimal effective geometric dimensions, the quality functionals were assumed to be anechoic and dimensional parameters. **Results.** A chamber in the form of a rectangular trapezoid is optimal for embedding in industrial premises. The expressions for the geometric dimensions of the chamber, ensuring the absence of first- and second-order reflections in the working area, have been found. The optimum value of the deflection angle of the back wall of the anechoic chamber was found. **Conclusion.** Based on the above technique, an anechoic chamber of a compact range for antenna measurements has been realized.

Keywords: compact antenna range, radio wave absorption material, anechoic chamber, collimator, reflection.

References

1. Zahar'ev L.N., Lemanskiy A.A., Turchin V.I. *Metody izmereniya kharakteristik antenn SVCh* [Methods for Measuring the Characteristics of Microwave Antennas]. Moscow, Radio and Connection Publ., 1985. 368 p.
2. Nikolaev P.V. [Antenna Measurements Using Time Selection Method]. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2013, iss. 10, vol. 18, pp. 24–27. (in Russ.)
3. Kalinin A.V. [Multifrequency Techniques for Measuring Antenna Characteristics and for Certifying Measurement Installations]. *Antennas*, 2004, iss. 12 (91), pp. 28–33. (in Russ.)
4. Samburov N.V., Rybakov D.Yu. Ivanov N.G. [Compact Antenna Range under Geometrically Limited Space Conditions]. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2014, vol. 19, no. 10, pp. 25–32. (in Russ.)
5. Butakova S.V. [Anechoic Chambers with Smooth Curvilinear Profiles]. *Proceedings of the universities. Radio Electronics*, 1996, vol. 39, no. 9–10, pp. 69–76. (in Russ.) DOI: 10.20535/S002134701996100093
6. Balabukha N.P., Zubov A.S., Solosin V.S. *Kompaktnye poligony dlya izmereniya kharakteristik rasseyaniya ob'ektov* [Compact Polygons for Measuring Scattering Characteristics of Objects]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 266 p.
7. Mitsmakher M.Yu., Torgovanov V.A. *Bezekhovye kamery SVCh* [Anechoic UHF Chambers]. Moscow, Radio and Connection Publ., 1982. 128 p.
8. Chung B.K., Chuah H.T. Design and Construction of a Multipurpose Wideband Anechoic Chamber. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003, vol. 45, no. 6, pp. 41–47. DOI: 10.1109/MAP.2003.1282178
9. Monin M.A. [On Correctness of Reflection Characteristics of Radio Absorbing Materials]. *Radioengineering*, 1984, no. 9, pp. 83–84. (in Russ.)
10. Bortsov A.N., Knyazev N.G., Kuznetsov K.A., Kurdyumov O.A., Sagach V.E. [Optimization of Anechoic Chambers in the Decimeter Wavelength Range]. *Antennas*, 2019, iss. 6 (260), pp. 58–65. (in Russ.) DOI: 10.18127/j03209601-201906-06
11. Buday A.G., Knysh V.P., Maly S.V. [The electrodynamic analysis of modified pyramidal type radio absorber]. *15th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo '2005)*. Sevastopol, 2005, pp. 645–646.
12. Rytov S.M., Kravtsov Yu.A., Tatarskii V.I. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch.2. Sluchaynye polya*. [Introduction in statistical radiophysics. Part 2. Random fields]. Moscow, Nauka, 1978. 463 p.
13. RF industrial design number 115865/10-04, 09.01.2019.
14. Samburov N.V. Multi-Frequency Technique of Radome Loss Measurement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 83–94. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr150311
15. Bodryshev V.V., Larin A.A. Defectoscopy of large-sized radio-transparent shelters. *TEM Journal*, 2020, vol. 9, iss. 1, pp. 169–176. DOI: 10.18421/TEM91-24
16. Larin A.A. [Methods of experimental investigation of radio-transparent radomes. Finding and localization of defect]. *XIX Mezhdnarnidnaya konferentsyya "Aviatsyya i kosmonavtika"* [XIX International Conference "Aviation and Cosmonautics"]. Moscow, 2020, pp. 762–764. (in Russ.)
17. Bordyshev V.V., Larin A.A. [Defectoscopy of large-sized radio-transparent radomes]. *Mezhdnarnidnaya konferentsyya "Kosmicheskiye sistemy"* [International Conference "Space Systems"]. Moscow, 2021, pp. 29–30.

Received 21 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Аксёнов, А.В. Безэховая камера, встраиваемая в помещения промышленного назначения / А.В. Аксёнов, А.А. Ларин, Н.В. Самбуров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 66–74. DOI: 10.14529/ctcr210307

FOR CITATION

Aksenov A.V., Larin A.A., Samburov N.V. An Anechoic Chamber Built Into Industrial Rooms. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 66–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210307

Управление в социально-экономических системах

УДК 517.9

DOI: 10.14529/ctcr210308

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ И МАТРИЧНЫХ НЕАНОНИМНЫХ ОБОБЩЕННЫХ МЕДИАННЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ ИНТЕРЕСОВ АГЕНТОВ

А.О. Алексеев¹, Т.А. Катаева^{1, 2}

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия,

² ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь, Россия

Рассматривается задача согласования интересов агентов при управлении в организационных системах, в частности, при оценке степени достижения стратегических целей организации. Актуальность задачи обусловлена необходимостью повышения скорости принятия решений, скорости реакции на изменения внешней среды, чего можно достичь, применяя соответствующие механизмы управления. **Цель исследования:** совершенствование методов принятия коллективных решений в условиях, когда агенты обладают разными рангами значимости. **Материалы и методы.** В качестве методов используются механизмы комплексного оценивания и обобщенные медианные механизмы согласования мнений агентов. Выбор математического аппарата обусловлен тем, что в организационных системах принятие решений происходит коллективно, в процессе взаимодействия группы агентов всегда возникает противоречие, так как каждый агент стремится максимизировать свою целевую функцию, что приводит к конфликту интересов и желанию исказить информацию. Выбранные методы позволяют данные проблемы решить. Первые механизмы применяются для агрегирования показателей, отражающих степень достижения частных целей организации на стратегическом уровне. Вторые механизмы применяются для выявления истинных мнений агентов о виде матриц свертки целевых показателей. **Результаты.** Предложен матричный неанонимный обобщенный медианный механизм, позволяющий согласовывать интересы агентов с разными рангами. Неанонимная процедура сводится к анонимной, которая обеспечивает устойчивость принимаемых решений обо всех элементах матриц свертки к стратегическому поведению агентов. Показано, что результаты комплексного оценивания являются манипулируемыми при использовании анонимных и неанонимных процедур согласования. Для преодоления обнаруженной проблемы предложена новая процедура, основанная на синтезе известных механизмов управления. **Заключение.** Рассмотренная постановка задачи соответствует реальным процедурам принятия решений коллегиальными органами управления, когда мнение одного агента оказывается более значимым по сравнению с мнением другого агента. Разработанный механизм позволяет согласовывать мнения экспертов относительно степени достижения стратегических целей организации, также он может быть адаптирован для решения других прикладных задач, например, принятие решения о выборе проекта, оценка рисков, оценка поставщиков и др.

Ключевые слова: организационные системы, мультиагентные системы, стратегическое поведение, неманипулируемость, многокритериальное принятие решений, механизмы комплексного оценивания, медианные механизмы голосования, дизайн механизмов.

Введение

В организационных системах принятие решений по различным вопросам обычно происходит коллективно, при этом каждый активный агент может стремиться максимизировать свою целевую функцию, что может приводить к искажению информации со стороны агентов при их участии в принятии решений. В этих случаях требуется применять процедуры принятия коллективных решений, позволяющих учитывать персональные интересы всех агентов.

Существуют различные механизмы согласования интересов активных агентов, однако при определенных условиях отдельным агентам выгодно искажать информацию, нежели сообщать истинные мнения (в терминах теории игр у агентов существуют более выгодные стратегии поведения). При этом как отечественными, так и зарубежными исследователями в области дизайна механизмов доказана [1–3] неманипулируемость обобщенных медианных механизмов, т. е. их устойчивость к стратегическому поведению агентов. Под устойчивостью или неманипулируемостью понимается существование игрового равновесия, при котором ни одному из агентов теоретически не выгодно выбирать иные решения, отличающиеся от равновесного.

Целевое состояние организации на стратегическом уровне описывается, как правило, несколькими целями. Поскольку в достижении целевых показателей участвуют различные производственные, финансовые, административно-управленческие и иные структурные подразделения, то целевые показатели, как правило, декомпозируются в соответствии с организационной структурой компании, делегируя ответственность за их частичное достижение. Помимо этого, в крупных компаниях применяется проектное управление. Таким образом, как на уровне отдельных структурных подразделений, так и на уровне организации в целом стратегические цели выражаются совокупностью функциональных и проектных ключевых показателей эффективности, которые между собой не всегда согласованы.

Для согласования интересов участников организационной системы о степени достижения стратегических целей в настоящей работе предлагается интегрировать известные механизмы комплексного оценивания (МКО) [4–7] и обобщенные медианные механизмы [1–3] согласования мнений агентов в неанонимной постановке. Неанонимность означает, что при упорядочении сообщений агентов их сообщения нельзя менять друг с другом местами, так как мнение одного агента оказывается более значимым по сравнению с мнением другого агента. Такая постановка в большей степени соответствует корпоративной практике, поскольку в реальных организациях агенты, чьи интересы необходимо учесть, занимают различное положение в организационной структуре компании, имеют разный уровень компетентности, обладают прочими факторами, приводящими к разной значимости их мнений.

В настоящее время уже известен матричный анонимный обобщенный медианный механизм (МАОММ) [7, 8], где анонимность процедуры согласования подразумевала возможность менять местами сообщения агентов. Последнее можно условно интерпретировать, что без разницы, кто именно из агентов высказал то или иное сообщение, т. е. все агенты обладали одинаковым рангом. Стоит отметить, что учет различного уровня компетенций агентов в МАОММ был предусмотрен. Так, например, в работе [9] показана процедура делегирования сообщений, что востребовано в случае привлечения к согласованию узкоспециализированных специалистов.

Фактически настоящая работа является логическим продолжением исследований [8–10], в которых был предложен МАОММ, поскольку его основным назначением являлось выявление истинных мнений агентов при согласовании единых матриц свертки, являющихся элементами МКО, что и требуется в настоящем исследовании – разработать интегральный механизм управления, с одной стороны, позволяющий агрегировать набор показателей, отражающих степень достижения частных целей организации на стратегическом уровне до одного или нескольких укрупненных показателей, а с другой стороны, обеспечивающий неманипулируемость результатов со стороны отдельных агентов.

Сказанное выше определило дальнейшее изложение статьи. В начале последовательно описаны механизмы комплексного оценивания и обобщенные медианные механизмы голосования в анонимной и неанонимной постановках, на базе которых построено исследование. Затем следует описание матричных обобщенных медианных механизмов также в анонимной и неанонимной постановках, где матричный неанонимный обобщенный медианный механизм (МНОММ) [11] впервые подробно исследован. Показано, как неанонимную постановку свести к анонимной, обеспечивающей устойчивость принимаемых решений обо всех элементах матриц свертки к стратегическому поведению агентов. В последнем параграфе исследуется устойчивость результатов комплексного оценивания на основе МКО, согласованного с помощью МАОММ или МНОММ, к стратегическому поведению агентов. В заключении приводятся основные выводы выполненного исследования и сведения о внедрении полученных результатов.

Механизмы комплексного оценивания

МКО представляют собой кортежи вида

$$\langle \{X_i\}; G; M; P \rangle, \quad (1)$$

где $\{X_i\}$ – множества значений частных критериев (при решении прикладных задач, как правило, используется единое множество для всех критериев $X_i = \{1, \dots, k\}$, k – максимальная градация шкалы), $i = \overline{1, 2m-1}$, m – число терминальных критериев, которые учитываются в МКО, G – граф (2-дерево), описывающий последовательность свертки частных критериев, M – множество матриц свертки, описывающих правила агрегирования пар терминальных и агрегированных критериев $M = \{M_1, \dots, M_{m-1}\}$, P – процедура агрегирования пары критериев.

В общем случае МКО (1) могут применяться для решения различных прикладных задач, где требуется агрегировать наборы показателей до одного или нескольких укрупненных показателей. Авторами предлагается использовать МКО для агрегирования показателей, отражающих степень достижения частных целей организации на стратегическом уровне. Стоит отметить, что дискретные МКО уже использовались для оценки степени достижения стратегических целей организаций [12], что подтверждает состоятельность авторской идеи.

Покажем для наглядности простой пример МКО стратегических целей. Пусть организация имеет три стратегические цели ($m = 3$), имеющие различные критерии их достижения, оцениваемые с помощью 3-балльной ($k = 3$) порядковой шкалы: $X_i = \{1, 2, 3\}$, $i = \overline{1, 3}$. Значения шкалы можно условно интерпретировать следующим образом: 1 – цель не достигнута, 2 – цель частично достигнута, 3 – цель достигнута полностью.

Пусть агрегированные критерии, включая комплексный показатель, отражающий достижение всех стратегических целей в целом, имеют ту же шкалу: $X_i = \{1, 2, 3\}$, $i = \overline{4, 5}$ и ту же интерпретацию.

Пусть граф G имеет ребра, соединяющие вершины, соответствующие критериям X_1 и X_2 , с вершиной, соответствующей матрице M_1 ; вершину, соответствующую критерию X_3 , с вершиной, соответствующей матрице M_2 , а также вершины, соответствующие матрицам M_1 и M_2 :

$$G = \{ \{X_1; M_1\}; \{X_2; M_1\}; \{X_3; M_2\}; \{M_1; M_2\} \}.$$

Такой граф означает, что вначале обобщаются первая и вторая цели, а затем дополнительно учитывается третья.

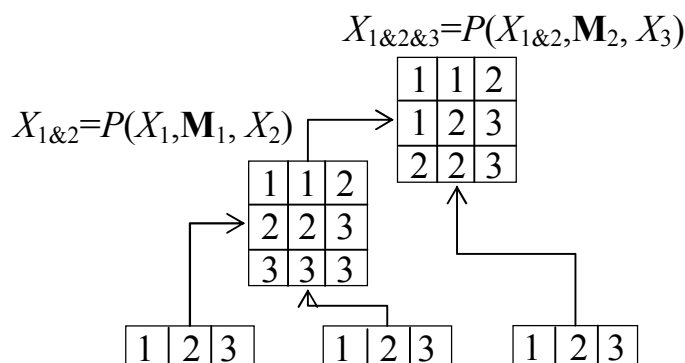
Пусть матрицы свертки имеют следующие элементы:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{pmatrix}, \quad M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 3 \end{pmatrix}.$$

Матрица M_1 показывает приоритет первой цели, так как при полном достижении первой цели $X_1 = 3$, при провале второй цели $X_2 = 1$, элемент матрицы соответствующий этому состоянию принимает значение 3 ($m_{31} = 3$), то есть обобщенная цель достигнута полностью. Матрица M_2 показывает приоритет третьей цели по сравнению с обобщенной целью на нижнем уровне графа G .

Известны непрерывные, нечеткие и Ф-нечеткие процедуры комплексного оценивания P , что позволяет осуществлять комплексное оценивание степени достижения стратегических целей в условиях неполноты информации, влияния случайных величин, а также использовать экспертные суждения, высказываемые в модальном виде. Обзор и обобщение известных процедур P представлено в [7].

Заданный выше МКО наглядно представлен на рисунке.



Пример МКО с 3 терминальными критериями
An example of an integrated assessment mechanism (IAM)
with 3 terminal criteria

МКО могут строиться как путем структуризации представлений агентов о значимости отдельных критериев в виде дерева критериев (графа G) и элементов матриц свертки $m_{rc} \in \mathbf{M}_j \in M, j = \overline{1, m-1}, r = \overline{1, k}, c = \overline{1, k}$ (r – номер строки, c – номер столбца матрицы), так и путем идентификации [13–16] структуры графа и множества матриц на основе обучающих наборов.

При этом в организационных системах агенты могут иметь различные представления об элементах матриц свертки целевых показателей, в том числе не совпадающие. Для согласования их мнений предлагается использовать обобщенные медианные механизмы голосования.

Обобщенные медианные механизмы голосования

Рассмотрим задачу согласования мнений группы агентов. Каждый из агентов $a = \overline{1, n}$ может высказать сообщение в диапазоне от \underline{x} до \bar{x} : $s_a \in [\underline{x}; \bar{x}] \subset R^1$. Агент имеет собственное представление о рассматриваемом вопросе, запишем его $m_a, m_a \in [\underline{x}; \bar{x}]$. При этом агент может сообщать как истинное мнение $s_a = m_a$, так и искаженное мнение $s_a = m_a + \delta$, где δ – любое число, сохраняющее итоговое сообщение на области определения $[\underline{x}; \bar{x}]$.

Согласно медианным механизмам голосования множество сообщений реальных агентов $\{s_1, \dots, s_n\}$ дополняется сообщениями так называемых фантомов, чьи оценки используются наравне с сообщениями реальных агентов.

Фантом соответствует некоторому виртуальному обществу из n не существующих агентов, которые сообщают либо максимальное значение \bar{x} , либо минимальное \underline{x} . Вектор сообщений не существующих агентов, образующих виртуальное общество, обозначим \mathbf{s}_p :

$$\mathbf{s}_p = \begin{cases} p \text{ экспертов сообщает } \bar{x}, \\ n - p \text{ экспертов сообщает } \underline{x}, \end{cases} \quad (2)$$

где p в общем случае принимает значение от 0 до $2^n - 1$, так как число возможных виртуальных обществ составляет 2^n вариантов.

Пусть существует некоторая процедура $\pi(\bullet)$, результатом которой является значение w_p , принадлежащее тому же диапазону $[\underline{x}; \bar{x}]$, что и значения элементов вектора $\mathbf{s}_p = \{s_j\}, s_j \in [\underline{x}; \bar{x}] j = \overline{1, n}$:

$$w_p = \pi(\mathbf{s}_p), \mathbf{s}_p = \{s_j\}, s_j \in [\underline{x}; \bar{x}], w_p \in [\underline{x}; \bar{x}]. \quad (3)$$

Согласование мнений агентов при анонимной постановке

Как отмечалось во введении, в анонимном случае сообщения агентов можно переставлять, значит, можно переставлять оценки $s_j \in \mathbf{s}_p$. Это приводит к тому, что часть оценок w_p совпадет и 2^n оценок сводится к $n+1$. Тогда в анонимном случае сообщения фантомов определяются согласно выражению (2) при p от 0 до n .

Если процедура $\pi(\bullet)$ удовлетворяет условиям непрерывности, монотонности и единогласия:

$$x = \pi(\mathbf{s}), \text{ где } \mathbf{s} = \{s_j\}, \forall j \ s_j = x, \ j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

то и отечественными, и зарубежными исследователями параллельно и независимо друг от друга доказано [1–3], что медианный механизм голосования:

$$z = \text{med}(s_1, \dots, s_n, w_0, \dots, w_n), \quad (5)$$

результатом которого является z – медиана множества оценок агентов и фантомов, является неманипулируемым. Медианный механизм называется обобщенным, так как описанный выше подход применим для согласования не только оценок на одномерном множестве действительных значений $z \in \mathbb{R}^1$, но и в общем случае для n -мерного пространства \mathbb{R}^n .

В силу того, что процедура $\pi(\bullet)$ удовлетворяет условию единогласия (4), то согласно (2) при $p=0$ оценка фантома принимает максимальное значение ($w_0 = \underline{x}$), а при $p=n$ – максимальное ($w_n = \bar{x}$).

Поскольку медиана делит все множество на два равных по мощности, в одном из которых все элементы не больше медианы z , а во втором не меньше, то, исключив $w_0 = \underline{x}$ и $w_n = \bar{x}$ из исходного множества, медиана уменьшенного множества сохраняется, т. е. справедливо следующее:

$$z = \text{med}(s_1, \dots, s_n, w_0, \dots, w_n) = \text{med}(s_1, \dots, s_n, w_1, \dots, w_{n-1}). \quad (6)$$

Таким образом, в анонимном случае любой группе реальных агентов, состоящей из n агентов, к их оценкам всегда добавляется $n-1$ сообщений фантомов. Соответственно, множество всех сообщений $\{s_1, \dots, s_n, w_1, \dots, w_{n-1}\}$ всегда является нечетной. Общеизвестно, что если мощность множества является нечетным, то медианой этого множества всегда является один из элементов множества. Применительно к рассматриваемой задаче это означает, что результатом согласования мнений агентов (6) будет либо сообщение реального агента $\exists a, z = s_a$, либо сообщение фантома $\exists p, z = w_p$, включая случаи, когда их оценки совпадают, т. е. $\exists a$ и $\exists p, z = s_a = w_p$.

Это в свою очередь означает, что если результатом согласования (6) стало значение, сообщаемое агентом, $a: z = s_a$, то такого агента называют диктатором и ему нет смысла искажать информацию, если он сообщал свое истинное мнение $s_a = m_a$. Остальным агентам также нет смысла искажать информацию, поскольку даже при существенном искажении сообщений не будет происходить смещение медианы в их сторону в силу робастности медианы. Если же результатом согласования (6) стало значение, сообщаемое фантомом $\exists p, z = w_p$, то ни один из агентов не сможет сместить медиану, не отклонив при этом результат дальше от своего истинного мнения (7). Таким образом, достигается равновесие по Нэшу.

Множество сообщений прочих агентов обозначим \mathbf{s}_{-a} , а результат медианного механизма согласования (6) запишем как $z(s_a, \mathbf{s}_{-a})$. Неманипулируемость означает выполнение условия для каждого агента $\forall a, \ a = \overline{1, n}$:

$$\left| m_a - z(m_a, \mathbf{s}_{-a}) \right| \leq \left| m_a - z(m_a + \delta, \mathbf{s}_{-a}) \right|, \ \forall a, \ a = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где разница по модулю между истинным мнением агента m_a и результатом активной экспертизы при сообщении агентом a своего истинного мнения $z(m_a, \mathbf{s}_{-a})$ меньше или равна разнице по модулю между истинным значением m_a и результатом согласования при сообщении им искаженного мнения $z(m_a + \delta, \mathbf{s}_{-a})$.

Из приведенных рассуждений выше следует, что при использовании медианного механизма (6) результат согласования при искажении отклонится от истинного значения не больше, чем при сообщении правды, другими словами, любому агенту $\forall a, a = \overline{1, n}$ не хуже сообщить истинное мнение m_a , нежели исказить его.

Согласование мнений агентов при неанонимной постановке

В неанонимном случае агенты обладают некоторыми рангами $r_a, a = \overline{1, n}$, нормировав которые получим взвешенные коэффициенты $w_a = r_a / \sum_{a=1, n} r_a, w_a \in (0; 1)$, сумма которых равна единице.

Введем вектор $\mathbf{w} = \{w_a\}, a = \overline{1, n}$. В этом случае оценки фантомов будут вычисляться с учетом весов виртуальных агентов:

$$w_p = \pi(\mathbf{s}_p; \mathbf{w}), \mathbf{s}_p = \{s_j\}, \mathbf{w} = \{w_a\}, j, a = \overline{1, n}, w_p \in [\underline{x}; \bar{x}]. \quad (8)$$

Тогда каждое значение s_j умножается на взвешенный коэффициент w_a , именно поэтому оценки агентов нельзя переставлять.

При определении сообщений фантомов согласно (8), опираясь на граничные значения множества допустимых действий \underline{x} и \bar{x} , всегда порождается четное количество фантомов – 2^n , что при четном числе реальных агентов множество всех оценок становится также четным. Медианой множества, мощность которого четная, является любое число в промежутке между двумя значениями, делящими исходное множество, упорядоченное по возрастанию, на два равных по мощности множества. Обычно медианой признается их среднее значение. Это приводит к тому, что всегда найдется хотя бы один агент, заинтересованный в искажении своего истинного мнения, т. е. $\exists a$ для которого (7) не выполнится и тогда равновесия по Нэшу нет.

Естественно, что виртуальные общества можно строить не только так, что не существующие агенты сообщают только минимальные \underline{x} или максимальные значения \bar{x} , а еще использовать третью оценку из диапазона $[\underline{x}, \bar{x}]$, например, среднюю. С одной стороны, это приведет к тому, что виртуальных обществ \mathbf{s}_p будет 3^n , т. е. при любом n образуется нечетное число фантомов. С другой стороны, если количество реальных агентов нечетно, то в этом случае объединенное множество оценок агентов и фантомов будет вновь четным. Это, как показано выше, приведет к ситуации, когда найдется хотя бы один реальный агент, которому стратегически будет выгодно исказить информацию.

Таким образом, при согласовании мнений группы агентов, обладающих различными рангами, медианна множества, образованного объединением множества сообщений агентов и множества сообщений фантомов, вычисленных согласно (8) или другим иным способом, только в частных случаях будет совпадать с сообщением фантома или реального агента. Из этого следует, что в общем случае обобщенный медианный механизм при неанонимной постановке не является неманипулируемым.

Несмотря на сказанное выше, неманипулируемости можно добиться путем сведения неанонимной постановки к анонимной следующим образом. Для каждого реального агента $a = \overline{1, n}$, обладающего весом w_a , его сообщение s_a следует заменить на вектор $\mathbf{s}_a = \{s_j\}$, состоящий полностью из сообщений этого же агента $\forall j s_j = s_a, j = \overline{1, n_a}$. Размер вектора \mathbf{s}_a определяется следующим образом:

$$n_a = N \cdot w_a, N \in \mathbb{N}, n_a \in \mathbb{N}, \quad (9)$$

где N – такое минимальное натуральное число, что для всех агентов результат умножения взвешенного коэффициента на N тоже является натуральным. Очевидно, что будет выполняться следующее:

$$\sum_{a=1}^n n_a = \sum_{a=1}^n w_a \cdot N = N. \quad (10)$$

Тогда в неанонимной постановке множество, состоящее из n сообщений реальных агентов s_a , $a = \overline{1, n}$, заменяется на множество, состоящее из N сообщений тех же самых агентов s_a , повторяющихся по n_a раз. В этом случае чем выше ранг агента, тем большее количество его сообщений будет в дополненном множестве. Фактически это дополнение можно интерпретировать следующим образом: множеству реальных агентов, обладающих различными рангами, поставили в соответствие виртуальное множество агентов, которые между собой уже равны.

Поскольку множество сообщений, состоящее из N сообщений, уже не имеет рангов, то это соответствует анонимной постановке задачи согласования мнений и к этому множеству может быть добавлено $N-1$ сообщений фантомов, вычисляемых согласно (3), и медиану можно будет определять аналогично (6):

$$z = \text{med}(s_1, \dots, s_N, w_1, \dots, w_{N-1}). \quad (11)$$

Поскольку выше уже было показано, что для (6) выполняется условие (7), то оно выполнится и для (11). Таким образом, мы получили неманипулируемую процедуру согласования мнения агентов в неанонимной постановке.

Матричные обобщенные медианные механизмы

Матричным обобщенным медианным механизмом называется механизм согласования, где агент a , $a = \overline{1, n}$ сообщает не скалярную оценку $s_a \in \mathbb{R}^1$, а матрицу $\mathbf{S}^a = \{s_{rc}^a\}$, $r = \overline{1, \bar{r}}$, $c = \overline{1, \bar{c}}$, (\bar{r} – число строк матрицы, \bar{c} – число столбцов матрицы), далее индекс агентов будем записывать сверху, чтобы не путать их с индексами строк и столбцов матриц свертки. Будем считать, что для каждого элемента матрицы могут быть персональные ограничения снизу и сверху $s_{rc} \in [s_{rc}^-; s_{rc}^+]$.

Тогда, как и в рассмотренных выше случаях, к множеству реальных матриц \mathbf{S}^a , $a = \overline{1, n}$ добавим матрицы фантомов \mathbf{W}^p , $\mathbf{W}^p = \{w_{rc}^p\}$, $p = \overline{1, n-1}$. Матрицы фантомов определяются с помощью процедуры $\pi(\cdot)$ поэлементно при $r = \overline{1, \bar{r}}$, $c = \overline{1, \bar{c}}$.

Согласованной группой из n агентов матрицей будем называть матрицу $\mathbf{Z} = \{z_{rc}\}$, $r = \overline{1, \bar{r}}$, $c = \overline{1, \bar{c}}$, элементы которой определены по медианному механизму:

$$z_{rc} = \text{med}(s_{rc}^1, \dots, s_{rc}^n, w_{rc}^1, \dots, w_{rc}^{n-1}), \quad (12)$$

где $s_{rc}^a \in [s_{rc}^-; s_{rc}^+]$, $a = \overline{1, n}$, $w_{rc}^p \in [s_{rc}^-; s_{rc}^+]$, $p = \overline{1, n-1}$.

В неанонимном случае будем поступать так же, как описано в предыдущем параграфе: множество, содержащее n реальных матриц \mathbf{S}^a , $a = \overline{1, n}$, расширим до множества из N матриц путем дублирования каждой матрицы \mathbf{S}^a кратно числу n_a , вычисленному по выражению (9) с учетом доли ранга эксперта w_a среди всех рангов.

К этим матрицам добавим матрицы фантомов \mathbf{W}^p , $p = \overline{1, N-1}$. Элементы матрицы фантомов вычислим согласно выражению (3) по векторам длиной N и согласуем матрицу \mathbf{Z} поэлементно:

$$z_{rc} = \text{med}(s_{rc}^1, \dots, s_{rc}^{n_1}, \dots, s_{rc}^{n_{n-1}}, \dots, s_{rc}^N, w_{rc}^1, \dots, w_{rc}^{N-1}), \quad (13)$$

где $r = \overline{1, \bar{r}}$, $c = \overline{1, \bar{c}}$, $s_{rc}^a \in [s_{rc}^-; s_{rc}^+]$, $a = \overline{1, N}$, $w_{rc}^p \in [s_{rc}^-; s_{rc}^+]$, $p = \overline{1, N-1}$.

С учетом введенных выше обозначений и показанных свойств неманипулируемости матричным анонимным обобщенным медианным механизмом (МАОММ) является (12), матричным неанонимным обобщенным медианным механизмом (МНОММ) – (13), для которых справедливо:

$$\left| m_{rc}^a - z(m_{rc}^a, s_{rc}^{-a}) \right| \leq \left| m_{rc}^a - z(m_{rc}^a + \delta_{rc}^a, s_{rc}^{-a}) \right|, \quad (14)$$

в анонимном случае для $\forall a$, $a = \overline{1, n}$, в неанонимном случае для $\forall a$, $a = \overline{1, N}$.

Согласование матриц свертки показателей, отражающих степень достижения стратегических целей

Применительно к задаче согласования матриц свертки $\mathbf{M} = \{m_{rc}\}$, $r = \overline{1, \bar{r}}$, $c = \overline{1, \bar{c}}$, являющихся элементами МКО вида (1), ограничениями на элементы матрицы свертки являются следующее: матрицы полагаются неубывающими, т. е. для $\forall r, c$, $r = \overline{1, \bar{r}-1}$, $c = \overline{1, \bar{c}-1}$ должно выполняться: $m_{r+1c} \geq m_{rc}$, $m_{rc+1} \geq m_{rc}$, $m_{r+1c+1} \geq m_{rc}$.

При определении МКО на основе экспертных знаний в частных случаях используют дополнительно следующие ограничения:

- первый элемент матрицы принимает минимальную оценку $m_{11} = 1$;
- последний элемент матрицы принимает максимальную оценку из шкалы обобщенного критерия i : $m_{rc}^- = k_i$;
- главная диагональ матрицы свертки является равномерной, т. е. для $r = c$, $r = \overline{1, \bar{r}}$, $c = \overline{1, \bar{c}}$ диагональные элементы принимают значения строки и столбца $m_{rc} = r = c$;
- разница между соседними элементами по строке или столбцу не должна превышать единицу, т. е. для $\forall r, c$, $r = \overline{1, \bar{r}-1}$, $c = \overline{1, \bar{c}-1}$, $m_{r+1c} - m_{rc} \leq 1$, $m_{rc+1} - m_{rc} \leq 1$;
- разница между соседними элементами по диагонали не должна превышать двух, т. е. для $\forall r, c$, $r = \overline{1, \bar{r}-1}$, $c = \overline{1, \bar{c}-1}$, $m_{r+1c+1} - m_{rc} \leq 2$.

Последние ограничения в общем случае не являются обязательными и встречаются как теоретические исследования, так и прикладные задачи, в которых они не выполняются. Несмотря на это, с учетом введенных ограничений выше для рассмотренного в первом параграфе примера (см. рисунок), где степень достижения стратегических целей оценивается с помощью 3-балльной шкалы, определим матрицы размерностью 3×3 с минимально \mathbf{M}_{\min} и максимально возможными \mathbf{M}_{\max} значениями:

$$\mathbf{M}_{\min} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}_{\max} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 \end{pmatrix},$$

которые следует использовать как ограничения снизу и сверху соответственно на сообщения агентов: $s_{rc}^a \geq \underline{m}_{rc}$, $s_{rc}^a \leq \bar{m}_{rc}$, $s_{rc}^a \in \mathbf{S}^a$, $a = \overline{1, n}$ в анонимном случае, $a = \overline{1, N}$ в неанонимном случае, $\underline{m}_{rc} \in \mathbf{M}_{\min}$, $\bar{m}_{rc} \in \mathbf{M}_{\max}$. Примеры матриц \mathbf{M}_{\min} и \mathbf{M}_{\max} размерностью 4×4 приведены в работах [7–10].

В силу значительного объема материалов, которые необходимо привести для иллюстрации процедуры согласования МКО с помощью МАОММ или МНОММ (к примеру, если три агента ($n=10$) имеют ранги $r_1=0,3$, $r_2=0,5$, $r_3=0,2$, то им соответствует виртуальное множество агентов, состоящее из 10 равнозначных агентов ($N=10$). Значит, необходимо добавить 9 матриц фантомов и привести итоговую согласованную матрицу), а также по причине того, что данные механизмы подробно разобраны в тексте, авторы сочли целесообразным не приводить демонстрационные примеры.

Из свойства обобщенных медианных механизмов (14) следует, что МАОММ (12), а, следовательно, и МНОММ (13) в силу того, что МНОММ следует сводить к МАОММ, как механизмы согласования матриц свертки в отношении элементов отдельных матриц являются неманипулируемыми. Однако при наличии более двух стратегических целей ($m \geq 3$), по которым с помощью МКО вида (1) оцениваются результаты организации, такой МКО содержит несколько матриц свертки ($|M| \geq 2$). Поэтому следует проверить, сохранится ли свойство неманипулируемости МКО в целом?

**Исследование устойчивости результатов комплексного оценивания
по согласованному механизму комплексного оценивания**

При исследовании данного вопроса обнаружено, что МАОММ и соответственно МНОММ являются манипулируемыми по отношению к МКО в целом. Рациональный агент может целенаправленно исказить информацию о значении элемента матрицы на нижнем уровне графа G с целью смещения строк или столбцов при комплексном оценивании на матрицах верхнего уровня.

Агенты $a = \overline{1, n}$ могут сообщать матрицы свертки $\mathbf{S}^a = \{s_{rc}^a\}$, $r = \overline{1, \bar{r}}$, $c = \overline{1, \bar{c}}$. Результат свертки двух критериев X_1 и X_2 по матрице \mathbf{S}^a обозначим $X_{1\&2}^a(\mathbf{S}^a)$. При сообщении агентом истинной матрицы $\mathbf{M}^a = \{m_{rc}^a\}$ результат свертки обозначим $X_{1\&2}^a(\mathbf{M}^a)$.

Рассмотрим непрерывную аддитивно-мультипликативную процедуру комплексного оценивания P_{AM} :

$$\begin{aligned} X_{1\&2}^a(\mathbf{M}^a) = & (1 - \lceil X_1 \rceil)(1 - \lceil X_2 \rceil) m_{rc}^a \Big|_{r=\lceil X_1 \rceil; c=\lceil X_2 \rceil} + \\ & + \lceil X_1 \rceil (1 - \lceil X_2 \rceil) m_{rc}^a \Big|_{r=\min(\lceil X_1 \rceil + 1; \bar{r}); c=\lceil X_2 \rceil} + \\ & + (1 - \lceil X_1 \rceil) \lceil X_2 \rceil m_{rc}^a \Big|_{r=\lceil X_1 \rceil; c=\min(\lceil X_2 \rceil + 1; \bar{c})} + \\ & + \lceil X_1 \rceil \lceil X_2 \rceil m_{rc}^a \Big|_{r=\min(\lceil X_1 \rceil + 1; \bar{r}); c=\min(\lceil X_2 \rceil + 1; \bar{c})}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\lceil X_i \rceil$ и $\lfloor X_i \rfloor$ – остатки деления критериев X_1 и X_2 на единицу:

$$\lceil X_i \rceil = \text{mod}(X_i; 1), \quad i = 1, 2,$$

$\lfloor X_i \rfloor$ и $\lfloor X_2 \rfloor$ – целые части критериев X_1 и X_2 соответственно:

$$\lfloor X_i \rfloor = \text{dim}(X_i), \quad i = 1, 2.$$

Будем условно считать, что некоторый агент при сообщении матрицы свертки $\mathbf{S}^a = \{s_{rc}^a\}$ искажает значения всех элементов, т. е. для $\forall r, c$: $s_{rc}^a = m_{rc}^a + \delta_{rc}^a$, где δ_{rc}^a – искажение. Тогда результат свертки при искаженной матрице определяется по выражению

$$\begin{aligned} X_{1\&2}^a(\mathbf{S}^a) = & (1 - \lceil X_1 \rceil)(1 - \lceil X_2 \rceil) (m_{rc}^a + \delta_{rc}^a) \Big|_{r=\lceil X_1 \rceil; c=\lceil X_2 \rceil} + \\ & + \lceil X_1 \rceil (1 - \lceil X_2 \rceil) (m_{rc}^a + \delta_{rc}^a) \Big|_{r=\min(\lceil X_1 \rceil + 1; \bar{r}); c=\lceil X_2 \rceil} + \\ & + (1 - \lceil X_1 \rceil) \lceil X_2 \rceil (m_{rc}^a + \delta_{rc}^a) \Big|_{r=\lceil X_1 \rceil; c=\min(\lceil X_2 \rceil + 1; \bar{c})} + \\ & + \lceil X_1 \rceil \lceil X_2 \rceil (m_{rc}^a + \delta_{rc}^a) \Big|_{r=\min(\lceil X_1 \rceil + 1; \bar{r}); c=\min(\lceil X_2 \rceil + 1; \bar{c})}. \end{aligned} \quad (16)$$

Результат свертки критериев X_1 и X_2 по медианной матрице $\mathbf{Z} = \{z_{rc}\}$ обозначим $X_{1\&2}(\mathbf{Z})$:

$$\begin{aligned} X_{1\&2}(\mathbf{Z}) = & (1 - \lceil X_1 \rceil)(1 - \lceil X_2 \rceil) z_{rc} \Big|_{r=\lceil X_1 \rceil; c=\lceil X_2 \rceil} + \\ & + \lceil X_1 \rceil (1 - \lceil X_2 \rceil) z_{rc} \Big|_{r=\min(\lceil X_1 \rceil + 1; \bar{r}); c=\lceil X_2 \rceil} + \\ & + (1 - \lceil X_1 \rceil) \lceil X_2 \rceil z_{rc} \Big|_{r=\lceil X_1 \rceil; c=\min(\lceil X_2 \rceil + 1; \bar{c})} + \\ & + \lceil X_1 \rceil \lceil X_2 \rceil z_{rc} \Big|_{r=\min(\lceil X_1 \rceil + 1; \bar{r}); c=\min(\lceil X_2 \rceil + 1; \bar{c})}, \end{aligned} \quad (17)$$

где все элементы матрицы z_{rc} определяются согласно (12) в анонимном случае, согласно (13) – в неанонимном случае.

Если агент является диктатором хотя бы в одном элементе матрицы, а в остальных элементах

его сообщение не меняет их значения, то он может исказить именно этот элемент, чтобы приблизить комплексную оценку $X_{1\&2}(\mathbf{Z})$ к своей $X_{1\&2}^a(\mathbf{M}^a)$.

Покажем это: пусть при $r = \lfloor X_1 \rfloor$, $c = \lfloor X_2 \rfloor$ агент a является диктатором, т. е. $z_{rc} = m_{rc}^a$, в остальных же случаях элементы согласованной матрицы оказались меньше истинных мнений агента:

$$z_{rc} \Big|_{r=\min(\lfloor X_1 \rfloor+1; \bar{r}); c=\lfloor X_2 \rfloor} < m_{rc}^a \Big|_{r=\min(\lfloor X_1 \rfloor+1; \bar{r}); c=\lfloor X_2 \rfloor},$$

$$z_{rc} \Big|_{r=\lfloor X_1 \rfloor; c=\min(\lfloor X_2 \rfloor+1; \bar{c})} < m_{rc}^a \Big|_{r=\lfloor X_1 \rfloor; c=\min(\lfloor X_2 \rfloor+1; \bar{c})},$$

$$z_{rc} \Big|_{r=\min(\lfloor X_1 \rfloor+1; \bar{r}); c=\min(\lfloor X_2 \rfloor+1; \bar{c})} < m_{rc}^a \Big|_{r=\min(\lfloor X_1 \rfloor+1; \bar{r}); c=\min(\lfloor X_2 \rfloor+1; \bar{c})}.$$

Тогда из выражений (17) и (15) в силу их монотонности видно, что выполняется $X_{1\&2}(\mathbf{Z}) < X_{1\&2}^a(\mathbf{M}^a)$. В этом случае агенту выгодно сообщать $s_{rc}^a = m_{rc}^a + \delta_{rc}^a$, при $r = \lfloor X_1 \rfloor$, $c = \lfloor X_2 \rfloor$. Тогда из (17) и (16) видно, что при $\delta_{rc}^a > 0$ справедливо $X_{1\&2}^a(\mathbf{S}^a) > X_{1\&2}(\mathbf{Z})$ и в целом будет выполняться соотношение

$$\left| X_{1\&2}^a(\mathbf{S}^a) - X_{1\&2}(\mathbf{Z}) \right| < \left| X_{1\&2}^a(\mathbf{M}^a) - X_{1\&2}(\mathbf{Z}) \right|, \quad (18)$$

что является признаком манипулируемости.

Таким образом, МАОММ и МНОММ являются неманипулируемыми при согласовании отдельных матриц свертки согласно (14) и одновременно манипулируемыми по комплексному показателю согласно (18).

Для преодоления обнаруженной проблемы предлагается комплексное оценивание стратегических целей осуществлять не на основе согласованных матриц \mathbf{Z}_i , $i = \overline{1, m-1}$, а согласовывать множество результатов комплексного оценивания X^a , полученных по персонализированным МКО агентов:

$$\langle \{X_i\}; G; M^a; P \rangle, \quad (19)$$

где M^a – множества матриц свертки агентов $a = \overline{1, n}$, идентифицированных по сообщениям, выказанным при применении МАОММ (12) или МНОММ (13), $M^a = \{\mathbf{S}_i^a\}$, $i = \overline{1, m-1}$, $a = \overline{1, n}$.

Данный подход основан на том, что сообщаемые агентами элементы матриц свертки можно считать близкими к истинным, т. е. для $\forall r, c$ $s_{rc}^a \approx m_{rc}^a$ или $|s_{rc}^a - m_{rc}^a| \rightarrow \min$ в силу неманипулируемости МАОММ (12) или МНОММ (13) при согласовании элементов отдельных матриц согласно (14). Тогда можно считать, что $\mathbf{S}_i^a \approx \mathbf{M}_i^a$.

Следовательно, используя в МКО вида (19) матрицы $\mathbf{S}_i^a \approx \mathbf{M}_i^a$, мы получаем для каждого агента $a = \overline{1, n}$ результат комплексного оценивания X^a , который близок к комплексной оценке, которая получилась, если бы агент сообщал матрицы \mathbf{M}_i^a $i = \overline{1, m-1}$.

Однако в итоге для каждого агента $a = \overline{1, n}$ мы получим свою комплексную оценку X^a , и в совокупности будет набор из n комплексных оценок, во-первых, которые необходимо свести к единой оценке, во-вторых, эти оценки X^a близки к истинным, но не гарантированно истинные (напомним, что агенту не хуже сообщать истину, нежели исказить ее, но это не гарантирует, что он не будет исказять). Поэтому для получения итоговой единой комплексной оценки предлагается применять обобщенную медианную процедуру аналогично (6):

$$X = med(X^1, \dots, X^n, w_1, \dots, w_{n-1}). \quad (20)$$

Можно заметить, что агентов сразу можно было просить сообщать комплексные оценки X^a , отражающие, на их взгляд, степень достижения стратегической цели организации, не прибегая к

сложной медианной процедуре (12) или (13), и использовать (20). Однако, выявив представления всех агентов о том, как формируется стратегическая цель в виде персонализированных МКО вида (19), для каждого из них можно решать обратную задачу комплексного оценивания – поиск набора частных критериев, обеспечивающих заданный уровень комплексного показателя и задачу оптимального управления [17–20]. Другими словами, можно идентифицировать, какие частные стратегические цели будет стремиться выполнить отдельный агент организации.

Заключение

В настоящей работе удалось интегрировать известные и полученные авторами механизмы управления для согласования интересов участников организационных систем. Несмотря на то, что в отношении отдельной матрицы свертки, каждый элемент которой определяется с помощью матричного обобщенного медианного механизма вне зависимости от постановки (МАОММ или МНОММ), обеспечивающего устойчивость к стратегическому поведению агентов, доказано, что результаты комплексного оценивания по МКО вида (1), согласованные с помощью МАОММ (12) или МНОММ (13), являются манипулируемыми. Для преодоления обнаруженной проблемы предлагается согласовать множество результатов комплексного оценивания, полученных по персонализированным МКО агентов (19), идентифицированным по сообщениям, высказанным при применении МАОММ или МНОММ.

Стоит отметить, что для автоматизации расчетов в соответствии с приведенными в настоящей работе механизмами создан прототип программного модуля оценки степени достижения стратегических целей на основе МНОММ, прошедший стадию тестирования и испытания и находящийся в процессе опытной эксплуатации на базе Публичного акционерного общества «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ПАО «ПНППК») и государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральном институте промышленной собственности. Помимо этого авторами внедрены в ПАО «ПНППК» МКО для отбора проектов и оценивания структурных подразделений на предмет использования принципов бережливого производства.

Литература

1. *Большие системы: моделирование организационных механизмов* / В.Н. Бурков, Б. Данев, А.К. Еналеев [и др.]. – М.: Наука, 1989. – 246 с.
2. Бурков, В.Н. Применение обобщенных медианных схем для построения неманипулируемых механизмов активной экспертизы / В.Н. Бурков, М.Б. Исаков, Н.А. Коргин // *Проблемы управления*. – 2008. – № 4. – С. 38–47.
3. Moulin, H. On Strategy-Proofness and Single-Peakedness / H. Moulin // *Public Choice*. – 1980. – Vol. 35. – P. 437–455. DOI: 10.1016/j.geb.2010.12.001
4. Бурков, В.Н. Методические основы комплексной оценки результатов деятельности предприятий с учетом их прогрессивности в ВПО «Союзэлектроприбор» / В.Н. Бурков, Н.И. Гореликов, А.М. Черкашин // *Приборы и системы управления*. – 1982. – № 11. – С. 21.
5. Модели согласованного комплексного оценивания в задачах принятия решений / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, Н.А. Коргин, А.В. Щепкин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 5–13. DOI: 10.14529/ctcr200201
6. Бурков, В.Н. Метод синтеза системы комплексного оценивания / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, А.В. Щепкин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 63–73. DOI: 10.14529/ctcr200407
7. Алексеев, А.О. Математические и инструментальные методы комплексного оценивания сложных объектов в условиях неопределенности: учеб. пособие / А.О. Алексеев. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 100 с.
8. Алексеев, А.О. О применении обобщенных медианных схем для матричной активной экспертизы / А.О. Алексеев, Н.А. Коргин // *Прикладная математика, механика и процессы управления: материалы Всерос. науч.-техн. интернет-конф. студентов и молодых ученых, [г. Пермь], 30 нояб. – 5 дек. 2015 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 170–177.*

9. Алексеев, А.О. Матричный анонимный обобщенный медианный механизм с правом делегирования сообщений / А.О. Алексеев, Н.А. Коргин // Прикладная математика и вопросы управления. – 2016. – № 4. – С. 137–156.

10. Алексеев, А.О. Исследование устойчивости механизмов комплексного оценивания к стратегическому поведению агентов (на примере согласования политики организации в области риск-менеджмента) / А.О. Алексеев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 4. – С. 136–154. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.09

11. Катаева, Т.А. Неанонимный случай голосования при согласовании интересов агентов / Т.А. Катаева // Математика и междисциплинарные исследования – 2020: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием (г. Пермь, 12–15 октября 2020 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь: Perm University Press, 2020. – С. 237–241.

12. Процедура построения комплексных оценок достижимости целей / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, А.М. Котенко и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2002. – № 3-2. – С. 41–47.

13. Бурков, В.Н. Проблемы синтеза механизма комплексного оценивания на основе обучающего набора данных / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, О.Л. Марин // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ–2019): сб. тр. (Москва, 17–20 июня 2019 г.) / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 2280–2284. DOI: 10.25728/vspru.2019.2280

14. Бурков, В.Н. Идентификация механизмов комплексной оценки на основе унитарного кода / В.Н. Бурков, В.А. Сергеев, Н.А. Коргин // Управление большими системами. – 2020. – Вып. 87. – С. 67–85. DOI: 10.25728/ubs.2020.87.4

15. Burkov, V.N. Identification of integrated rating mechanisms as optimization problem / V.N. Burkov, V.A. Sergeev, N.A. Korgin // 2020 13th International Conference «Management of large-scale system development» (MLSD), 28–30 Sept. 2020, Moscow, Russia. – Los Alamitos: IEEE, 2020. – Art. no. 20153257. – 5 p. DOI: 10.1109/MLSD49919.2020.9247638

16. Alekseev, A.O. Identification of integrated rating mechanisms based on training set / A. O. Alekseev // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 11–13 Nov. 2020, Lipetsk, Russia, IEEE, 2020. – P. 398–403. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280751

17. Бурков, В.Н. Метод дихотомического программирования / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Попок // Управление большими системами. – 2004. – Вып. 9. – С. 57–75.

18. Метод сетевого программирования / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Попок и др. // Проблемы управления. – 2005. – № 3. – С. 25–27.

19. Бурков, В.Н. Оптимизация программ по стоимости / В.Н. Бурков // Управление развитием крупномасштабных систем: материалы Восьмой междунар. конф, г. Москва, 29 сент. – 1 окт. 2015. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 344–358.

20. Алексеев, А.О. Управление сложными объектами, состояние которых описывается с помощью матричных механизмов комплексного оценивания / А.О. Алексеев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2020. – № 1. – С. 114–139. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.08

Алексеев Александр Олегович, канд. экон. наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; alekseev@cems.pstu.ru.

Катаева Татьяна Александровна, аспирант кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет; начальник бюро управления проектами, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь; tatyana.kataeva2014@yandex.ru.

Поступила в редакцию 21 июня 2021 г.

APPLICATION OF INTEGRATED RATING MECHANISMS AND MATRIX NON-ANONYMOUS GENERALIZED MEDIAN VOTER SCHEMES TO COORDINATION OF THE AGENTS' INTERESTS

A.O. Alekseev¹, alekseev@cems.pstu.ru,
T.A. Kataeva^{1, 2}, tatyana.kataeva2014@yandex.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation,

² PJSC "Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company", Perm, Russian Federation

The collective agent coordination problem in organizational behavior systems is considered. In particular, the problem of coordinating of the agents' interests to assess the degree of achievement of the corporate strategic targets. The relevance of the problem is due to the need to increase the speed of decision-making, the speed of reaction to changes in the external environment, which can be achieved using appropriate control mechanisms. **Aim.** Improving methods of collective decision making under circumstances where agents have different ranks of significance. **Materials and methods.** Methods comprise the integrated rating mechanisms and the generalized median voter schemes. The mathematical apparatus was chosen is contingent on the group decision making in organizational systems. Active agents strives to maximize his target function in the process of interaction, which leads to a conflict of interests and a desire to distort information. The chosen methods allow these problems to be solved. The first ones are used to aggregate indicators that reflect the degree of achievement of the private goals of the organization at the strategic level. The second ones are used to identification the true agents' opinions about the type of target index convolution matrices. **Results.** The matrix non-anonymous generalized median mechanism is proposed. The non-anonymous statement allows taking into account the interests of agents with different ranks. It is shown how to reduce non-anonymous procedure to an anonymous one. Decisions making process about all elements of the convolution matrices in integrated rating mechanisms with using anonymous median voter scheme is strategy proofness. However, the results of aggregation are not stability to the agent strategic behavior in cases of application anonymous or non-anonymous coordination procedures. The new integrated mechanism based on the synthesis of known control mechanisms is proposed to overcome the discovered problem. **Conclusion.** The statement of the problem corresponds to the real procedures of decision making by governance board, when the opinion of one agent turns out to be more significant than the opinion of another agent. The developed mechanism makes it possible to agree on the opinions of experts on the degree of achievement of the strategic goals of the organization; it can also be adapted to solve other applied problems, for example, making a decision on the choice of a project, assessing risks, assessing suppliers, etc.

Keywords: organizational systems, multi-agents systems, strategic behavior, strategy-proofness, multi-criteria decision making, integrated rating mechanisms, median voter schemes, mechanism design.

References

1. Burkov V.N., Danev B., Enaleev A.K. et al. *Bol'shiye sistemy: modelirovaniye organizatsionnykh mekhanizmov* [Large-scale Systems: Modeling Organizational Mechanisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 246 p.
2. Burkov V.N., Isakov M.B., Korgin N.A. Application of Generalized Median Voter Schemes to Designing Strategy-proof Mechanisms of Multicriteria Active Expertise. *Automation and Remote Control*, 2010, no. 71, pp. 1681–1694. DOI: 10.1134/S0005117910080163
3. Moulin H. On Strategy-proofness and Single-peakedness. *Public Choice*, 1980, vol. 35, pp. 437–455. DOI: 10.1016/j.geb.2010.12.001
4. Burkov V.N., Gorelikov N.I., Cherkashin A.M. [Methodological foundations of the enterprises activities results aggregation, taking into account its progressiveness in the All-Union Industrial Asso-

ciation “Soyuzelektroprigor”]. *Pribory i sistemy upravleniia* [Instruments and Control Systems], 1982, no. 11, p. 21. (in Russ.)

5. Burkov V.N., Burkova I.V., Korgin N.A., Shchepkin A.V. Models for Coordinated Integrated Assessment in Decision-Making Problems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200201

6. Burkov V.N., Burkova I.V., Shchepkin A.V. Method of Synthesis of the Integrated Assessment System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 63–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200407

7. Alekseev A.O. *Matematicheskiye i instrumental’nyye metody kompleksnogo otsenivaniya slozhnykh ob’ektov v usloviyakh neopredelennosti: ucheb. posobiye* [Mathematical and Instrumental Methods of Integrated Assessment of Complex Objects in Uncertainty]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2019. 100 p.

8. Alekseev A.O., Korgin N.A. [On the Generalized Median Schemes Application for the Matrix Active Examination]. *Prikladnaia matematika, mekhanika i protsessy upravleniia: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi internet konferentsii studentov i molodykh uchennykh* [Applied Mathematics, Mechanics and Control Processing. Proceedings All-Russian Scientific-Technical Internet Conference of Students and Young Scientists]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2016, pp. 170–177. (in Russ.)

9. Alekseev A.O., Korgin N.A. [The Matrix Anonymous Generalized Median Schemes with Delegation]. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2016, no. 4, pp. 137–156. (in Russ.)

10. Alekseev A.O. [Stability analysis of the rating and control mechanism to agent’s strategic behavior (on example of the risk management policy coordination)]. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2019, no. 4, pp. 136–154. (in Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.09

11. Kataeva T.A. [Non-anonymous case of voting when agents’ interests are coordinated]. *Matematika i mezhdistsiplinarnye issledovaniia – 2020: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchennykh s mezhdunarodnym uchastiem* [Mathematics and Interdisciplinary Research – 2020. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with International Participation]. Perm, Perm University Press, 2020, pp. 237–241. (in Russ.)

12. Barkalov S.A., Burkov V.N., Kotenko A.M., Polovinkina A.I. [Rating mechanism design procedure to assess the degree of achievement of the targets]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University], 2002, no. 3-2, pp. 41–47. (in Russ.)

13. Burkov V.N., Korgin N.A., Marin O.L. [The Syntesys of Integrated Rating Mechanisms Problems based on the Training Data Sets]. *XIII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniia* [Proceedings 13th All-Russian meeting on the control sciences]. Moscow, Control Sciences Institute of Russian Academy of Sciences, 2019, pp. 2280–2284. (in Russ.) DOI: 10.25728/vspu.2019.2280

14. Burkov, V.N., Sergeev V.A., Korgin N.A. [One-hot approach to identification of integrated rating mechanisms]. *Large-Scale Systems Control*, 2020, iss. 87, pp. 67–85. (in Russ.). DOI: 10.25728/ubs.2020.87.4

15. Burkov V.N., Sergeev V.A., Korgin N.A. Identification of integrated rating mechanisms as optimization problem. *2020 13th International Conference “Management of large-scale system development” (MLSD)*. Los Alamitos, IEEE, 2020, art. no. 20153257, 5 p. DOI: 10.1109/MLSD49919.2020.9247638

16. Alekseev A.O. Identification of integrated rating mechanisms based on training set. *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*. Los Alamitos, IEEE, 2020, pp. 398–403. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280751

17. Burkov V.N., Burkova I.V., Popok M.V. [Dichotomous programming method]. *Large-Scale Systems Control*, 2004, iss. 9, pp. 57–75. (in Russ.)

18. Burkov V.N., Burkova I.V., Popok M.V., Ovchinnikova T.I. [Network programming techniques]. *Control Sciences*, 2005, no. 3, pp. 23–29. (in Russ.)

19. Burkov V.N. [Programs optimization by costs]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh*

sistem [Management of large-scale system development]. Moscow, Control Sciences Institute of Russian Academy of Sciences, 2015, pp. 344–358. (in Russ.)

20. Alekseev A.O. [Control of a complex objects, states of which are describing by the matrix rating mechanism]. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2020, no. 1, pp. 114–139. (in Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.08

Received 21 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Алексеев, А.О. Применение механизмов комплексного оценивания и матричных неанонимных обобщенных медианных механизмов для согласования интересов агентов / А.О. Алексеев, Т.А. Катаева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 75–89. DOI: 10.14529/ctcr210308

FOR CITATION

Alekseev A.O., Kataeva T.A. Application of Integrated Rating Mechanisms and Matrix Non-Anonymous Generalized Median Voter Schemes to Coordination of the Agents' Interests. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 75–89. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210308

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНЖИНИРИНГА В ФОРМИРОВАНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

О.Н. Бекирова, С.А. Баркалов, М.С. Трифонова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Пандемия COVID-19 действительно стала настоящим потрясением для всего мира. Изменился уклад жизни не только для людей, но и компаний различных отраслей. На сегодняшний день рынок недвижимости, как и многие другие отрасли, находится в условиях экономической нестабильности. В исследовании освещаются проблемы, с которыми столкнулась строительная сфера в современных условиях пандемии коронавируса. Одной из таких проблем является устойчивая конкурентоспособность строительства и его соответствие новым потребительским предпочтениям. **Цель исследования:** изучение влияния инженеринговых решений и иных факторов на конкурентоспособность строительства в современных условиях экономики, определение ключевых критериев; разработка и описание методики принятия решения по выбору оптимального с точки зрения конкурентоспособности строительного предприятия. **Материалы и методы.** В работе применены методы системного анализа, методы оптимизации, анализа иерархий и теории принятия решений. В рамках предлагаемой методики разработан авторский метод идентификации ключевых критериев конкурентоспособности. Поскольку задача выбора оптимального решения из числа альтернативных основывается на многокритериальном подходе, использование данного метода является вполне целесообразным. Шаблон для формирования методики был выделен на основании анализа существующих исследований в данной области. **Результаты.** В исследовании обобщены и дополнены автором критерии и факторы, влияющие на конкурентоспособность строительных организаций. Представлена авторская методика принятия решения по определению оптимального с точки зрения конкурентоспособности строительного предприятия на основе рассматриваемых автором критериев. Данная методика включает в себя несколько этапов: 1) формирование цели; 2) формирование критериев, по которым будет осуществляться оценка организаций; 3) расчет критериев по каждой организации и приведение их к однородному виду данных; 4) построение дерева целей и матрицы приоритетов; 5) определение значений векторов приоритетов по каждой исследуемой организации. **Заключение.** Определено суммарное влияние критериев и инженеринговых решений на конкурентоспособность строительства. В связи с этим реализация строительного проекта должна осуществляться с учетом стратегических целей организации и привязки к выявленным критериям. Предложенная методика разработана для российских строительных компаний, функционирующих в современных экономических условиях.

Ключевые слова: классификация, строительство, управление, конкурентоспособность, инженеринг.

Введение

Конкурентная среда является одним из главных направлений в результате перехода России к рыночной экономике. На сегодняшний день рынок недвижимости, как и многие другие отрасли, находится в условиях экономической нестабильности. Обрушившаяся на весь мир пандемия коронавирусной инфекции в той или иной мере отрицательно сказалась на развитии всего бизнеса.

Но пережив уже не один кризис, оставшиеся на рынке строительные организации становятся всё более гибкими и стрессоустойчивыми к новым изменениям в экономике. Строительство отнесено Правительством РФ к непрерывным сферам производства. И поэтому в новых непростых условиях на строительную отрасль пандемия оказала не столь существенное влияние, как на другие сферы производства. Это выражается в том, что большая часть застройщиков (около 79 %) продолжали работу на начатых объектах во время самоизоляции, соответствуя строгим регламентам и требованиям санитарной безопасности.

Разумеется, несмотря на то, что сама по себе пандемия коронавируса пока что не оказала прямого разрушающего влияния на строительную отрасль России, тем не менее она открыла но-

вые и усугубила уже существующие на рынке проблемы и слабые места. В ближайшее время девелоперам придётся реализовывать свои проекты совершенно по-новому, в том числе основываясь уже на новых требованиях потребителей к жилью.

По мнению многих исследователей, опережающее развитие в строительной отрасли РФ может быть обеспечено путем комплексного развития инжиниринга, ведь успешность строительных проектов в первую очередь связана с детальным моделированием на предпроектном этапе.

Эффективные инжиниринговые решения в строительстве, а также объективная оценка факторов и критериев, влияющих на конкурентоспособность строительных организаций, имеют большое значение при принятии решений, сказывающихся в целом на стратегическом аспекте деятельности предприятия.

Основными целями данного исследования являются:

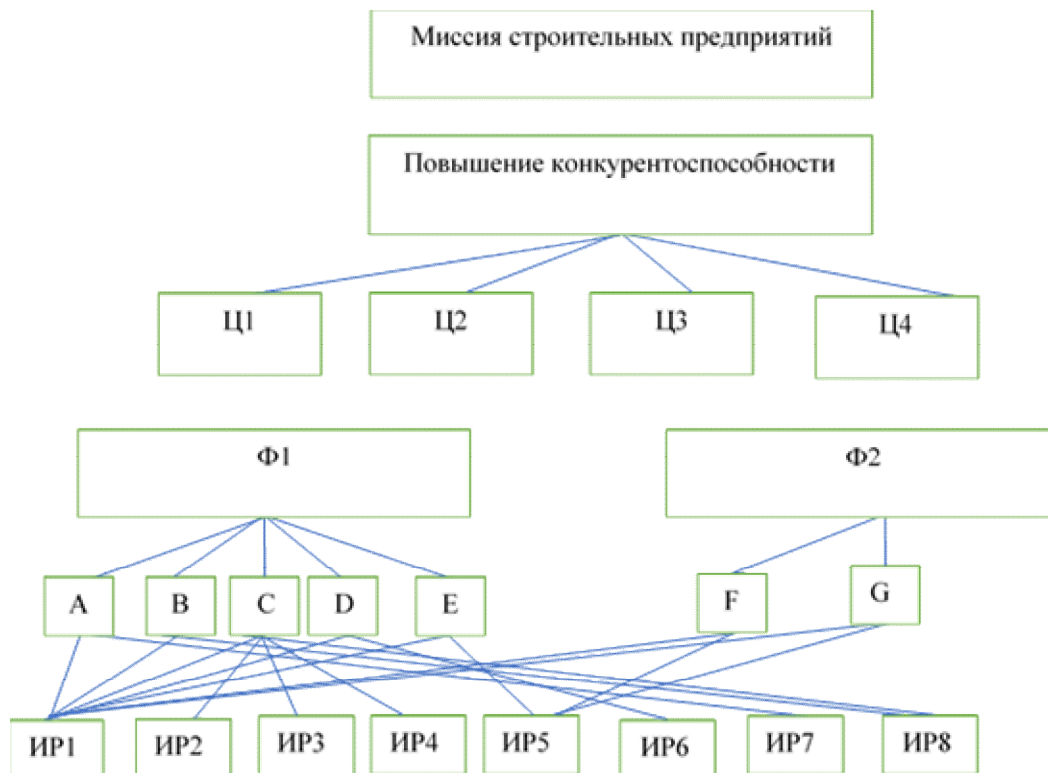
- 1) определение ключевых критериев, влияющих на конкурентоспособность строительства.
- 2) методика принятия решения по выбору оптимального с точки зрения конкурентоспособности строительного предприятия на основе использования метода Томаса Саати.

Основной раздел

Как показывает анализ современных методов и подходов к оценке конкурентоспособности строительства, на текущий момент существует множество проблем полноценной оценки и научно-обоснованных подходов к отбору конкурентоспособных предприятий. Конкурентоспособность предприятия является более сложным понятием в сравнении с конкурентоспособностью товара [1, 2].

С учетом отраслевой специфики на конкурентоспособность строительства могут оказывать влияние множество факторов. На рисунке представлена иерархия рассматриваемой задачи. Главная миссия – удержание и повышение их конкурентоспособности [3].

Примем, что ключевыми факторами конкурентоспособности строительных предприятий являются Ф1 – факторы спроса и Ф2 – факторы предложения.



Иерархия рассматриваемой задачи
Hierarchy of the problem under consideration

Управление в социально-экономических системах

Факторы в свою очередь могут описываться критериями. В табл. 1 представлен предлагаемый к рассмотрению перечень критериев А, В, С, D, E, F, G, половина из которых относятся к факторам спроса, половина – к факторам предложения.

Перечень критериев конкурентоспособности
List of competitiveness criteria

Таблица 1
Table 1

Номер	Наименование критерия
A	Качество выполняемых работ (можно рассматривать как отдельные СМР, так и в целом строительные объекты) .
B	Скорость заключения дистанционной сделки
C	Сроки выполнения
D	Уровень соответствия иным вкусам и предпочтениям потребителей в условиях пандемии
E	Соответствие факторам спекулятивного спроса
F	Соответствие используемой технологии конкурентным требованиям
G	Достаточность производственных площадей для деятельности компании

Под ИР понимаются инжиниринговые решения, которые имеют место быть в рамках рассматриваемого объекта исследования.

Для определения ключевых критериев из ряда рассмотренных необходимо найти общий рейтинг каждого критерия, а затем провести оценку влияния каждого на миссию организации [4–6].

Для этого необходимо выполнить построение трех матриц:

1. Оценка влияния стратегических целей на миссию.

С помощью метода экспертных оценок были получены результаты оценки (табл. 2).

Результаты мнений экспертов
Results of expert opinions

Таблица 2
Table 2

	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4
Миссия	0,1	0,4	0,4	0,1

2. Оценка влияния факторов на стратегические цели (табл. 3).

Результаты оценки влияния критериев
Results of the evaluation of the impact of the criteria

Таблица 3
Table 3

	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4
A	0,07	0,25	0,06	0,08
B	0,12	0,07	0,21	0,15
C	0,1	0,07	0,21	0,23
D	0,2	0,18	0,17	0,05
E	0,21	0,21	0,04	0,05
F	0,1	0,06	0,27	0,22
G	0,2	0,16	0,04	0,22

3. Итоговая матрица влияния инжиниринговых решений на критерии конкурентоспособности отражена в табл. 4.

Таблица 4

Матрица влияния инжиниринговых решений
на критерии конкурентоспособности

Table 4

Matrix of the impact of engineering solutions
on the competitiveness criteria

	A	B	C	D	E	F	G
ИР1	0,4	0,3	0,25	0,4	–	–	–
ИР2	–	–	0,25	–	0,5	0,35	0,4
ИР3	–	–	0,3	–	–	–	–
ИР4	–	–	0,15	–	–	0,4	–
ИР5	–	–	–	–	0,5	0,25	0,6
ИР6	0,6	0,2	–	0,1	–	–	–
ИР7	–	0,3	–	0,5	–	–	–
ИР8	–	0,2	0,05	–	–	–	–

Получив оценку, на её основе определим суммарную оценку по формуле (1) и рассчитаем суммарное влияние факторов на выполнение миссии – повышения конкурентоспособности [7]:

$$W_i = \sum_j^m W_{ij} \times W_j, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

$j = 1, 2, 3, \dots, m$;

W_i – вес i -й альтернативы;

W_{ij} – вес i -й альтернативы по отношению к j фактору;

W_j – вес j фактора;

Результаты расчетов представлены в табл. 5. Наибольшую оценку весов получили факторы D, F и C: уровень соответствия иным вкусам и предпочтениям потребителей, соответствие используемой технологии конкурентным требованиям и сроки выполнения соответственно.

Таблица 5

Определение суммарного влияния факторов
на конкурентоспособность строительных предприятий

Table 5

Determination of the total impact of factors
on the competitiveness of construction enterprises

Фактор	Степень влияния
A	0,139
B	0,139
C	0,145
D	0,165
E	0,126
F	0,164
G	0,122

Аналогично определим суммарное влияние инжиниринговых решений на конкурентоспособность строительных предприятий (табл. 6).

Проведённый анализ показывает, что наиболее важными ИР строительных объектов являются № 2, 1, 5, которые влияют практически на все рассмотренные критерии конкурентоспособности.

Таким образом, на основе произведённых расчетов есть возможность выделить ключевые критерии и ИР, влияющие на достижение конкурентоспособности строительных предприятий с целью последующего их совершенствования.

Таблица 6

Определение суммарного влияния инжиниринговых решений на конкурентоспособность строительных предприятий

Table 6

Determination of the total impact of engineering solutions on the competitiveness of construction companies

Фактор	Степень влияния
ИР 1	0,19955
ИР 2	0,20545
ИР 3	0,0435
ИР 4	0,08735
ИР 5	0,1772
ИР 6	0,1277
ИР 7	0,1242
ИР 8	0,03505

Решим задачу многокритериальной оптимизации. Рассмотрим на практическом примере предлагаемый автором алгоритм отбора наиболее оптимального с точки зрения конкурентоспособности строительного предприятия из ряда других на основе использования метода анализа иерархий Томаса Саати [8–10].

1-й этап – формирование цели. Применительно к практическому примеру целью будет являться выявление наиболее оптимального (с точки зрения конкурентоспособности) предприятия из ряда рассмотренных [11, 12].

2-й этап – определение состава критериев оценки. В данном случае рассматриваются факторы спроса и предложения и заявленные к ним критерии (см. рисунок).

3-й этап – расчет критериев по каждой СО и приведение их к однородному виду данных.

Нормализация критериев необходима для преобразования всех рассматриваемых критериев с целью приобретения наибольшей ясности в поставленной задаче выбора.

Нормализованные значения критериев для каждого альтернативного варианта организации (O1, O2, O3, O4) приведены в табл. 7. Расчет осуществлен с применением формулы (1).

Нормализованные значения критериев для альтернативных вариантов

Таблица 7

Normalized values of criteria for alternative options

Table 7

	A	B	C	D	E	F	G
O1	0,105	0,633	0,191	0,14	0,214	0,579	0,344
O2	0,638	0,084	0,338	0,685	0,142	0,108	0,289
O3	0,256	0,083	0,471	0,175	0,644	0,211	0,367

4-й этап – определение дерева целей и построение матрицы приоритетов [13, 14]. В данном случае дерево целей будет иметь следующую структуру сверху вниз: выбор оптимальной организации – критерии конкурентоспособности – варианты выбора (предприятия-конкуренты).

Используя метод парных сравнений, мы получаем обратно симметрическую матрицу.

Элементом матрицы $a(I, J)$ является интенсивность проявления элемента иерархии I относительно элемента иерархии J , оцениваемая по шкале интенсивности в табл. 8.

Фрагмент шкалы оценивания Саати

Таблица 8

Fragment of the Saati assessment scale

Table 8

1	Равная важность
2	Значение между 1 и 3
3	Умеренное превосходство одного над другим
...	
9	Наибольшее превосходство одного над другим

Если при сравнении одного фактора i с другим I , получается значение $a(i, j) = b$, то при сравнении второго фактора с первым получаем $a(j, i) = 1/b$. Полученная матрица приоритетов приведена в табл. 9.

Итоговая матрица

Таблица 9

The final matrix

Table 9

Критерий	A	B	C	D	E	F	G
A	1	3	0,25	0,5	5	3	1
B	0,33	1	0,2	0,33	1	2	0,5
C	4	5	1	0,5	6	6	2
D	2	3	2	1	6	6	3
E	0,2	1	0,16	0,16	1	1	0,25
F	0,33	0,5	0,16	0,16	1	1	0,33
G	1	2	0,5	0,33	4	3	1

Относительное значение каждого критерия по отдельности в рассматриваемой иерархии определяется оценкой соответствующего ему элемента собственного вектора матрицы приоритетов, нормализованного к единице.

Расчет собственных векторов матрицы осуществляется путем вычисления среднего геометрического по каждой строке матрицы:

$$X_i = (A_{i1} \times A_{i2} \times A_{i3} \times A_{ij})^{1/j}, \quad (2)$$

где X_i – собственный вектор матрицы приоритета;

A_{ij} – численное значение матрицы приоритета i -й строки j -го столбца.

Таким образом, в табл. 10 получены расчетные значения вектора приоритета критериев.

Данные вектора приоритета по каждому критерию

Таблица 10

Priority vector data for each criterion

Table 10

Критерий	Вектор приоритета	Нормализованные к единице значения вектора
A	1,279854	0,139
B	0,580533	0,063
C	2,559708	0,278
D	2,783927	0,302
E	0,39067	0,042
F	0,396594	0,043
G	1,219014	0,132

После производится расчет глобальных приоритетов каждого из вариантов по формуле (1), результаты в табл. 11.

Расчет глобальных приоритетов каждого из вариантов

Таблица 11

Calculation of global priorities for each option

Table 11

Критерий							Глобальный приоритет
A	B	C	D	E	F	G	
Численное значение							
0,139	0,063	0,278	0,302	0,042	0,043	0,132	O1
0,105	0,633	0,191	0,14	0,214	0,579	0,344	O2
0,638	0,084	0,338	0,685	0,142	0,108	0,289	O3
0,256	0,083	0,471	0,175	0,644	0,211	0,367	O4

На основе полученных данных оптимальной с точки зрения конкурентоспособности следует считать Организацию 2 [15].

Выводы

Предложенная методика разработана для российских строительных компаний, функционирующих в современных экономических условиях. Основой для создания методики послужил отечественный и зарубежный опыт в области управления конкурентоспособностью строительных компаний, а также привлечение известных методов, инструментов и экономико-математических моделей для решения принципиально нового класса задач.

В рамках заданных целей были решены следующие задачи:

- дополнены факторы и критерии конкурентоспособности строительства;
- определены ключевые критерии из ряда рассмотренных;
- найден общий рейтинг по каждому критерию;
- проведена оценка влияния целей организации на её миссию;
- методом анализа иерархий определён алгоритм идентификации наиболее конкурентоспособной организации из ряда рассмотренных.

Выполненное исследование также позволяет сделать следующий вывод: успешность развития строительной отрасли во многом определяется уровнем развития инжиниринга. Поэтому реализация строительного проекта должна осуществляться с учетом стратегических целей организации и привязки к ключевым критериям и инжиниринговым решениям, влияющим на конкурентоспособность строительства.

Литература

1. Ахенбах, Ю.А. Конкурентный анализ и управление конкурентоспособностью предприятия / Ю.А. Ахенбах, С.А. Баркалов, О.Н. Бекирова, Ф.И. Рагимов. – Воронеж: Научная книга, 2012.
2. Управление проектами: путь к успеху: учебно-методический комплекс / С.А. Баркалов, Е.В. Баутина, О.Н. Бекирова и др. – Воронеж – 2017 г. – С. 415
3. Бекирова, О.Н. Формирование массива показателей, характеризующих деятельность строительного предприятия / О.Н. Бекирова // Экономика и менеджмент систем управления. Научно-практический журнал. – 2013. – № 1 (7). – С. 16–27.
4. Четырбок, А.Г. Стратегический инжиниринг бизнес-процессов предпринимательских структур: автореф. дис. ... канд. экон. наук / А.Г. Четырбок. – СПб., 2004. – 18 с.
5. Четырбок, А.Г. Проблемы внедрения процессного подхода к управлению предпринимательскими структурами и пути их решения / А.Г. Четырбок // Российский экономический интернет-журнал / Академия труда и социальных отношений. – М., 2004. – <http://www.e-rei.ru/Articles/2004/Tchetirb.htm>.
6. Оптимизационные модели и методы в управлении строительным производством / П.И. Семенов, С.А. Баркалов, В.Н. Бурков и др. – Воронеж: Научная книга, 2007. – 423 с.
7. Бекирова, О.Н. Алгоритм рыночной кластеризации жилищного строительства с точки зрения потребителей / О.Н. Бекирова, М.С. Трифонова // Научно-практический журнал «Экономика и менеджмент систем управления». – 2016. – 4.2 (22).
8. Модели и методы мультипроектного управления строительством / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, В.Г. Концедалов, С.В. Сиренько // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. – 2005. – № 1. – С. 152–155.
9. Бекирова, О.Н. Разработка методов повышения конкурентоспособности в строительной сфере / О.Н. Бекирова, М.С. Трифонова // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологии. – Воронеж, 2020. – С. 251–254.
10. Задачи управления в социальных и экономических системах / В.Н. Бурков, И.А. Горгидзе, Г.С. Хуродзе, А.В. Щепкин. – М.: СИНТЕГ, 2005. – 256 с.
11. Баркалов, С.А. Комплексная оценка качества возведения гражданских зданий в условиях саморегулирования / С.А. Баркалов, О.Н. Бекирова, М.С. Трифонова // Теория и практика экономики и предпринимательства. XVII Всероссийская с международным участием научно-

практическая конференция. Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского. – Симферополь, 2020. – С. 18–23.

12. Бекирова, О.Н. Имитационное моделирование управления конкурентоспособностью строительных проектов / О.Н. Бекирова, М.С. Трифонова, А.В. Приходченко // Управление строительством. – 2017. – № 1 (9). – С. 110–115.

13. Управленческие решения: теоретические основы: учеб. пособие/ С.А. Баркалов, Е.В. Баутина, О.Н. Бекирова, Я.С. Строганова. – Воронеж: Изд-во «Ритм», 2017. – 293 с.

14. Баркалов, С.А. Математические методы многокритериального оценивания привлекательности проектов / С.А. Баркалов, А.Ю. Глушков, С.И. Моисеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 111–119. DOI: 10.14529/ctcr200111

15. Бекирова, О.Н. Механизм минимизации финансовых рисков СПС / О.Н. Бекирова, М.С. Трифонова // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. – 2019. – С. 1675–1678. DOI: 10.25728/vspru.2019.1675

Бекирова Ольга Николаевна, канд. экон. наук, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; bekiron@mail.ru.

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; bsa610@yandex.ru.

Трифонова Мария Сергеевна, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; marichterr@gmail.com.

Поступила в редакцию 21 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210309

EFFICIENT ENGINEERING IN DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION SECTOR COMPETITIVENESS

O.N. Bekirova, bekiron@mail.ru,
S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru,
M.S. Trifonova, marichterr@gmail.com

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

The COVID-19 pandemic has really become a real shock for the whole world. The way of life has changed not only for people, but also for companies in various industries. Today, the real estate market, like many other industries, is in conditions of economic instability. The study highlights the problems faced by the construction sector in the current conditions of the coronavirus pandemic. One of these problems is the sustainable competitiveness of construction and its compliance with new consumer preferences. **Aim.** The study of the influence of engineering solutions and other factors on the competitiveness of construction in modern economic conditions, the definition of key criteria. Development and description of the decision-making methodology for choosing the optimal construction enterprise from the point of view of competitiveness. **Materials and methods.** The methods of system analysis, optimization methods, hierarchy analysis and decision theory are applied in the work. Within the framework of the proposed methodology, the author's method of identifying key competitiveness criteria has been developed. Since the problem of choosing the optimal solution from among the alternatives is based on a multi-criteria approach, the use of this method is quite appropriate. The template for the formation of the methodology was identified based on the analysis of existing research in this area. **Results.** The author summarizes and supplements the criteria and factors affecting the competitiveness of construction organizations in the study. The author's method of making a decision on determining the optimal construction enterprise from the point of view of

competitiveness based on the criteria considered by the author is presented. This technique includes several stages: 1) forming a goal; 2) formation of criteria by which organizations will be evaluated; 3) calculation of criteria for each organization and bringing them to a homogeneous type of data; 4) building a tree of goals and a matrix of priorities; 5) Determining the values of priority vectors for each organization under study. **Conclusion.** The total influence of criteria and engineering solutions on the competitiveness of construction is determined. In this regard, the implementation of the construction project should be carried out taking into account the strategic goals of the organization and binding to the identified criteria. The proposed methodology is developed for Russian construction companies operating in modern economic conditions.

Keywords: classification, construction, management, competitiveness, engineering.

References

1. Akhenbach Yu.A., Barkalov S.A., Bekirova O.N., Ragimov F.I. *Konkurentnyy analiz i upravleniye konkurentosposobnost'yu predpriyatiya* [Competitive analysis and enterprise competitiveness management]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2012.
2. Barkalov S.A., Bautina E.V., Bekirova O.N., Burkova I.V., Nasonova T.V. *Upravlenie proektami: put' k uspekh* [Project management: the way to success]. Voronezh, 2017. 415 p.
3. Bekirova O.N. [Formation of an array of indicators characterizing the activity of a construction enterprise]. *Economics and management of management systems. Scientific and practical journal*, 2013, no. 1 (7), pp. 16–27. (in Russ.)
4. Chetyrbok A.G. *Strategicheskiy inzhiniring biznes-protsessov predprinimatel'skikh struktur: avtoref. dis. kand. ekon. nauk* [Strategic engineering of business processes of entrepreneurial structures. Abstract of the dissertation of the candidate of Economic Sciences]. St. Petersburg, 2004. 18 p.
5. Chetyrbok A.G. [Problems of implementing a process approach to managing business structures and ways to solve them]. *Russian Economic Online Journal*. Academy of Labor and Social Relations, 2004. Available at: <http://www.e-rei.ru/Articles/2004/Tchetirb.htm>. (in Russ.)
6. Semenov P.I., Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N., Polovinkina A.I. *Optimizatsionnyye modeli i metody v upravlenii stroitel'nykh proizvodstvom* [Optimization models and methods in the management of construction production]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2007. 423 p.
7. Bekirova O.N., Trifonova M.S. [Algorithm of market clustering of housing construction from the point of view of consumers]. *Scientific and practical journal "Economics and Management of Management Systems"*, 2016, no. 4.2 (22). (in Russ.)
8. Barkalov S.A., Burkov V.N., Kontsedalov V.G., Sirenko S.V. [Models and methods of multi-project construction management]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering*, 2005, no. 1, pp. 152–155. (in Russ.)
9. Bekirova O.N., Trifonova M.S. [Development of methods for improving competitiveness in the construction sector]. *Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti: sb. tr. pobediteley konkursa nauch.-issled. rabot studentov i aspirantov VGTU po prioritetyam napravleniyam razvitiya nauki i tekhnologii* [Scientific support of the Voronezh Region. Collection of works of the winners of the competition of research works of students and postgraduates of VSTU in priority areas of science and technology development]. Voronezh, 2020, pp. 251–254. (in Russ.)
10. Burkov V.N., Gorgidze I.A., Khurodze G.S., Shchepkin A.V. *Zadachi upravleniya v sotsial'nykh i ekonomicheskikh sistemakh* [Management tasks in social and economic systems]. Moscow, SINTEG Publ., 2005. 256 p.
11. Barkalov S.A., Bekirova O.N., Trifonova M.S. [Comprehensive assessment of the quality of construction of civil buildings in the conditions of self-regulation]. *Teoriya i praktika ekonomiki i predprinimatel'stva. XVII Vserossiyskaya s mezhdunarodnym uchastiyem nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Krymskiy federal'nyy universitet imeni V.I. Vernadskogo* [Theory and practice of economics and entrepreneurship. XVII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky], Simferopol, 2020, pp. 18–23. (in Russ.)
12. Bekirova O.N., Trifonova M.S., Prikhodchenko A.V. [Simulation modeling of the management of the competitiveness of construction projects]. *Upravlenie stroitel'stvom* [Construction management], 2017, no. 1 (9), pp. 110–115. (in Russ.)

13. Barkalov S.A., Bautina E.V., Bekirova O.N., Stroganova Ya.S. *Upravlencheskiye resheniya: teoreticheskiye osnovy: ucheb. posobiye* [Managerial decisions: a textbook]. Voronezh, Ritm Publ., 2017. 293 p.

14. Barkalov S.A., Glushkov A.Yu., Moiseev S.I. Mathematical Methods of Multicriteria Evaluation of Attractiveness of Projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 111–119. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200111

15. Bekirova O.N., Trifonova M.S. [Mechanism for minimizing financial risks of the SPS]. *XIII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2019* [The XIII All-Russian Meeting on the problems of VSPU management – 2019], 2019, pp. 1675–1678. (in Russ.) DOI: 10.25728/vspu.2019.1675

Received 21 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бекирова, О.Н. Эффективность инжиниринга в формировании конкурентоспособности строительства / О.Н. Бекирова, С.А. Баркалов, М.С. Трифонова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 90–99. DOI: 10.14529/ctcr210309

FOR CITATION

Bekirova O.N., Barkalov S.A., Trifonova M.S. Efficient Engineering in Development of Construction Sector Competitiveness. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 90–99. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210309

МОДЕЛЬ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ

О.С. Перевалова, С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, Д.Н. Батракова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

В работе рассмотрены некоторые аспекты управления процессом наставничества, а именно стимулирование труда наставников. В этих целях подробно рассматривается модель оценки обучения персонала, проходящего в форме наставничества – одной из наиболее популярных форм обучения на рабочем месте. **Цель исследования** заключается в разработке эффективной модели стимулирования наставников, применение которой должно повысить эффективность управления их деятельностью, так как эта модель предполагает не только налаживание эффективной системы надбавок и доплат наставникам, но и систему оценок выполняемых персоналом обязанностей. **Материалы и методы.** Оценку обучения планируется проводить по следующим направлениям: корпоративные компетенции; профессиональные компетенции и выполнение установленного плана. Для этого предлагается использовать метод «360 градусов», непосредственный осмотр и другие методы сбора информации в зависимости от измеряемых показателей. По итогам проведения оценивания предполагается получение комплексной оценки наставничества, которая может быть использована для корректировки процедуры наставничества. Также итогом могут быть комплексная оценка ученика, которая демонстрирует результаты обучения, и комплексная оценка наставника, которая будет использована для создания модели стимулирования наставников. Для формирования эффективной системы наставничества предлагается сделать размер надбавки за наставничество динамичным, т. е. напрямую зависящим от результатов наставничества – комплексной оценки наставника. Построение комплексной оценки процедуры наставничества предлагается с помощью аддитивной свертки критериев. **Результаты.** Итак, суть динамичности надбавок наставников заключается в следующем. Во-первых, наставник будет получать весь период наставничества фиксированную компенсирующую надбавку. Во-вторых, наставник будет получать стимулирующую надбавку. Ее величину предлагается определять как долю от оклада наставника, где доля определяется комплексной оценкой итогов процедуры наставничества, которые напрямую будут зависеть от вклада наставника в этот процесс. **Заключение.** Предполагается, что внедрение предложенной модели в практику управления процедурой наставничества повлечет повышение ее результативности и снижение формальности, что зачастую наблюдается на практике.

Ключевые слова: наставничество, оценка персонала, надбавка, стимулирование, критерии, аддитивная свертка.

Введение

Для создания эффективной системы стимулирования необходима, как уже отмечалась ранее, полноценная всесторонняя оценка выполнения персоналом своих функциональных обязанностей, а в нашем случае – выполнение функциональных обязанностей наставниками. Отметим, что далее речь будет идти именно о разработке системы стимулирования наставников.

При разработке системы стимулирования наставников в организации всегда решаются различные вопросы, обусловленные некоторыми факторами. А именно, например, материальным состоянием организации, в которой будет проводиться процедура наставничества. Стоит заметить, что небольшим организациям может оказаться не под силу оплачивать работу наставников.

Следующим немаловажным фактором являются приоритеты в организационной культуре компании и сфера ее деятельности. Компании, парадигму которых можно выразить фразой «оплата по результату», будут обязаны ввести оплату для наставников, иначе эта процедура не будет воспринята ее сотрудниками как следует.

Еще одним немаловажным фактором является насыщенность действий в области набора персонала и частота связанных с этими действиями мероприятий. При частом наборе новичков, которые будут нуждаться в наставниках, может сложиться ситуация, что персонал, выполняющий

функции наставников, не будет успевать выполнять свои прямые обязанности, соответствующие должности, и это отразится на его заработной плате. Поэтому руководству компании стоит помнить, что без дополнительной оплаты функций наставников они не будут заинтересованы в этом процессе, особенно при высокой интенсивности набора сотрудников.

Отсутствие оплаты естественным образом будет демотивировать наставников, так как этот процесс требует существенных временных, эмоциональных затрат, отрывает их от выполнения основных профессиональных обязанностей. И далеко не на каждом предприятии сформировалась организационная культура, в которой процесс наставничества позиционируется как серьезная процедура, требующая большого внимания и серьезной проработки [1]. Поэтому к вопросу разработки системы стимулов стоит подойти с большой серьезностью и ответственностью, чтобы наставники изначально были замотивированы ею на качественную работу, на достижение поставленной цели – обучение учеников требующимся профессиональным навыкам и трудовым (профессиональным) и корпоративным компетенциям.

Стоит помнить, что материальное стимулирование наставников может привести к тому, что будет потерян неформальный элемент общения наставника с учениками, что еще раз подчеркивает, что при разработке этой системы нужно быть очень аккуратным, чтобы соблюсти баланс интересов. Не стоит забывать, что при разработке системы стимулирования наставников нужно учесть интересы и руководства организации, которое будет финансировать эту систему (табл. 1).

Интересы участников системы наставничества в организации
Interests of participants of the mentoring system in the organization

Таблица 1

Table 1

№ п/п	Участники системы наставничества	Интересы
1	Наставник	Компенсация перерасхода личных ресурсов
2	Ученики	Качественное обучение
3	Руководство организации	Эффективное расходование финансовых ресурсов, экономия

Существует множество вариантов стимулов материальных и нематериальных.

К наиболее часто применяемым материальным стимулам наставников можно отнести [1]:

- постоянные доплаты к основной заработной плате в размере примерно пяти процентов от оклада;
- фиксированные доплаты за каждого ученика в размере от десяти до пятнадцати процентов от оклада;
- фиксированные доплаты за каждого успешно прошедшего аттестацию ученика (размер доплаты в том же диапазоне, что и в предыдущем варианте);
- фиксированные единовременные премии по итогам года или квартала при условии успешной аттестации учеников;
- льготные кредиты лучшим наставникам и т. п.

К нематериальным стимулам можно отнести множество различных вариантов проявления «корпоративной благодарности», которая может проявляться в разных формах. Здесь можно выделить две основные группы: денежные и неденежные. К денежным относятся следующие условно нематериальные стимулы: увеличение размеров социального пакета и ДМС; выделение дополнительного периода отпуска; предоставление права пользования материальными ресурсами компании (не в личных целях); обучение персонала и др.

К неденежным проявлениям корпоративной лояльности относятся: предоставление возможности участвовать в разработке и принятии решений в отношении развития компании; занесение в кадровый резерв; повышение категории сотрудника; информация о достижениях сотрудника, размещенная с помощью различных средств и в различных формах, а также другие виды признания значимости сотрудника для компании.

Стоит отметить, что «корпоративная благодарность» будет цениться только в тех коллективах, которые имеют сильную и «правильно» ориентированную организационную культуру, т. е.

соответствующую целям, миссии компании и видениям ее владельцев. В компаниях со слабой организационной культурой эффективными будут только материальные стимулы [2].

Для каждой конкретной организации при разработке системы наставничества важно скомпиллировать их таким образом, чтобы результаты наставничества удовлетворили все заинтересованные стороны и привели к желаемому результату.

1. Описание подхода

Для формирования эффективной системы наставничества с учетом изученного опыта [3, 4] предлагается сделать размер надбавки динамическим, т. е. напрямую зависящим от результатов наставничества – комплексной оценки системы наставничества.

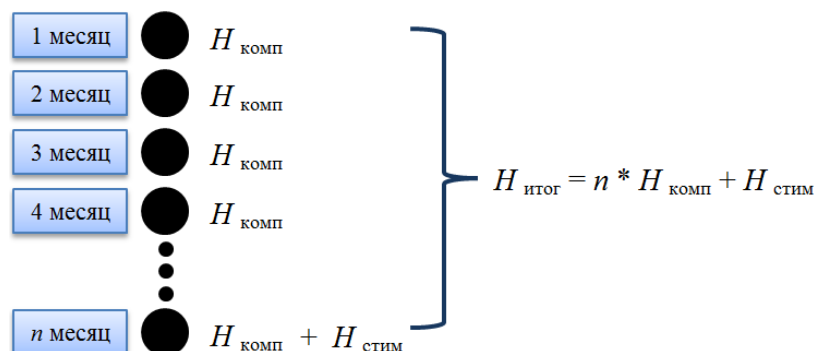
Итак, во-первых, наставник будет получать весь период наставничества фиксированную компенсирующую или стимулирующую надбавку. Выбор типа надбавки определяется организацией, исходя из ее итоговой величины и условий НК РФ [5].

Размер компенсирующей надбавки определяется, исходя из положений ТК РФ [6] об условиях работы, отклоняющихся от нормальных. Здесь ключевым моментом является время, отведенное на процедуру наставничества, так как его размер будет принят за внеурочное время, которое будет определять размер надбавки [7].

Если же эта надбавка будет отнесена к стимулирующим, то организация самостоятельно задает ее размер. Здесь уместно было бы оттолкнуться от величины прожиточного минимума, что наглядно демонстрировало бы ее значимость с экономической точки зрения.

Во-вторых, наставник будет получать стимулирующую надбавку. Ее величину предлагается определять как долю от оклада наставника, которая определяется комплексной оценкой итогов процедуры наставничества, напрямую зависящих от вклада наставника в этот процесс.

То есть максимизировать итоговую надбавку $H_{\text{итог}}$ можно будет за счет увеличения стимулирующей надбавки $H_{\text{стим}}$, а для этого необходимо качественно выполнять свои обязанности (рис. 1).



где $H_{\text{итог}}$ – итоговая премия;

$H_{\text{комп}}$ – компенсирующая надбавка (1-го типа);

$H_{\text{стим}}$ – стимулирующая надбавка (2-го типа);

n – период наставничества, в мес.

Рис. 1. Схема получения надбавок наставником
Fig. 1. Scheme of allowances for the mentor

Подытожим сказанное выше: наставник весь период наставничества будет получать компенсирующую его дополнительные затраты времени надбавку, а по завершению процедуры наставничества – стимулирующую надбавку. Предполагается, что первая должна подпитывать его заинтересованность весь период наставничества к выполнению своих обязанностей наиболее качественно с целью получить, возможно, целый оклад по завершению процедуры наставничества (вторая надбавка).

Стоит отметить, что такая система стимулирования, конечно же, не возможна без идеально налаженной в организации системы оценки персонала.

Рассмотрим модель построения комплексной оценки процедуры наставничества, которая будет основой для расчета надбавки второго типа, описанной выше.

Эта задача является многокритериальной, поэтому уместно применить аддитивную свертку критериев для получения комплексной оценки [8–10]. Поскольку комплексная оценка, полученная этим способом, будет являться безразмерной величиной и изменяться в пределах от 0 до 1, где 1 – максимальное значение оценки, а 0 – соответственно минимальное, то при получении оценки 1 наставник получит в качестве стимулирующей надбавки второго типа сумму, равную его окладу, при оценке 0,5 – половину своего оклада и т. д.

Также эти оценки можно использовать для формирования рейтинга наставников, который может быть использован для их отбора в том случае, когда число наставников превышает число учеников.

Свертывание критериев предполагает проведение процедур, позволяющих набор критериев p_1, p_2, \dots, p_n представить в виде одного числа – комплексной оценки $K = f(p_1, p_2, \dots, p_n)$ [9, 10].

Рассмотрим этапы аддитивной свертки (рис. 2).

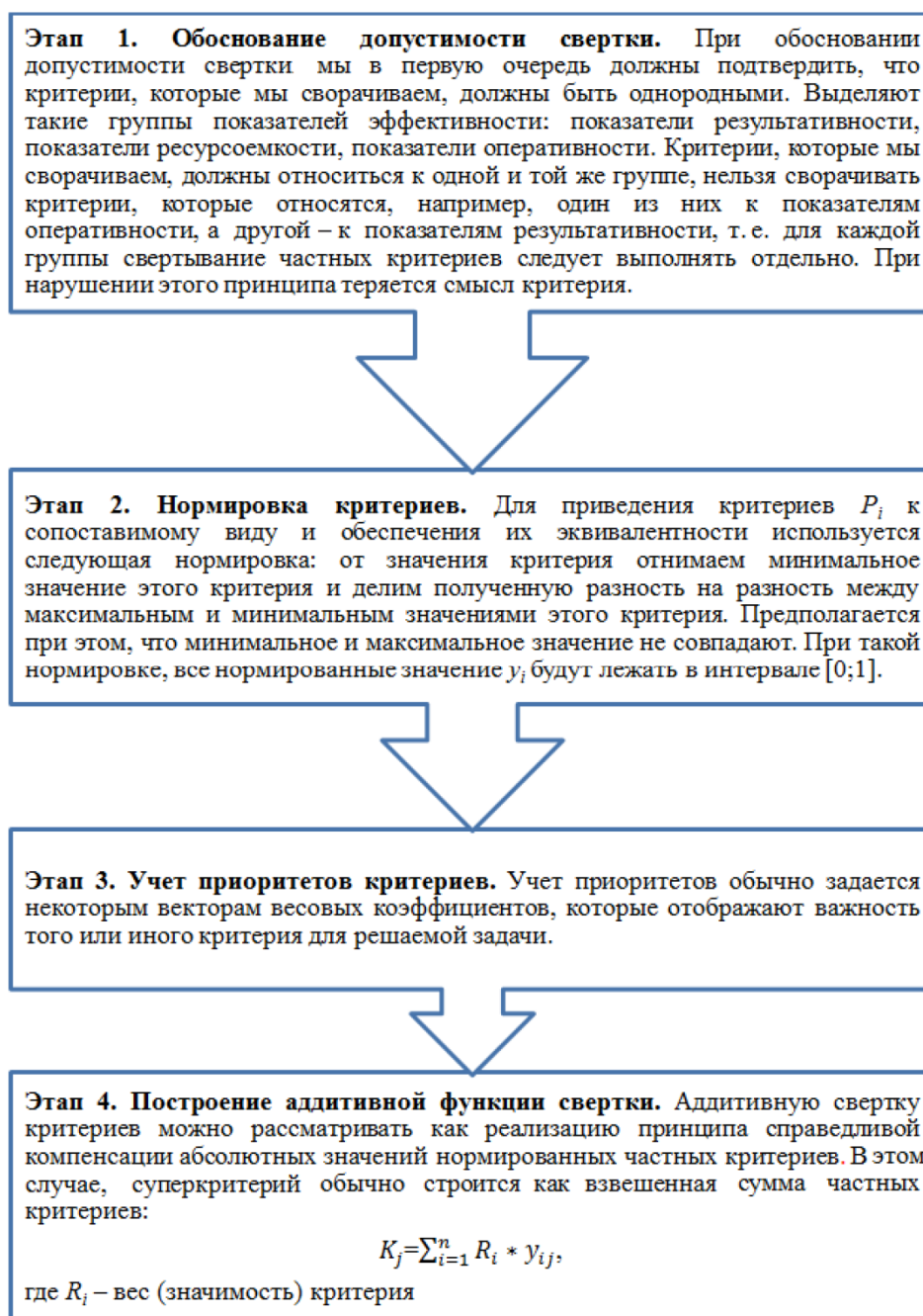


Рис. 2. Схема этапов аддитивной свертки
Fig. 2. Schematic of the additive convolution steps

2. Практические расчеты

Для наглядности сказанного выше рассмотрим следующий пример.

Пример.

Необходимо получить комплексную оценку выполнения наставниками их функций. Для этого будем использовать следующие критерии:

1) оценка компетенций ученика после прохождения процедуры наставничества (проводится посредством метода «360 градусов»), в баллах – P_1 ;

2) оценка изменения производственных показателей ученика после прохождения процедуры наставничества (проводится по средствам непосредственного наблюдения, хронометража и т. п.), например, сокращение времени выполнения какой-либо операции, в минутах – P_2 ;

3) оценка наставника, которая проводилась на этапе отбора наставников [4, 11, 12] (этот критерий изначально должен заставлять наставников следить за своей образованностью и квалификацией), в баллах – P_3 ;

4) оценка наставника учеником, которая может быть получена на этапе оценки результатов наставничества посредством метода «360 градусов», в баллах – P_4 ;

5) стаж работы наставником (должен влиять на наставника аналогично предыдущему критерию), лет – P_5 .

Стоит отметить, что возможны и другие критерии.

Решение.

Этап 1. Заметим, во-первых, для балльной оценки везде используется десятибалльная шкала; во-вторых, все перечисленные критерии можно отнести к показателям результативности.

Итак, исходные данные представлены в табл. 2.

Исходные данные

Таблица 2

Input data

Table 2

№ п/п	Критерии	Номер наставника			
		1	2	3	4
1	P_1	9	8	7	8
2	P_2	5	6	3	2
3	P_3	7	8	9	6
4	P_4	8	9	7	7
5	P_5	3	4	4	5

Этап 2. Проведем нормирование критериев оценки.

При этом формула для приведения критериев, ориентированных на максимум [13]:

$$y_{ij} = \frac{p_{ij} - p_{ij}^{\min}}{p_{ij}^{\max} - p_{ij}^{\min}} \quad (1)$$

Формула для критериев, ориентированных на минимум:

$$y_{ij} = 1 - \frac{p_{ij} - p_{ij}^{\min}}{p_{ij}^{\max} - p_{ij}^{\min}} \quad (2)$$

где y_{ij} – нормированное значение критерия p_{ij} ;

p_{ij}^{\max} , p_{ij}^{\min} – минимально и максимально возможные значения показателей, определяемые

по следующим формулам:

$$p_{ij}^{\min} = p_{\min} - 0,1 \cdot p_{\min} \quad (3)$$

$$p_{ij}^{\max} = p_{\max} + 0,1 \cdot p_{\min} \quad (4)$$

где p_{\min} и p_{\max} – минимальное и максимальное значение соответствующего критерия из исходных данных.

Таким образом, используя (3), (4) для критерия P_1 , получим:

$$p_{ij}^{\min} = 7 - 0,1 \cdot 7 = 6,3, \quad p_{ij}^{\max} = 9 + 0,1 \cdot 7 = 9,7;$$

$$P_2: p_{ij}^{\min} = 2 - 0,1 \cdot 2 = 1,8, \quad p_{ij}^{\max} = 6 + 0,1 \cdot 2 = 6,2;$$

$$P_3: p_{ij}^{\min} = 6 - 0,1 \cdot 6 = 5,4, \quad p_{ij}^{\max} = 9 + 0,1 \cdot 6 = 9,6;$$

$$P_4: p_{ij}^{\min} = 7 - 0,1 \cdot 7 = 6,3, \quad p_{ij}^{\max} = 9 + 0,1 \cdot 7 = 9,7;$$

$$P_5: p_{ij}^{\min} = 3 - 0,1 \cdot 3 = 2,7, \quad p_{ij}^{\max} = 5 + 0,1 \cdot 3 = 5,3.$$

Стоит отметить, что в представленном примере все критерии ориентированы на максимум, поэтому для их нормирования будем пользоваться формулой (1). Результаты нормирования критериев из табл. 2 представим в табл. 3.

Таблица 3

Нормированные значения критериев – y_{ij}

Table 3

Normalized values of the criteria – y_{ij}

№ п/п	Критерии	Номер наставника			
		1	2	3	4
1	P_1	0,79418	0,5	0,20588	0,5
2	P_2	0,72727	0,95455	0,27273	0,04545
3	P_3	0,38095	0,61905	0,85714	0,14286
4	P_4	0,5	0,79418	0,20588	0,20588
5	P_5	0,11539	0,5	0,5	0,88462

Этап 3. Здесь проводится расчет весовых коэффициентов, отражающих важность каждого из рассматриваемых критериев. Оценка проводилась с применением девятибалльной шкалы американского математика Т. Саати [14].

Пусть P_1, P_2, \dots, P_n – альтернативы (критерии наставников), w_i – интенсивность (важность) альтернативы P_i в формировании комплексной оценки наставников, числовую оценку которой проставляет лицо, принимающее решение, или эксперт (в данном случае в качестве эксперта выступает автор работы) в соответствии с выбранной шкалой Т. Саати [14], тогда элементы матрицы будут иметь следующий вид (табл. 4) и формировать собой матрицу A и определяться как

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}. \quad (5)$$

Таблица 4

Матрица A парных сравнений альтернатив (т. е. критериев P_i)

Table 4

Matrix A of pairwise comparisons of alternatives (i. e. criteria P_i)

$i \setminus j$	P_1	P_2	...	P_n
P_1	1	w_1/w_2	...	w_1/w_n
P_2	w_2/w_1	1	...	w_2/w_n
...
P_n	w_n/w_1	w_n/w_2	...	1

Заметим, что матрица парных сравнений в данном случае является положительно определенной, обратно-симметричной матрицей и имеет ранг. Свойства таких матриц приведены ниже:

- $a_{ij} = a_{ji}$ при $i = j$;
- если $i > j$, то a_{ij} , а при $j > i$, $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

Далее проводятся парные сравнения альтернатив P_1, \dots, P_n , а результаты заносятся в таблицы. Стоит заметить, что результаты экспертизы как обычно при экспертных оценках будут несколько субъективны.

Управление в социально-экономических системах

Матрица является согласованной тогда и только тогда, когда порядок матрицы и ее наибольшее собственное значение совпадают, т. е. $\lambda_{\max} = n$ [15].

Искомый вектор приоритетов является собственным вектором матрицы парных сравнений, соответствующим максимальному собственному числу (λ_{\max}). Следовательно, сначала следует найти λ_{\max} – решить векторное уравнение $A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w$.

Приближенное значение собственного столбца матрицы отыскивается методом среднего геометрического [15].

Оценка качества данных на согласованность [15] определяется индексом согласованности и относительной согласованностью матрицы сравнений.

Индекс согласованности (CI) дает сведения о нарушениях согласованности [15]. Расчет описанных выше показателей представлен в табл. 5.

Таблица 5

Вспомогательная таблица (расчет приближенного значения собственного столбца матрицы A методом среднего геометрического)

Table 5

Auxiliary table (calculation of the approximate value of the eigencolumn of matrix A by the method of geometric mean)

Критерий оценки	P_1	P_2	...	P_n	Оценка компонентов собственного вектора матрицы парных сравнений	Нормализованная оценка компонентов вектора приоритетов (α_i)
P_1	$\frac{w_1}{w_1}$	$\frac{w_1}{w_2}$	...	$\frac{w_1}{w_n}$	$x_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \frac{w_1}{w_j}}$	$\frac{x_1}{\sum_{i=1}^n x_i}$
...
P_n	$\frac{w_n}{w_1}$	$\frac{w_n}{w_2}$	...	$\frac{w_n}{w_n}$	$x_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \frac{w_n}{w_j}}$	$\frac{x_n}{\sum_{i=1}^n x_i}$
Σ	$\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_1}$	$\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_2}$	...	$\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_n}$	$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \frac{w_i}{w_j}}$	1

CI определяется по формуле

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (6)$$

где λ_{\max} – наибольшее собственное значение матрицы A . Оно определяется по формуле

$$\lambda_{\max} = R_1 \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_1} + R_2 \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_2} + \dots + R_n \sum_{i=1}^n w_{in}, \quad (7)$$

а

$$R_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \frac{w_i}{w_j}} / \left(\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n \frac{w_i}{w_j}} \right). \quad (8)$$

CI не зависит от шкал сравнений, но зависит от числа парных сравнений. Он всегда положителен. Чем меньше противоречий в сравнениях, тем меньше его величина.

В целях установления степени точности отражения согласованности суждений индексом CI нужно рассчитать следующее отношение согласованности:

$$CR = \frac{CI}{CIS}, \quad (9)$$

где CR – отношение согласованности, CIS – случайный индекс согласованности.

В [15] приведены порядок матрицы и соответствующие ему средние CI .

В соответствии с условиями метода анализа иерархий величина CR не должна превышать 0,1 для малого количества параметров n и 0,2 – при большом количестве критериев n и их сложной взаимосвязи.

Вернемся к рассматриваемому примеру.

В табл. 6 представлена матрица парных сравнений критериев по предпочтениям эксперта (в качестве которого в данном случае выступает автор работы) с расчетами оценок компонентов собственного вектора матрицы парных сравнений и их нормализованных значений.

Таблица 6

Результирующая матрица парных сравнений

Table 6

Resulting matrix of pairwise comparisons

Критерий оценки	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	Оценка компонентов собственного вектора матрицы парных сравнений	Нормализованная оценка компонентов вектора приоритетов (R_i)
P_1	1	5	5	4	2	4,9036	0,539362
P_2	$\frac{1}{5}$	1	3	2	2	2,3351	0,256849
P_3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	1	2	2	1,2651	0,139149
P_4	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	0,4152	0,045674
P_5	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	0,1724	0,018966
Σ	2,15	7,33	10	10	8	9,091386	1

Теперь рассчитаем наибольшее собственное значение матрицы по (7):

$$\lambda_{\max} = R_1 \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_1} + R_2 \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{w_2} + \dots + R_n \sum_{i=1}^n w_{in} = 5,043145.$$

Как видим, оно слабо отличается от $n = 5$, что свидетельствует о согласованности матрицы парных сравнений критериев.

Далее рассчитаем индекс согласованности по (6):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0,010786.$$

Случайный индекс согласованности $CIS = 1,12$ для нашей матрицы [15], а отношение согласованности по (9):

$$CR = \frac{CI}{CIS} = 0,009631.$$

В рамках модели анализа иерархий полученное значение $CR \approx 0,01$ не более 0,1 для малого количества параметров n , что свидетельствует о согласованности матрицы A парных сравнений критериев.

Это в свою очередь свидетельствует о том, что полученным результатам обоснованно можно доверять.

Таким образом, были получены весовые показатели значимости рассматриваемых критериев (табл. 7).

Весовые показатели значимости рассматриваемых критериев

Table 7

Weighting indices of the significance of the criteria under consideration

№ п/п	Название	Значимость (R_i)
1	Оценка компетенций ученика после прохождения процедуры наставничества, в баллах – P_1	0,539362
2	Оценка изменения производственных показателей ученика после прохождения процедуры наставничества, например, сокращение времени выполнения какой-либо операции, в минутах – P_2	0,256849
3	Оценка наставника, которая проводилась на этапе отбора, в баллах – P_3	0,139149
4	Оценка наставника учеником, в баллах – P_4	0,045674
5	Стаж работы наставником, лет – P_5	0,018966

Этап 4. Рассчитаем комплексную оценку каждого из наставников, используя значения, приведенные в табл. 7, т. е. считаем аддитивную функцию свертки:

$$K_j = \sum_{i=1}^n R_i \cdot y_{ij}. \quad (10)$$

Для наставника 1:

$$K_1 = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y_{i1} = 0,79418 \cdot 0,539362 + 0,72727 \cdot 0,256849 + 0,38095 \cdot 0,139149 + 0,5 \cdot 0,045674 + 0,11539 \cdot 0,151728 = 0,693183;$$

Для наставника 2:

$$K_2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y_{i2} = 0,5 \cdot 0,539362 + 0,95455 \cdot 0,256849 + 0,61905 \cdot 0,139149 + 0,79418 \cdot 0,045674 + 0,5 \cdot 0,151728 = 0,646753;$$

Для наставника 3:

$$K_3 = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y_{i3} = 0,20588 \cdot 0,539362 + 0,27273 \cdot 0,256849 + 0,85714 \cdot 0,139149 + 0,20588 \cdot 0,045674 + 0,5 \cdot 0,151728 = 0,319251;$$

Для наставника 4:

$$K_4 = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot y_{i4} = 0,5 \cdot 0,539362 + 0,04545 \cdot 0,256849 + 0,14286 \cdot 0,139149 + 0,20588 \cdot 0,045674 + 0,88462 \cdot 0,151728 = 0,327415.$$

В соответствии с полученными оценками наставники получают в качестве премии второго типа часть своего оклада (см. рис. 2). Таким образом, если наставники имели оклады: первый 27 тыс. руб.; второй 30 тыс. руб.; третий 31 тыс. руб.; четвертый 29 тыс. руб., то они получают соответственно:

- первый $H_{\text{стим } 1} = 27 \cdot 0,693183 = 18,71595$ тыс. руб.;
- второй $H_{\text{стим } 2} = 30 \cdot 0,646753 = 19,40258$ тыс. руб.;
- третий $H_{\text{стим } 3} = 31 \cdot 0,319251 = 9,896767$ тыс. руб.;
- четвертый $H_{\text{стим } 4} = 29 \cdot 0,327415 = 9,495029$ тыс. руб.

Если обратиться к вопросу составления рейтинга наставников [8, 16], то в соответствии с рассчитанными комплексными оценками получим следующий рейтинг наставников (табл. 8).

Таблица 8

Рейтинг наставников

Table 8

Ranking of mentors

Номер в рейтинге	Комплексная оценка (K_i)	Номера наставников
1	0,693183	1
2	0,646753	2
3	0,327415	4
4	0,319251	3

Заключение

Стоит отметить, что для определения эффективности процедуры наставничества в целом, а также наставников и учеников могут быть использованы различные методы и подходы, основанные на различных критериях и показателях, но для получения наибольшего эффекта от процедуры наставничества необходимо применение научных подходов к управлению ею.

Целесообразность же предложенной выше модели очевидна, так как только расчет комплексной оценки итогов работы наставника позволит наиболее адекватно организовать процедуру премирования и рейтингования, что, в свою очередь, повлечет повышение эффективности процедуры наставничества в целом, так как будет налажено эффективное управление ею.

Литература

1. Горелов, Н.А. Управление человеческими ресурсами: современный подход: учеб. и практикум для академ. бакалавриата / Н.А. Горелов, Д.В. Круглов, О.Н. Мельников. – М.: Юрайт, 2016. – 270 с.

2. Перевалова, О.С. Алгоритм стимулирования персонала на предприятиях с различными типами организационных культур / О.С. Перевалова, Ф.В. Саратовская // Научный журнал «Проектное управление в строительстве». – 2020. – № 3 (20). – С. 116–126.

3. Перевалова, О.С. Наставничество – инструмент профессиональной и социально-психологической адаптации кадров в организации / О.С. Перевалова, Л.В. Шевченко, Д.Н. Батракова // Научный журнал «Проектное управление в строительстве». – 2020. – № 1 (18). – С. 114–123.

4. Модель закрепления ученика за наставником в системе обучения персонала организации / О.С. Перевалова, С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, Д.Н. Батракова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 92–103. DOI: 10.14529/ctcr210209

5. Налоговый кодекс Российской Федерации / КонсультантПлюс. – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19671/ (дата обращения: 12.05.2021).

6. Трудовой кодекс Российской Федерации / КонсультантПлюс. – http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 12.05.2021).

7. Шувалова, И. А. Трудовые права работников : науч.-практ. пособие / И.А. Шувалова. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 190 с. – www.dx.doi.org/10.12737/textbook_591ed973367d15.11715147.

8. Перевалова, О.С. «Умный» наем персонала / О.С. Перевалова // Научный журнал «Управление строительством». – 2019. – № 1 (14). – С. 91–97.

9. Barkalov, S.A. Models for Processing Expert Information, Based on the Theory of Latent Variables / S.A. Barkalov, O.N. Bekirova, S.I. Moiseev // Proceedings of 2018 11th International Conference “Management of Large-Scale System Development”, MLSD. – 2018. – ieeexplore.ieee.org/document/8551943. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551943

10. Identification Model Based on Latent Variables / S.A. Barkalov, O.N. Bekirova, N.Yu. Kalinina, S.I. Moiseev // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. – С. 52029. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052029

11. Баутина, Е.В. Алгоритм внедрения системы наставничества в организации / Е.В. Баутина, О.С. Перевалова, Д.Н. Батракова // Научный журнал «Проектное управление в строительстве». – 2020. – № 3 (20). – С. 85–91.

12. Выбор методов оценки при формировании кадрового состава проектных команд / Ю.В. Бондаренко, И.С. Никитин, Н.Ю. Калинина, А.М. Ходунов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».

пьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 116–124. DOI: 10.14529/ctcr200211

13. Бекирова, О.Н. Повышение общего уровня качества строительства с помощью метода аддитивной свертки критериев / О.Н. Бекирова, И.С. Никитин, Е.А. Rogozina // Научный журнал «Проектное управление в строительстве». – 2019. – № 2 (19). – С. 94–102.

14. Сидоренко, Е.В. Модификация метода анализа иерархий Т. Саати для расчета весов критериев при оценке инновационных проектов / Е.В. Сидоренко, А.Н. Тихомирова // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2012. – № 2. – <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6009>.

15. Саати, Т.Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений / Т.Л. Саати // Электронный журнал Cloud of Science. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 5–35.

16. Averina, T.A. Application of the Theory of Latent Variables to Personnel Management Methods / T.A. Averina, S.A. Barkalov, S.I. Moiseev // SOCIETY. INTEGRATION. EDUCATION. Proceedings of the International Scientific Conference. – 2018. – Vol. VI, pp. 42–52. DOI: 10.17770/sie2018vol1.3121

Перевалова Ольга Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; nilga.os_vrn@mail.ru.

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; bsa610@yandex.ru.

Калинина Наталия Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; kalinina@vgasu.vrn.ru.

Батракова Дарья Николаевна, магистрант факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; daria.speckadr@gmail.com.

Поступила в редакцию 23 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210310

A MODEL FOR THE ENHANCEMENT OF EFFECTIVENESS OF ON-THE-JOB TRAINING PROCESS

O.S. Perevalova, nilga.os_vrn@mail.ru,

S.A. Barkalov, bsa610@yandex.ru,

N.Yu. Kalinina, kalinina@vgasu.vrn.ru,

D.N. Batrakova, daria.speckadr@gmail.com

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

The article considers some aspects of the mentoring process management, namely incentives for mentors. To that end, we consider in detail a model for staff training evaluation, which takes place in the form of mentoring, one of the most popular forms of on-the-job training. **The aim of the present study** is to develop an effective incentive model for mentors, which aims to improve the effectiveness of their performance management, as this model involves not only the establishment of an effective system of allowances and additional payments to mentors, but also an evaluation system of duties performed by staff. **Materials and methods.** It is planned to assess the training in the following areas: corporate competencies; professional competencies and implementation of an established plan. For this purpose it is proposed to use the “360 degrees” method, direct inspection and other methods of collecting information depending on the measured indicators. Following the evaluation process it is expected to obtain a comprehensive mentoring assessment, which can be used to adjust

the mentoring procedure, a comprehensive assessment of a student, which demonstrates learning outcomes as well as a comprehensive assessment of a mentor, which could be used to create an incentive model for mentors. In order to develop an effective mentoring system it is proposed to make the size of mentoring allowance dynamic, i.e. directly dependent on the results of mentoring – comprehensive assessment of a mentor. It is proposed to build a comprehensive assessment of mentoring procedure by means of additive convolution of criteria. **Results.** Therefore, the essence of mentor bonus dynamism strategy includes the following aspects. First, the mentor will receive a fixed compensatory bonus for the entire mentoring period. Second, the mentor will receive an incentive bonus. It is proposed to determine the amount of the bonus as a percentage of the mentor's salary calculated as a multifaceted evaluation of the mentoring process that will directly depend on the mentor's contribution to the mentoring process. **Conclusion.** It is expected that the implementation of the proposed model in the practice of mentoring procedure management will increase its effectiveness and reduce the formality, which we see in practice today.

Keywords: mentoring, personnel assessment, allowances, incentives, criteria, additive convolution.

References

1. Gorelov N.A., Kruglov D.V., Melnikov O.N. *Upravleniye chelovecheskimi resursami: sovremennyy podkhod: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Human Resource Management: A Modern Approach: A Textbook and Workshop for Academic Bachelor's Degree]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 270 p. Series: Bachelor. Academic course.
2. Perevalova O.S., Saratova F.V. [Algorithms for Staff Incentives in Enterprises with Different Types of Organizational Cultures]. *Nauchnyy zhurnal "Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve"* [Scientific journal "Project management in construction"], 2020, no. 3 (20), pp. 116–126. (in Russ.)
3. Perevalova O.S., Shevchenko L.V., Batrakova D.N. [Mentoring is a tool for professional and sociopsychological adaptation of personnel in an organization]. *Nauchnyy zhurnal "Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve"* [Scientific journal "Project management in construction"], 2020, no. 1 (18), pp. 114–123. (in Russ.)
4. Perevalova O.S., Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Batrakova D.N. Model for Assigning a Pupil to a Mentor in the Staff Training System of the Organization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 92–103. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210209
5. *Nalogovyy kodeks Rossiyskoy federatsii* [Tax Code of the Russian Federation] / Konsul'tantPlyus. – Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19671/ (accessed 12.05.2021).
6. *Trudovoy kodeks Rossiyskoy federatsii* [Labour Code of the Russian Federation] / Konsul'tantPlyus. – Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (accessed 12.05.2021)
7. Shuvalova I.A. *Trudovyye prava rabotnikov: nauch.-praktich. posobiye* [Labour Rights of Workers: a Scientific and Practical Guide]. Moscow, INFRA-M Publ., 2019. 190 p. Available at: www.dx.doi.org/10.12737/textbook_591ed973367d15.11715147.
8. Perevalova O.S. ["Smart" hire staff]. *Nauchnyy zhurnal "Upravlenie stroitel'stvom"* [Scientific journal "Management of construction"], 2019, no. 1 (14), pp. 91–97. (in Russ.)
9. Barkalov S.A., Bekirova O.N., Moiseev S.I. Models for Processing Expert Information, Based on the Theory of Latent Variables. *Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD*, 2018. ieeexplore.ieee.org/document/8551943. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551943
10. Barkalov S.A., Bekirova O.N., Kalinina N.Yu., Moiseev S.I. Identification Model Based on Latent Variables. *Journal of Physics: Conference Series*. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. C. 52029. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/5/052029
11. Bautina E.V., Perevalova O.S., Batrakova D.N. [Algorithm for the implementation of the mentoring system in the organization]. *Nauchnyy zhurnal "Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve"* [Scientific journal "Project management in construction"], 2020, no. 3 (20), pp. 85–91. (in Russ.)
12. Bondarenko Yu.V., Nikitin I.S., Kalinina N.Yu., Khodunov A.M. Selection of Evaluation Methods when Forming Personnel of Project Teams. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 116–124. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200211

13. Bekirova O.N., Nikitin I.S., Rogozina E.A. [Improving the Building Level of Production Using the Method of Additive Convolution of Criteria]. *Nauchnyy zhurnal "Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve"* [Scientific journal "Project management in construction"], 2020, no. 2 (19), pp. 94–102. (in Russ.)

14. Sidorenko E.V., Tikhomirova A.N. [Modification of the Analytic Hierarchy Process T. Saaty for Calculating the Criteria Weights When Evaluating Innovative Projects]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya"* [Electronic Scientific Journal "Modern Problems of Science and Education"], 2012, no. 2. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6009>.

15. Saati T.L. [About Measuring the Intangible. An Approach to Relative Measurements Based on the Principal Eigenvector of a Pairwise Comparison Matrix]. *Elektronnyy zhurnal "Cloud of Science"* [Electronic journal "Cloud of Science"], 2015, vol. 2, no. 1, pp. 5–35.

16. Averina T.A., Barkalov S.A., Moiseev S.I. Application of the Theory of Latent Variables to Personnel Management Methods. *SOCIETY. INTEGRATION. EDUCATION. Proceedings of the International Scientific Conference*, 2018, vol. VI, pp. 42–52. DOI: 10.17770/sie2018vol1.3121

Received 23 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Модель повышения эффективности процесса обучения персонала на рабочем месте / О.С. Перевалова, С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, Д.Н. Батракова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 100–112. DOI: 10.14529/ctcr210310

FOR CITATION

Perevalova O.S., Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Batrakova D.N. A Model for the Enhancement of Effectiveness of On-the-Job Training Process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 100–112. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210310

ОЦЕНКА СТРАТЕГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТОВ В СИТУАЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ: ПРОЕКТНЫЙ ПОДХОД

Я.Д. Гельруд¹, Е.Б. Кибалов²

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,
г. Новосибирск, Россия

В статье рассмотрены проблемы оценки макроэкономической эффективности крупномасштабных проектов на стадии, которую принято называть прединвестиционной. Обосновывается необходимость учёта фактора радикальной неопределенности при оценке крупномасштабных железнодорожных проектов. **Цель исследования.** Показать, что эффекты, генерируемые крупномасштабными проектами, влияют на сценарий развития экономики, вмещающей проект. В этой проблемной ситуации предлагается методика оценки и выявления наиболее предпочтительного проекта, учитывающая факторы радикальной (невероятностной) неопределенности. **Материалы и методы.** Анализируются критерии оценки проектов на трех уровнях: макро-, мезо- и микро; при этом применяется инструментарий прикладного неосистемного анализа, сочетающий в своем составе логико-эвристические и экономико-математические модели принятия сложных проектных решений. **Результаты.** Разработана структурная модель оценки, которая является гибридной, состоящей из двух блоков. Первый блок – логико-эвристическая подмодель оценки крупномасштабных инвестиционных проектов, второй блок – экономико-математическая подмодель, отображающая внешнюю среду проектов. Модели взаимодействуют на прединвестиционной стадии жизненного цикла проектов в режиме стратегической игры на макроуровне. Первая в качестве информационной базы опирается на экспертные оценки затрат и результатов проектов, претендующих на реализацию в долгосрочной перспективе, вторая – в основном на статистическую информацию межотраслевого баланса страны и регионов. Оценивается воздействие нового крупномасштабного инвестиционного проекта на модель экономики России, и выявляется положительное или негативное влияние каждого (из числа рассматриваемых) на целевую функцию экономической модели. **Заключение.** В статье комментируются результаты экспериментальных расчетов с помощью гибридной модели и на примере железнодорожного транспорта формулируются рекомендации по ее использованию при разработке обосновывающих материалов крупномасштабных проектов федеральной значимости.

Ключевые слова: крупномасштабные инвестиционные проекты, неосистемный подход, проектный подход, фрейм, межкластерный баланс, оптимизационные межрегиональные межотраслевые модели, гибридная модель оценки.

Введение

Проблема создания системы проектного управления экономическим развитием экономики и общества России на современном этапе приобретает особую остроту. Сегодня недостаточно использовать для решения проблемы научные и практические заделы прошлого века и начала нынешнего, сформированные на Западе и в нашей стране в рамках так называемого программно-целевого подхода (ПЦП) (или «целепрограммного», что было бы точнее с точки зрения логики системного анализа, в рамках которой выстроен ПЦП). Более того, традиционный системный подход трансформировался ныне в неосистемный [1–5].

Применительно к анализу и разработке способов решения социально-экономических проблем неосистемный подход в отличие от своего предшественника не только междисциплинарен, но и межпарадигмален, так как методологически ориентирован на интеграцию разных системных парадигм в диапазоне «социализм – капитализм»¹. Однако интеграция указанных мегасистем,

¹ Примеры: Китай – ближе к левой границе диапозона; Швеция – ближе к правой границе.

функционирующих и развивающихся в разных системных парадигмах, но на планетарно ограниченной ресурсной базе, представляет собой проблему, не только не решенную корпусом современных наук теоретически, но до сих пор отчетливо даже не поставленную. Отсутствие хорошей теории вынуждает практику, в частности на межпарадигмальном уровне, решать проблему эмпирически, создавая коалиции интересов, а те, в свою очередь, коалиции действий. Последние, по мере истощения ограниченной планетарной ресурсной базы, ведут себя не кооперативно, не субсидиарно², а все более агрессивно в процессе дележа оставшегося, не понимая, что продолжение таких тенденций ведет к глобальной войне на уничтожение, где не будет победителей, а что будет в результате – скрыто «завесой радикальной неопределенности».

Таков в общих чертах глобальный контекст интересующей нас проблемы.

Проблемная ситуация

Изменения глобального контекста в динамике далее представим как сценарии-контрасты развития многослойной внешней среды крупномасштабного проекта. Среду станем считать системой, стратифицированной на три субординированных уровня:

- мегауровень (межгосударственный);
- макроуровень (государственный);
- микроуровень (предприятий).

Термин «предприятие» – родовой, и в качестве упрощающего рабочего приема представим хозяйственную систему страны на *микроуровне*, как состоящую из предприятий двух типов: *объектов* (фирм, корпораций и т. п.) и *проектов*, взаимодействующих по определенным правилам.

Фрейм (frame) *иерархия* поставим в соответствие *объекту* «фирма» в предположении, что иерархия содержит информацию о базовом качестве фирмы – правилах внутрифирменного взаимодействия.

Фрейм *сеть* поставим в соответствие проекту на тех же основаниях.

Сетевая структура в обоих случаях является первичной, поскольку иерархия также является сетью (в проекции на плоскость); различие между сетями проявляется в характере системных связей между элементами сетей. Обе сети распределительные: в иерархии-фирме связи преимущественно принудительно-приказные, осуществляемые из единого организующего центра; в сети-проекте связи преимущественно добровольно-договорные³, полицентрические, существенно самоорганизующиеся⁴, но контролируемые «невидимой рукой» рынка.

Многослойную внешнюю среду на микроуровне будем трактовать как экономику-систему и как в случае с фирмами-иерархиями и проектами-сетями различать альтернативные модели координации их функционирования и развития для достижения одинаковой для альтернатив цели – максимального благосостояния – желательного за минимальное время. Западной либеральной модели координации Эрроу – Дебре⁵, обеспечивающей достижения такого результата, поставим в соответствие фрейм «Парето-модель Р», а отечественной (см. [6]) – фрейм «Парето-модель Ц»⁶. Различие моделей в том, что в первом случае коллективный оптимум, состоящий из двух групп экономических агентов – потребителей и производителей, – стремящихся к собственной выгоде, достигается с помощью «невидимой руки» рынка, а во втором – к множеству агентов-максимизаторов частной выгоды – добавляется государство, стремящееся к достижению выгоды общественной. Понятно, что все эти определения являются теоретическими абстракциями и в нашем случае используются для структуризации проблемной ситуации.

² Принцип субсидиарности базируется на логике взаимопомощи, на которой, кстати, образован Евросоюз.

³ Принятое в научном обороте название связей в иерархии вертикальными, а в сети горизонтальными, на наш взгляд, являются устаревшими и не точными. Горизонталь в инженерной топографии – это линия, соединяющая точки земной поверхности с одинаковыми высотами, но ничего не говорящая о взаимодействии точек, образующих горизонталь и точек, принадлежащих горизонталям разной высоты.

⁴ Подробнее см. в работе: Карп Андреев. Одноранговая экономика. Litres, 2018-12-02. 330 с.

⁵ Черемных Ю.Н. Лекции по курсу микроэкономики продвинутого уровня. М.: Издат. дом ГУ ВШЭ, 2007.

⁶ Названия моделей – авторские, предлагаемые после изучения работ: Канторович Л.В., Макаров В.Л. Цены и эффективность производства // Экономика и математические методы. 1984. Т. XX, вып. 1. С. 28–41 и Гранберг А.Г. Математические модели социалистической экономики. Общие принципы моделирования и статические модели народного хозяйства. М.: Экономика, 1978. 351 с.

И, наконец, крупномасштабному проекту поставим в соответствие фрейм *многомерная сеть*, в которой мера «масштаб в денежных единицах» является одной из важнейших. Управление такими проектами (мегапроектами в западной терминологии) на фоне всеобщей тенденции развития проектного управления на всех уровнях хозяйственных систем в России и за рубежом отличается особой сложностью и, следовательно, трудностью не только практического, но и методико-методологического свойства.

Дело в том, что первым шагом традиционного системного анализа, направленным на определение эффективности любого проекта, является декомпозиция проблемной ситуации на проект и среду его реализации. Причем если говорить, например, об инвестиционном проекте, то *a priori* предполагается, что экономическая среда прямо влияет на затраты и результаты проекта с помощью «средовых» цен, используемых в качестве параметров при расчетах эффективности проекта. Однако подчеркнем, предполагается, что факт реализации проекта не влияет на систему параметрических цен, сложившуюся до реализации проекта в среде (экономике), ввиду *малости* проекта по сравнению с масштабом внешней среды, проект вмещающей.

В случае крупномасштабных проектов (далее – КП) описанная система оценки проектов не работает, поскольку КП фактом своей реализации меняет систему цен продуктов и ресурсов, сложившуюся до его имплантации в действующую хозяйственную систему. Имплантация порождает порочный круг (обратную связь), когда эффективность КП оценивается с помощью «средовых» цен, им же скорректированных. Более того, «внешние эффекты» КП влияют на социальные, экологические, политические аспекты внешней среды и это влияние неоднозначно. Экономически и технически оно не может быть оценено исчерпывающим образом количественно.

Таким образом, реализация КП, заметим, не только *инвестиционных*, но и *институциональных*, порождает плохо прогнозируемые результаты, как позитивные, так и негативные; в последнем случае нередко катастрофические. Классическими примерами позитивного результата реализации инфраструктурных крупномасштабных инвестиционных проектов считается отечественный Транссиб и зарубежные мегапроекты сооружения каналов Панамского и Суэцкого. К числу институциональных проектов, результаты которых негативны, можно отнести Структурную реформу железнодорожного транспорта России (1998–2015 гг.) и проект отечественной административной реформы, результатом которой стала тотальная бюрократизация методов управления во всех секторах российской экономики и общества.

Структуризация проблемной ситуации

Чтобы, как советует Р. Акофф [12], не утонуть в «месиве проблем», контурно очерченных выше, структурируем проблемную ситуацию методом *сужения и конкретизации* в соответствии с названием настоящей статьи. Для этого построим Аналитическую матрицу в форме таблицы и пронумеруем выделенные в ней блоки. С помощью полученного инструмента на содержательном уровне сравним критерии оценки крупно- и маломасштабных *инвестиционных инфраструктурных* проектов на примере проектов железнодорожных, системообразующих в транспортном секторе России⁷.

Аналитическая матрица
Analytical matrix

Критерии Проекты	Разновидности критериев оценки эффективности железнодорожных проектов				
	технические	финансовые	экономические	общественные	стратегические
Крупномасштабные	1	2	3	4	5
Маломасштабные	6	7	8	9	10

С указанной точки зрения далее будут рассмотрены только проблемы оценки эффективности железнодорожных КП на макроуровне и на той стадии их жизненных циклов, которую принято называть прединвестиционной. Названное *сужение* целеориентировано таким образом потому,

⁷ Следовательно, в настоящей статье мы не рассматриваем крупномасштабные *институциональные* проекты, хотя многие из них приводят к не менее крупномасштабным затратам инвестиционных ресурсов. Но «нельзя объять необъятное» в одной журнальной публикации, и мы будем следовать этому предостережению Козьмы Пруткова, отложив анализ крупномасштабных *институциональных* проектов до следующей статьи.

что радикальная неопределенность последствий реализации КП, по мнению авторов, возникает именно на макроуровне. Причина: стратегический характер принимаемых решений, в существенной части латентных по соображениям национальной безопасности.

В Аналитической матрице (см. таблицу), в ее десяти блоках предмет исследования конкретизируется.

Блоки 1 и 6. Для мало- и крупномасштабных железнодорожных проектов существует этап «Изыскания». Определяемые на этом этапе объемы строительных работ по конкурирующим вариантам трассы будущего проекта и вариантам эксплуатационных расходов после ввода построенной линии в действие зависят от *основных технических* параметров: конфигурации и длины трассы, продольного профиля и плана, наличия мостовых переходов и тоннельных пересечений⁸. Эти показатели локальны и пригодны только для оценки по критериям сравнительной *технической* эффективности конкурирующих трасс будущих железных дорог.

Экономические (точнее финансовые) характеристики и критерии оценки типа NPV рассматриваемых вариантов трасс также определяются на этом этапе. Они лишь частично производны от технических показателей проекта и получаются посредством использования параметрических («средовых») цен на затрачиваемые ресурсы и среднесетевых тарифов за оказание услуг по перевозке грузов и пассажиров в эксплуатационном периоде. Все эти оценки носят эмпирический характер и без должной теоретической основы применяются для оценки проектов КП. Но главное – они локальны и не отражают должным образом влияния КП на общественную эффективность экономики в целом.

Поясним сказанное. Процесс реализации КП моделируется как денежный поток, прогнозируемый на 15 лет вперед, причем фактор неопределенности учитывается неудовлетворительно или никак. По названным причинам ошибки в оценке вариантов при *трассировании* нередки и некоторые из них являются неустраняемыми, даже если на последующих этапах жизненного цикла проекта для оценки его эффективности использовать самые изощренные и дорогостоящие приемы.

Блоки 2 и 7. Финансовые критерии предназначены и используются на *микроуровне* для оценки коммерческих инвестиционных проектов. Главных предпосылок, обеспечивающих теоретическую корректность и практическую полезность таких критериев, – три:

- макроэкономическая среда, в которой осуществляется инвестиционный проект, стационарна;
- оцениваемый инвестиционный проект по сравнению с масштабом экономической системы государств – мал; при выполнении предпосылки становится возможным использовать в формулах исчисления показателей финансовой эффективности типа ЧДД рыночные цены ресурсов и продуктов (в том числе услуг) в качестве экзогенно задаваемых параметров;
- неопределенность затрат и результатов малых инвестиционных проектов носит вероятностный характер⁹.

Блоки 3–8. Инвестиционный проект признается соответствующим критерию социально-экономической (т. е. общественной) эффективности в случае, если его реализация является необходимой для выполнения задач, обозначенных, например, в Программе социально-экономического развития Российской Федерации на среднесрочную перспективу и в отраслевой стратегии развития соответствующей отрасли⁹.

Стратегические цели развития России, формулируемые в Программе *на качественном уровне*, определяются как:

- 1) повышение благосостояния населения и
- 2) уменьшение бедности на основе динамичного и устойчивого экономического роста и повышения конкурентоспособности страны¹⁰.

Декларируемые таким образом целеустремления федеральной власти к благосостоянию на период 2006–2008 гг. конкретизируются в виде количественных критериев финансовой и эконо-

⁸ Вектор только основных технических показателей насчитывает 9 компонент (см. Бучкин В.А., Кантор И.И., Копыленко В.А. Проектирование участка железной дорога: метод. указания к курсовому проектированию. Под ред. И.И. Кантора. М: МИИТ, 2005. 96 с.).

⁹ Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция). М-во экон. РФ, М-во фин. РФ, ГК по стр-ву, архит. и жил. политике; рук. авт. кол.: В.В. Коссов, В.Н. Лившиц, А.Г. Шахназаров. М.: ОАО «НПО «Изд-во «Экономика», 2000. 421 с.

мической эффективности, косвенно указывающих степень продвижения общества к благосостоянию за жизненный цикл Программы.

Критерием финансовой эффективности при этом является ЧДД и функционально связанное с ними семейство показателей типа ВНД. Инвестиционный проект признается соответствующим критерию финансовой эффективности, если один из названных показателей достигает максимума при фиксированном значении других. Кроме того, в Программе в качестве положительных социальных эффектов, связанных с реализацией инвестиционного проекта, *могут* учитываться

- а) повышение уровня занятости населения;
- б) повышение уровня здравоохранения (качества оказываемых услуг и их доступности для населения);
- в) сохранение и развитие научно-технического потенциала;
- г) повышение уровня, качества образования и его доступности для населения;
- д) развитие социальной инфраструктуры;
- е) повышение уровня обеспечения населения жильем;
- ж) создание и улучшение транспортной инфраструктуры;
- з) улучшение экологической ситуации, применение технологий, обеспечивающих минимальное негативное воздействие на внешнюю среду.

Наличие указанных эффектов должно быть подтверждено согласованными с уполномоченным федеральным органом исполнительной власти расчетами и выражаться в количественных показателях, характеризующих величину положительного социального эффекта.

Критерием экономической эффективности оценивается инвестиционный проект по его способности влиять на формирование ВВП экономики и обеспечивать динамику экономического роста. Проект признается соответствующим критерию экономической эффективности в случае, если подтвержденное значение интегрального индикатора экономической эффективности ЭТ превышает 0,01 %¹⁰.

Блоки 4 и 9. Для оценки социально-экономических эффектов (они же общественные) от реализации инфраструктурного проекта с государственной поддержкой предназначена новая (взамен отмененной в 2008 г. методики, рассмотренной в блоках 3–8), методика¹¹ количественной оценки следующих показателей:

- бюджетный эффект, рассчитываемый как сальдо прироста налоговых и иных обязательных платежей в бюджетную систему Российской Федерации в связи с реализацией инфраструктурного проекта,
- размер государственной поддержки.

Блоки 5 и 10. В современной ситуации критерием стратегической эффективности (K^c) функционирования и развития России как единого суверенного государства *ситуационно* является скорость выхода страны на траекторию устойчивого развития и нахождение на ней в долгосрочной перспективе.

K^c вменяется с межгосударственного мегауровня нижестоящим уровням и все критерии макро-и микроуровня из таблицы в логике системного анализа и *проектного подхода* рассматриваются в качестве средств (инструментов) достижения критерия стратегической эффективности в указанном выше смысле.

Обсуждение и постановка проблемы оценки КП

Структуризация проблемной ситуации, осуществленная в предыдущем сюжете, позволяет на содержательном уровне предложить постановку проблемы оценки крупномасштабных инвестиционных проектов (КП) не только в общем виде, но и конкретизировать ее для проектов желез-

¹⁰ Приказом Минэкономразвития РФ № 381, Минфина РФ № 123н от 06.11.2008 «О признании утратившего силу Приказа Минэкономразвития России и Минфина России от 23 мая 2006 г. № 139/82н «Об утверждении Методики расчета показателей и применения критериев эффективности инвестиционных проектов, получение государственной поддержки за счет средств Инвестиционного фонда Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 05.12.2008 № 12798) этот показатель был упразднен.

¹¹ Методика оценки социально-экономических эффектов от проектов строительства (реконструкции) и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, планируемых к реализации с привлечением средств федерального бюджета, а также с предоставлением государственных гарантий Российской Федерации и налоговых льгот. Утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2019 г. № 1512.

нодоржных, развивающих базовую инфраструктурную отрасль страны. Для этого обратимся к таблице и с ее помощью из множества задач – средств решения проблемы – выявим задачу, способ решения которой обсуждается в настоящей статье.

Пусть, пока без объяснений как, сформировано множество инвестиционных железнодорожных проектов, по предположению способных позитивно повлиять на критерий стратегической эффективности K^c . Первый вопрос, который здесь возникает: как среди них выявить проект крупномасштабный? В разработках ИЭОПП СОРАН проекты-претенденты поочередно «встраиваются» в уже оптимизированную линейно-программную модель экономики России ОМММ (Оптимизационная Межотраслевая Межрегиональная Модель [11]) и, если целевая функция (ЦФ) модели не реагирует, то проект мал. Тогда его эффективность можно оценивать с помощью финансовых критериев (см. таблицу), используя некие аналоги двойственных оценок продуктов и ресурсов, полученных из оптимизированной ОМММ и трансформированных в так называемые *конверсионные* параметрические цены в формулах расчета ЧДД и прочих локальных критериев из того же семейства. Если же ЦФ реагирует положительно или отрицательно, то проект крупномасштабен со всеми вытекающими из этого факта следствиями, описанными в начале статьи. При снижении уровня ЦФ КП рассматривается как кандидат на господдержку или отклонение, при повышении – рекомендуется для реализации.

Второй вопрос: какой должна быть модель КП на макроуровне, чтобы быть вариативным агрегатом сетевой модели микроуровня? Ответ, казалось бы, лежит на поверхности – денежный поток, генерируемый сетевой моделью в годовой развертке с фиксированной датой начала и окончания проекта (при заданном плановом горизонте). Варианты: сдвиг потока влево, к началу проекта, или вправо, к дате его завершения. Однако все известные нам версии ОМММ, куда встраивается новый КП, устроены так, что только так называемый «левый план»¹² дает максимальный прирост ЦФ за счет раннего получения мультипликативного эффекта и соответствующего прироста ВВП, а «правый план» – минимальный прирост ВВП из-за позднего срока проявления указанного эффекта. Следовательно, все КП, из числа рассматриваемых и оказавшиеся по показателю ЧДД лучшими на микроуровне, на макроуровне окажутся худшими.

Не ясно как с помощью ОМММ указанное противоречие разрешить, понятно лишь, что модель необходимо модифицировать. Есть варианты, некоторые из них в литературе вопроса обсуждались; назовем основные, определенные нормативно, т. е. в терминах «должно быть».

1. Межотраслевой баланс (МОБ), информационная основа ОМММ. МОБ – дескриптивная модель экономики, по построению равновесная и представляющая в каждом временном дискрете жизненного цикла экономики моментальную фотографию взаимодействия чистых отраслей и получения конечного продукта для удовлетворения потребностей общества.

2. То же, но как взаимодействие хозяйственных отраслей экономики.

3. То же, но как взаимодействие регионов, где фрагменты опять же чистых отраслей локализованы в границах регионов и максимизируют конечный продукт, но региональный. Общий конечный продукт экономик формируется как сумма региональных конечных продуктов (это ОМММ).

4. Межкластерный баланс (МКБ), когда в отличие от МОБ в виду имеется баланс между кластерами отраслей и/или предприятий, взаимодействующих по Портеру как группы географически соседствующих, взаимосвязанных компаний и организаций.

5. Межкластерный экологический баланс (МЭБ), когда под кластерами понимаются природные системы, эволюционно сложившиеся на водосборных площадях великих российских рек: Волги, Дона, Днепра, Сев. Двины, Оби, Иртыша, Енисея, Лены, Амура, а также Индигирки и Колымы.

Перечисленные варианты с формальной точки зрения представляют неодинаковые способы декомпозиции внешней среды КП на условно автономные блоки, отражающие разные аспекты сложно-построенной системы России, обеспечивающей *благополучие* своего населения¹³.

¹² «Левый план» в сетевой модели КП образуется, когда все работы-операции проекта на микроуровне осуществляются в ранние сроки, «правый план», когда в поздние сроки.

¹³ Кроме нормативно и немодельно сформированных вариантов есть и дескриптивные варианты, например декомпозиция территории России на фрагменты по числу: субъектов РФ, военных округов, железных дорог, входящих в состав РЖД на правах филиалов. Неявно и в разной степени такие варианты учитываются при формировании декомпозиционных множеств 1–5.

Фактически среди перечисленных «чистые» варианты декомпозиции возможны только в теории, поэтому исследователям приходится работать с микстами декомпозиционных множеств, названных в пп. 1–5, совмеща в зависимости от цели исследования разноаспектные кластеры, функционирующие и развивающиеся на одной и той же территории.

Если вышеприведенные констатации совместить с таблицей, то интересующая нас проблема должна решаться в блоках 4–5. В общем виде она формулируется так:

Выявить в ситуации неопределенности вариантов развития экономики России в долгосрочной перспективе железнодорожный КП (из числа рассматриваемых), наиболее предпочтительный в том смысле, что «с проектом» общественная эффективность развития страны выше, чем «без проекта».

Гибридная модель оценки инвестиционного решения

В общем виде сформулированная проблема на макроуровне может быть формализована как задача нахождения экстремума функции, упорядочивающей множество вариантов функционирования и развития экономики по их предпочтительности. Такой способ формализации критерия выбора удобен для применения хорошо разработанных к настоящему времени математических методов оптимизации [7, 8]. Наиболее интересны для нашего случая два способа: максимизация целевой функции общественного благосостояния и минимизация срока достижения определенных целей.

Обозначим целевую функцию общественного благосостояния в виде аналитической функции $u(X)$. Теоретически это функция полезности и она должна определяться, во-первых, на всем множестве экономических и неэкономических благ (компонент вектора X), характеризующих в динамике жизнедеятельность и развитие общества и, во-вторых, быть кардиналистской, т. е. не просто упорядочивать варианты по предпочтительности, а измерять в числовой шкале «на сколько» какой-либо вариант лучше или хуже по сравнению с другим. В экономическом аспекте область определения $u(X)$ ограничивается множеством экономических благ. Однако функция $u(X)$, претендующая на максимизацию общественного благосостояния, должна быть также и некоторой композицией (суммой или произведением) целевых функций однородных социальных групп страны и целевой функцией центрального органа, выражающей интересы государства и общества в целом.

И здесь имеет место методологическая трудность, теоретически пока не разрешенная, а именно: кардиналистская (количественная) теория полезности, изучающая в микроэкономической теории потребности человека, предлагает в качестве единицы измерения полезности блага условную единицу ютиль. «В конечном итоге все количественные параметры в экономике сводятся к ютилям. Ютиль – предельная единица экономической науки. Это фундаментальный количественный показатель – тот строительный кирпичик, из которого состоит все здание экономики» [9]. Однако пока такие необходимые новой глобальной экономике «кирпичики» операционально не определены, а показатель ютиль останется «чистой фикцией»¹⁴, т. е. произвести оценку полезности мы субъективно можем, сравнить её можем, а редуцированно объяснить в позитивистских категориях – не можем и не сможем до тех пор, пока развитие контрареклексивного теоретического аппарата¹⁵ вопросы редуционизма просто закроет, а конструктивистский / телеономический подход позволит устойчиво работать с такими субъективными категориями, как оценка полезности.

В отсутствие законченной теории практика по необходимости принимает сложные решения, опираясь на прикладную ветвь системного подхода – системный анализ и его главный инструмент – программно-целевой подход. Именно его расширенной версией, именуемой неосистемным подходом, и соответствующим инструментарием мы пользуемся далее.

Структурная модель оценки

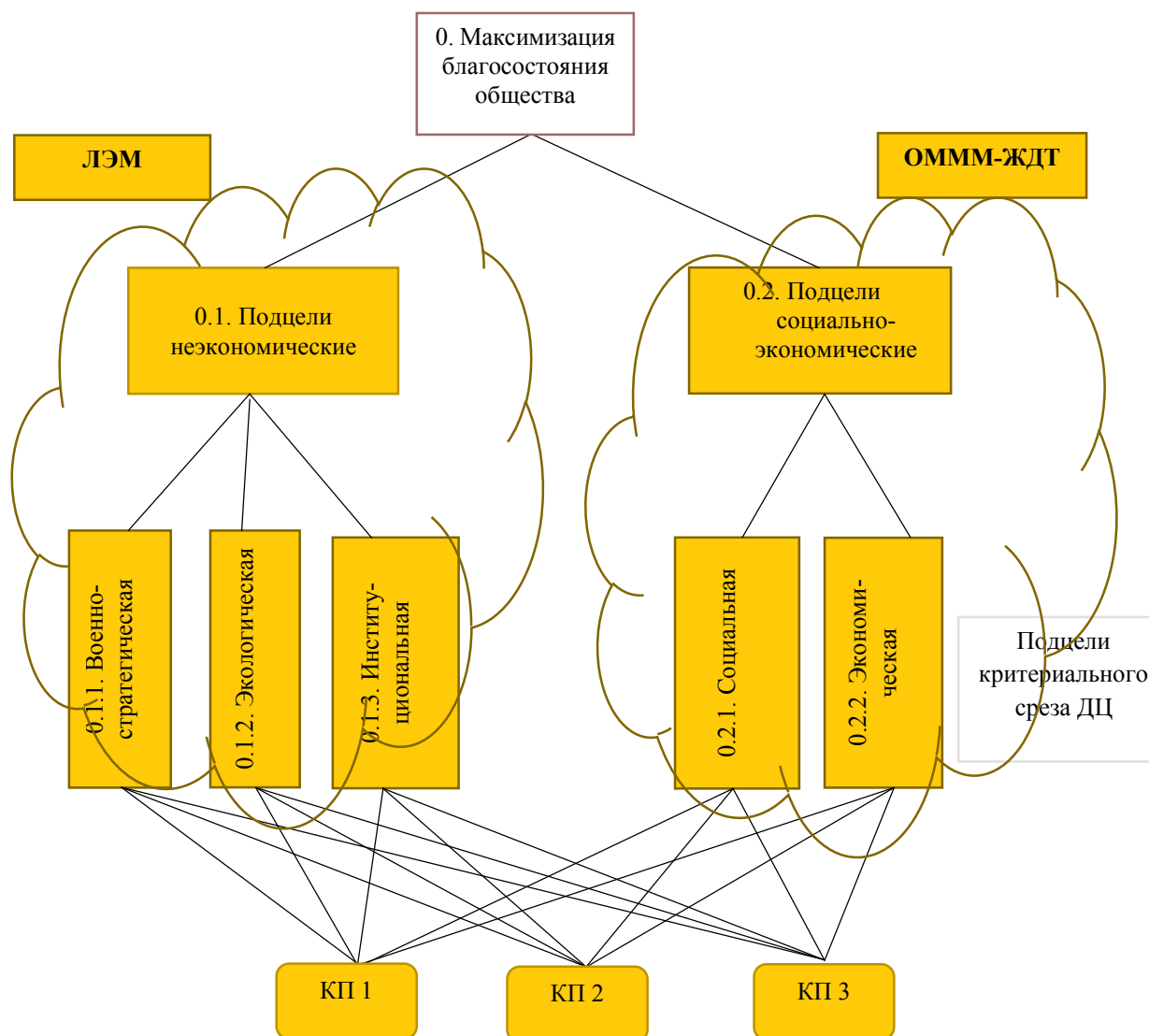
Предлагаемая на рисунке модель является гибридной, состоящей из двух блоков. Первый блок – логико-эвристическая подмодель (ЛЭМ) оценки КП, второй блок – экономико-

¹⁴ <https://anticomplexity.org/> (дата обращения: 04.07.2021).

¹⁵ <https://lib2.znate.ru/docs/index-334918.html?page=8> (дата обращения: 04.07.2021).

Управление в социально-экономических системах

математическая подмодель ОМММ-ЖДТ [10], отображающая внешнюю среду КП. Модели взаимодействуют на предпроектной (прединвестиционной) стадии жизненного цикла КП в режиме стратегической игры на макроуровне.



Дерево целей (ДЦ) как инструмент оценки воздействия КП на функцию общественного благосостояния
Objective tree as a tool for assessing the impact of large-scale projects on the function of public welfare

ЛЭМ в качестве информационной базы опирается на экспертные оценки затрат и результатов КП, претендующих на реализацию в долгосрочной перспективе, ОМММ-ЖДТ – в основном на статистическую информацию МОБ страны и регионов. Оценивается воздействие нового КП на модель экономики России и выявляется положительное или негативное влияние каждого (из числа рассматриваемых КП) на целевую функцию ОМММ-ЖДТ. Множество конкурирующих за право быть реализованными КИП упорядочиваются по их предпочтительности.

Настоящая статья является модельным каркасом, в который в следующей статье будет введено конкретное информационное содержание. А именно: железнодорожный КП «Полуночная – Обская 2» как часть проекта «Урал Промышленный – Урал Полярный» и данные его конкурентов за инвестиционные ресурсы КП «материк – Сахалин» и «Северный широтный ход (СШХ)». Применяя описанную выше гибридную модель, можно выявить наиболее общественно эффективный проект, а также рассмотреть пути совершенствования предложенной методики.

Литература

1. Карнаи, Я. Системная парадигма / Я. Карнаи // Вопросы экономики. – 2002. – № 4. – С. 4–22.
2. Клейнер, Г.Б. Эволюция институциональных систем / Г.Б. Клейнер. – М.: Наука, 2004. – 240 с.
3. <http://government.ru/docs/all/111285/> (дата обращения: 18.08.2020).
4. Бандман, М.К. Избранные труды и продолжение начатого / М.К. Бандман; под ред. д.э.н. В.Ю. Малова. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2014. – 448 с.
5. Simon, H. The Structure of Ill-structured Problems / H. Simon // Artificial Intelligence. – 1973. – Vol. 4. – P. 181–202.
6. Гранберг, А.Г. Моделирование пространственного развития национальной и мировой экономики: эволюция подходов / А.Г. Гранберг // Регион: экономика и социология. – 2007. – № 1. – С. 87–107.
7. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа; под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
8. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
9. <http://bnarchives.yorku.ca> (дата обращения: 04.07.2021).
10. Комплексный подход к оценке общественной эффективности крупномасштабных железнодорожных проектов / Е.Б. Кибалов, И.А. Беспалов, В.Ф. Бузулуцков и др. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015. – 160 с.
11. Кибалов, Е.Б. Оценка эффективности крупномасштабных транспортных проектов / Е.Б. Кибалов, А.А. Кин, А.Б. Хуторецкий // Регион: экономика и социология. – 2012. – № 2 (74). – С. 161–187.
12. Акофф, Р. Искусство решения проблем / Р. Акофф. – М.: Мир, 1982. – 282 с.

Гельруд Яков Давидович, д-р техн. наук, профессор кафедры экономической безопасности, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gelrud@mail.ru.

Кибалов Евгений Борисович, д-р экон. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, г. Новосибирск; kibalovE@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210311

ASSESSMENT OF THE STRATEGIC EFFICIENCY OF LARGE-SCALE INFRASTRUCTURE PROJECTS IN A SITUATION OF UNCERTAINTY: A PROJECT APPROACH

Ya.D. Gelrud¹, gelrudid@susu.ru,
E.B. Kibalov², kibalovE@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Institute of Economics and Industrial Engineering of SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

The article deals with the problems of assessing the macroeconomic efficiency of large-scale projects at the stage that is commonly called pre-investment. The necessity of taking into account the factor of radical uncertainty when evaluating large-scale railway projects is justified. **The purpose of the study.** To show that the effects generated by large-scale projects affect the scenario of the development of the economy hosting the project. In this problematic situation, a methodology is proposed for evaluating and identifying the most preferable project, taking into account the factors of radical (improbability) uncertainty. **Materials and methods.** The criteria for evaluating projects at three levels are analyzed: macro-, meso- and micro; at the same time, the tools of applied non-

system analysis are used, combining logical-heuristic and economic-mathematical models of making complex project decisions. **Results.** A structural evaluation model has been developed, which is a hybrid consisting of two blocks. The first block is a logical-heuristic submodel for evaluating large-scale investment projects, the second block is an economic-mathematical submodel that displays the external environment of projects. The models interact at the pre-investment stage of the project lifecycle in the mode of a strategic game at the macro level. The first as an information base is based on expert estimates of the costs and results of projects that claim to be implemented in the long term, the second-mainly on statistical information from the country and regions. The impact of a new large-scale investment project on the model of the Russian economy is evaluated and the positive or negative impact of each (from among the considered ones) on the target function of the economic model is identified. **Conclusion.** The article comments on the results of experimental calculations using a hybrid model and, using the example of railway transport, formulates recommendations for its use in the development of substantiating materials for large-scale projects of federal significance.

Keywords: large-scale investment projects, non-system approach, project approach, frame, inter-cluster balance, optimization interregional intersectoral models, hybrid evaluation model.

References

1. Kornai J. [System paradigm]. *Voprosy ekonomiki*, 2002, no. 4, pp. 4–22. (in Russ.)
2. Kleiner G.B. *Evolutsiya institutsional'nykh sistem* [Evolution of institutional systems]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 240 p.
3. Available at: <http://government.ru/docs/all/111285/> (accessed 08/18/2020).
4. Bandman M.K. *Isbrannye trudy i prodolzhenie nachatogo* [Selected works and continuation of what was begun]. Novosibirsk, IEOPP SO RAN, 2014. 448 p.
5. Simon H. The Structure of Ill-structured Problems. *Artificial Intelligence*, 1973, vol. 4, pp. 181–202. (in Russ.)
6. Granberg A.G. [Modeling the spatial development of the national and world economy: evolution of approaches]. *Region: ekonomika i sotsiologiya*, 2007, no. 1, pp. 87–107. (in Russ.)
7. Keene R.L., Raifa H. *Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zamesheniya* [Decision-making under many criteria: preferences and substitutions]. Moscow, Radio and communication, 1981. 560 p.
8. Saati T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarchii* [Decision-making. Method of analysis of hierarchies]. English translation. Moscow, Radio and communication, 1993. 320 p.
9. Available at: <http://bnarchives.yorku.ca> (accessed 04.07.2021).
10. Kibalov E.B., Bepalov I.A., Buzulutskov V.F. et al. *Kompleksnyi podkhod k otsenke obshestvennoi effektivnosti krupnomasshtabnykh zheleznodorozhnykh proektov* [An integrated approach to assessing the social efficiency of large-scale railway projects]. Novosibirsk, Publishing house of SGUPS, 2015. 160 p.
11. Kibalov E.B., Kin A.A., Khutoretskiy A.B. [Evaluation of the effectiveness of large-scale transport projects]. *Region: ekonomika i sotsiologiya*, 2012, no. 2 (74), pp. 161–187. (in Russ.)
12. Ackoff R. *Iskusstvo resheniya problem* [The art of problem solving]. Moscow, Mir Publ., 1982, 282 p.

Received 21 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гельруд, Я.Д. Оценка стратегической эффективности крупномасштабных инфраструктурных проектов в ситуации неопределенности: проектный подход / Я.Д. Гельруд, Е.Б. Кибалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 113–122. DOI: 10.14529/ctcr210311

FOR CITATION

Gelrud Ya.D., Kibalov E.B. Assessment of the Strategic Efficiency of Large-Scale Infrastructure Projects in a Situation of Uncertainty: a Project Approach. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 113–122. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210311

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 681.5

DOI: 10.14529/ctcr210312

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ УСРЕДНЕНИЕМ РУДЫ МЕТОДАМИ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Н.В. Бильфельд, Д.В. Пеяс, А.К. Шнабская

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

Показана важность проблемы усреднения руды на калийных предприятиях и поиска оптимального комплекса мер по устранению проблемы. Обозначена проблема большого разброса нерастворимых остатков на калийных предприятиях Верхнекамья. На текущий момент она решается бункерным усреднением, но это работает не всегда эффективно. Было предложено использовать ранее описанный метод осмысленной рассыпки по складу и прицельной выборки в зависимости от состава. Была построена математическая модель загрузки и разгрузки склада, предложены алгоритмы и расчет координат точки сброса и выемки руды в зависимости от содержания в руде нерастворимого остатка и хлористого калия. Этот способ позволяет исключить возможность брака и осуществляет усреднение сырья оптимальным образом. По показателям в имитационной модели прицельная выборка на складе уменьшает процентный разброс нерастворимых остатков в руде. Было решено исследовать процесс выборки на складе для идентификации. **Цель исследования** заключается в проверке возможности управления выборкой как обычным технологическим объектом с помощью пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора. Для этого была проведена идентификация объекта управления, а именно: на вход системы был подан единичный скачок воздействия. **Материалы и методы.** Стандартное воздействие было смоделировано на ранее разработанной имитационной модели склада, где задаются геометрические параметры склада, физические параметры элементов руды, а также параметры движения сопла и скрепера. С ее помощью проводится эксперимент по выборке хлористого калия из руды. Фиксируются результаты выборки руды по начальным установкам, а затем после пятипроцентного скачка. Результаты моделирования представляются в виде нормированного графика для сравнения результатов и определения поведения системы. **Результат.** Полученный массив значений был перенесен в ранее разработанный калькулятор передаточных функций. По найденным значениям был построен сглаженный нормированный график, который и нужно было идентифицировать. В результате проделанной работы была получена передаточная функция апериодического звена первого порядка с запаздыванием. **Заключение.** При анализе графиков был сделан вывод о допустимости полученной функции. По полученным массивам значений была рассчитана погрешность, которая составляет 6,5 %. Передаточная функция была идентифицирована, следовательно, выборкой на складе можно управлять с помощью пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора.

Ключевые слова: калийная руда, усреднение руды, гидродинамика сглаженных частиц, моделирование, склад, выборка, передаточная функция, пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор.

Введение

Калийная промышленность является важнейшей отраслью промышленности в силу широкого спектра применения в народном хозяйстве и даже в медицине. Почти вся российская калийная промышленность сосредоточена в Верхнекамье – а это свыше 30 % мировых запасов KCl [1]. С 2018 года производство хлористого калия начало ООО «Еврохим – Усольский калийный комбинат» в Пермском крае [2]. Одной из главных проблем данного предприятия, негативно сказывающихся на флотационных процессах, стал большой разброс нерастворимых остатков в составе

добываемой руды [3]. Если не усреднять имеющийся разброс, то из-за колебаний содержания нерастворимого остатка в руде продукция будет забракована. Чтобы избежать возможного брака, придется перенастраивать флотационные процессы, а это спровоцирует рост затрат из-за излишнего расхода реагентов. На предприятии проблема решается бункерным усреднением. Суть метода заключается в наличии сборного конвейера, который получает добытую руду различного состава из накапливающих бункеров [4]. Данный метод не вполне эффективен по причине того, что не достигается нужная однородность полезного ископаемого [5].

В работе [4] был предложен метод для усреднения руды, заключающийся в осмысленной рассыпке руды по складу и прицельной выборке. Суть метода в том, что состав руды при заполнении склада известен в каждой точке склада. Это дает возможность выборки материала постоянного состава в заданных точках [6].

Объект данного исследования – склад, заполняемый рудой через транспортную систему, – служит для усреднения и хранения руды. На рис. 1 представлен такой склад, использующий для разгрузки кратцер-краны. В работе предлагается скреперная (точечная) выборка руды для дальнейшей переработки.



Рис. 1. Производственный склад
Fig. 1. Production warehouse

Задача данной статьи – проверить, можно ли управлять выборкой как обычным технологическим объектом при помощи ПИД-регулятора. Следовательно, объектом управления является такая выборка. Целью данной статьи ставится возможность идентифицировать выборку, то есть определить передаточную функцию.

Материалы и методы

Для исследования склада была взята *SPH*-модель, описанная в статье [7]. Метод гидродинамики сглаженных частиц – это бессеточный лагранжевый метод, разрешающая способность которого может быть отрегулирована относительно переменных. Моделирование сводится к разбиению общей массы руды на множество взаимодействующих частиц, которые обмениваются между собой физическими характеристиками [8–10]. В общих чертах моделирование выражается в следующих алгоритмах для загрузки склада [11]:

- 1) ввод информации о физических свойствах компонент;
- 2) генерация частицы в сопле;
- 3) падение частицы;
- 4) поиск соседей;
- 5) расчет сил, действующих на частицы,

и для разгрузки склада:

- 1) ввод информации о физических свойствах компонент;
- 2) выемка грейфером;
- 3) поиск соседних частиц;
- 4) расчет сил, действующих на частицы.

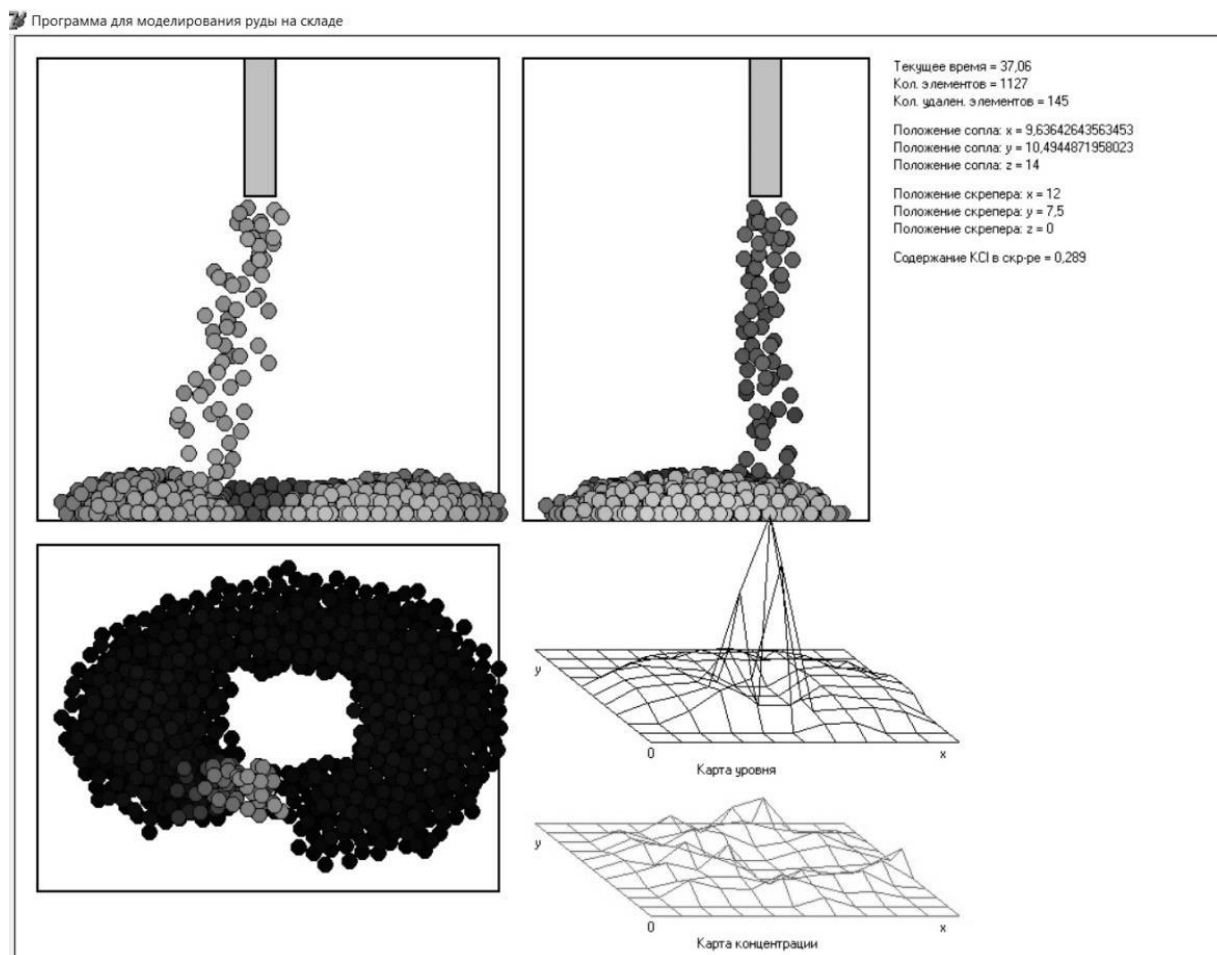


Рис. 2. Реализующее программное обеспечение
Fig. 2. Implementing software

Модель реализована с помощью программного обеспечения, предназначенного для управления движением сопла, подающего руду на склад, и скрепера, удаляющего руду со склада (рис. 2) [12].

Программа принимает от пользователя данные о геометрических параметрах склада, данные о содержании нерастворимого остатка и хлористого калия в руде и задание алгоритма движения сопла и скрепера. В процессе работы формируются карты уровня руды и позиция сопла и скрепера в текущий момент.

Результат

Для управления выборкой необходимо произвести идентификацию по каналу «содержимое KCl на входе – содержимое KCl на выходе», подавая стандартное воздействие – единичный 5%-ный скачок на входе [13–16].

Первоначально было задано 20%-ное содержание KCl как исходный параметр при моделировании процесса. Было зафиксировано процентное содержание KCl в руде в течение 300 с. Затем был дан на вход 5%-ный скачок содержания KCl – 24 %. Аналогично были записаны данные по содержанию хлористого калия в течение еще 300 с. Вся выборка производилась из середины склада без смещения скрепера. На основе полученных данных сначала был построен нормированный график в *MS Excel* (рис. 3).

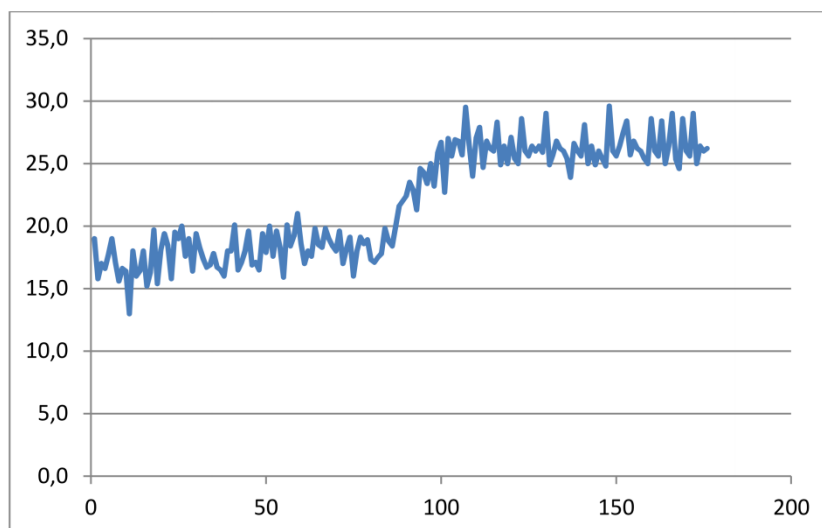


Рис. 3. Тренд содержания KCl в руде (%), использованный в эксперименте
Fig. 3. Trend of KCl content in ore (%) used in the experiment

После этого массив точек по показаниям нашего моделирования был передан в специальную программу «Многокритериальное исследование систем управления», разработанную на кафедре автоматизации [15]. Средствами программы произведено математическое сглаживание методом пяти точек для отброса точек, среднеквадратичное отклонение которых было велико. Сглаженный массив был пронормирован в интервале от 0 до 1 (рис. 4). Используя модуль идентификации, получили передаточную функцию объекта, которая описывает апериодическое звено с запаздыванием, имеющую вид

$$W(s) = \frac{1}{38 \cdot s + 1} \cdot e^{-280 \cdot s}.$$

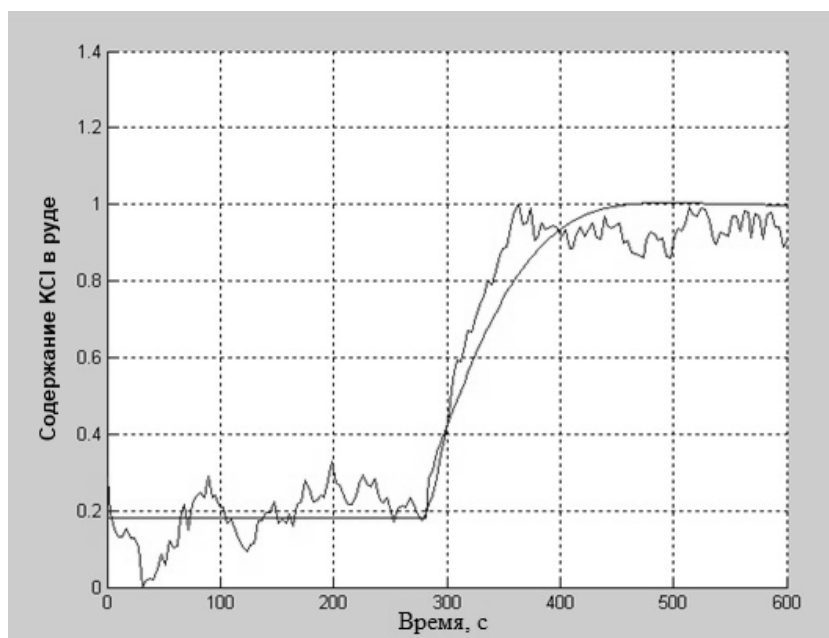


Рис. 4. Нормированный график и график, полученный по передаточной функции
Fig. 4. Normalized graph and graph obtained from the transfer function

Выводы

При сравнении графиков можно убедиться, что полученная передаточная функция адекватно описывает рассматриваемый процесс. Полученная максимальная погрешность не превышает 6,5 %, следовательно, идентификация представленной характеристики возможна – цель работы

достигнута. Управление объектами с такой передаточной функцией легко осуществляется с помощью ПИД закона регулирования. Отсюда можно сделать вывод, что ПИД-управление применимо к управлению выборкой руды из усреднительного склада.

Литература

1. Верхнекамское месторождение. – https://www.aziko.ru/ural-sights-marshruty/articles_items/verkhnekamskoe-mestorozhdenie-120.
2. Усольский калийный комбинат – для будущих поколений // *Промышленная безопасность*. – 2013. – № 5. – С. 52–55.
3. *Substantiation of averaging the content of mined ores with account of their readiness for mining* / T. Kalybekov, K. Rysbekov, D. Nauryzbayeva et al. // *Ukrainian School of Mining Engineering – 2020. E3S Web of Conferences, Berdiansk, Ukraine*. – 2020. – Vol. 201, id. 01039. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101039
4. Варламова, С.А. Об усреднении состава руды на промежуточном складе / С.А. Варламова, А.В. Затонский // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Естественные и технические науки*. – 2013. – № 9-10. – С. 12–18.
5. Усреднение качества полезных ископаемых (часть 2). – <http://industry-portal24.ru/osnovy-gornogo-dela/2618-usrednenie-kachestva-poleznyh-iskopaemyh-chast-2.html>.
6. *DEM simulation of particle flow in a parallel-hopper bell-less charging apparatus for blast furnace* / J. Qiu, D. Ju, J. Zhang, Y. Xu // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 314. – P. 218–231.
7. Grigalashvili, A.S. Software in solving ore blending problems / A.S. Grigalashvili // *Материалы III Международной научной конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности»*. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2014. – С. 55–57.
8. Lind, Steven J. Review of smoothed particle hydrodynamics: towards converged Lagrangian flow modelling / Steven J. Lind, Benedict D. Rogers, Peter K. Stansby // *Proc Math Phys Eng Sci*. – 2020 Sep. – Vol. 476 (2241): 20190801. DOI: 10.1098/rspa.2019.0801
9. Liu, M. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments / M. Liu, G. Liu // *Archives of Computational Methods in Engineering*. – 2010. – Vol. 17, no. 1. – P. 25–76.
10. Тимохин, М.Ю. Исследование газовых микротечений в переходной области на основе моментных уравнений: дис. ... канд. техн. наук / М.Ю. Тимохин. – М., 2014. – 115 с.
11. Имитационная математическая модель процесса смешивания сыпучих компонентов в смесителе / А.Н. Острикова, Л.Н. Фролова, А.И. Александров, В.В. Посметьев // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2019. – Т. 81, № 2. – С. 13–21.
12. Затонский, А.В. Преимущества дифференциальной модели сложной экономической системы / А.В. Затонский, Н.А. Сиротина // *Образование. Наука. Научные кадры*. – 2012. – № 8. – С. 98–102.
13. Семенов, А.Д. Идентификация объектов управления / А.Д. Семенов, Д.В. Артамонов, А.В. Брюхачев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 211 с.
14. Поляков, К.Ю. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие / К.Ю. Поляков. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2012. – 234 с.
15. Бильфельд, Н.В. Имитационное моделирование систем цифрового управления / Н.В. Бильфельд, В.Ф. Беккер. – Пермь: Пермский гос. техн. ун-т, 2002. – 52 с.
16. Затонский, А.В. Информационное обеспечение поддержки принятия решений на примере составления расписания занятий образовательной организации / А.В. Затонский, С.А. Варламова // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 88–106. DOI: 10.14529/ctcr180310

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

Пеяс Дарья Валерьевна, студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; dv.gracheva@gmail.com.

Шнабская Анжелика Константиновна, студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; angelika8918@gmail.com.

Поступила в редакцию 27 мая 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210312

STUDY OF THE POSSIBILITY OF CONTROLLING ORE AVERAGING BY METHODS OF CLASSICAL CONTROL THEORY

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

D.V. Peyas, dv.gracheva@gmail.com,

A.K. Shnabskaya, angelika8918@gmail.com

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

The importance of the problem of ore averaging at potash enterprises and the search for the optimal set of measures to eliminate the problem are shown. The problem of a large spread of insoluble residues in the potash enterprises of the Verkhnekamsky District is identified. At the moment, it is solved by bunker averaging, but this does not always work effectively. It was suggested to use the previously described method of meaningful distribution in the warehouse and targeted sampling depending on the composition. A mathematical model of loading and unloading of the warehouse was constructed; algorithms and calculation of the coordinates of the point of discharge and extraction of ore were proposed, depending on the content of insoluble residue and potassium chloride in the ore. This method excludes the possibility of manufacturing defects and carries out the averaging of raw materials in an optimal way. According to the indicators in the simulation model, targeted sampling in the warehouse reduces the percentage spread of insoluble residues in the ore. It was decided to investigate the sampling process in the warehouse for identification. **Purpose of work** is to test the possibility of controlling the sample as a conventional technological object using a proportional-integral-differentiating controller. To do this, the control object was identified, namely: a single impact jump was applied to the system input. **Materials and methods.** The standard impact was modeled on a previously developed warehouse simulation model, where the geometric parameters of the warehouse, the physical parameters of the ore elements, as well as the parameters of the nozzle and scraper movement are set. With its help, potassium chloride from ore is conducted. The results of the ore sampling are recorded for the initial installations, and then after a five percent jump. The simulation results are presented as a normalized graph for comparing the results and determining the behavior of the system. **Result.** The resulting array of values was moved to the previously developed transfer function calculator. Based on the values found, a smoothed normalized graph was constructed, which had to be identified. As a result of this work, the transfer function of the first-order aperiodic link with a delay was obtained. **Conclusion.** When analyzing the graphs, a conclusion about the validity of the obtained function was made. Based on the obtained arrays of values, an error of 6,5% was calculated. The transfer function has been identified, so the sample in the warehouse can be controlled using a proportional-integral-differentiating controller.

Keywords: potash ore, ore averaging, smoothed particle hydrodynamics, modeling, warehouse, sampling, transfer function, proportional-integral-differentiating controller.

References

1. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie* [Electronic resource]. Available at: https://www.aziko.ru/ural-sights-marshruty/articles_items/verkhnekamskoe-mestorozhdenie-120.
2. [Usolskiy potash plant – for future generations]. *Promyshlennaya bezopasnost'* [Industrial Safety], 2013, no. 5, pp. 52–55. (in Russ.)
3. Kalybekov T., Rysbekov K., Nauryzbayeva D., Toktarov A., Zhakypbek Y. Substantiation of averaging the content of mined ores with account of their readiness for mining. *Ukrainian School of Mining Engineering – 2020. E3S Web of Conferences*, Berdiansk, Ukraine. – 2020. – Vol. 201, id. 01039. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101039
4. Varlamova S.A., Zatonkiy A.V. [On the averaging of the ore composition at the intermediate warehouse] *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern science: topical problems of theory and practice. Natural and technical sciences], 2013, no. 9-10, pp. 12–18. (in Russ.)
5. *Usredneniye kachestva poleznykh iskopayemykh (chast' 2)* [Averaging the quality of minerals (part 2)]. Available at: <http://industry-portal24.ru/osnovy-gornogo-dela/2618-usrednenie-kachestva-poleznykh-iskopaemykh-chast-2.html>.
6. Qiu J., Ju D., Zhang J., Xu Y. DEM simulation of particle flow in a parallel-hopper bell-less charging apparatus for blast furnace. *Powder Technology*, 2017, vol. 314, pp. 218–231.
7. Grigalashvili A.S. Software in solving ore blending problems. *Materialy III Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Innovatsionnyye protsessy v issledovatel'skoy i obrazovatel'noy deyatel'nosti"*. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2014, pp. 55–57.
8. Steven J. Lind, Benedict D. Rogers, Peter K. Stansby. Review of smoothed particle hydrodynamics: towards converged Lagrangian flow modelling. *Proc Math Phys Eng Sci.*, 2020 Sep., vol. 476 (2241): 20190801. DOI: 10.1098/rspa.2019.0801
9. Liu M., Liu G. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 25–76.
10. Timokhin, M.Yu. *Issledovaniye gazovykh mikrotecheniy v perekhodnoy oblasti na osnove momentnykh uravneniy: dis. kand. tekhn. nauk* [Study of gas microflows in the transition region based on moment equations. Cand. sci. diss.]. Moscow, 2014. 115 p.
11. Ostrikova A.N., Frolova L.N., Aleksandrov A.I., Posmet'ev V.V. [Simulation mathematical model of the mixing process of bulk components in a mixer]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2019, vol. 81, no. 2, pp. 13–21. (in Russ.)
12. Zatonkiy A.V., Sirochina N.A. [Advantages of a Differential Model of a Complex Economic System]. *Obrazovanie. Nauka. Nauchnye kadry*, 2012, no. 8, pp. 98–102. (in Russ.)
13. Semenov A.D., Artamonov D.V., Bryukhachev A.V. *Identifikatsiya ob'yektov upravleniya* [Identification of control objects]. Penza, Penza State University Publ., 2003. 211 p.
14. Polyakov K.Yu. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobiye* [Foundations of the theory of automatic control]. St. Petersburg, SMTU Publ., 2012. 234 p.
15. Bilfeld N.V., Bekker V.F. *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem tsifrovogo upravleniya* [Simulation of digital control systems]. Perm, Perm State University Publ., 2002. 52 p.
16. Zatonkiy A.V., Varlamova S.A. Information Basis of Decision Support System for High School Timetable Creation as an Example. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 88–106. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180310

Received 27 May 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бильфельд, Н.В. Исследование возможности управления усреднением руды методами классической теории управления / Н.В. Бильфельд, Д.В. Пейс, А.К. Шнабская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 123–129. DOI: 10.14529/ctcr210312

FOR CITATION

Bilfeld N.V., Peyas D.V., Shnabskaya A.K. Study of the Possibility of Controlling Ore Averaging by Methods of Classical Control Theory. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 123–129. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210312

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА МОДЕЛЕЙ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРНО-ВЫЕМОЧНЫХ РАБОТ

А.В. Затонский¹, П.А. Язев²

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Россия,

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Обозначена важность планирования добычи для улучшения показателей эффективности горнодобывающего предприятия. Показана возможность использования имитационного моделирования для этой цели. Показано, что созданная модель имеет большое количество стохастических параметров. Исследовано, что существует проблема отсутствия исследований влияния выбора различных статистических распределений на результаты моделирования горных работ. Известно, что при увеличении стохастических отклонений от заданных параметров производительность систем массового обслуживания падает. **Цель исследования:** исследование влияния четырех статистических распределений случайной величины (равномерное, нормальное, отрицательное биномиальное и распределение Пуассона) для отдельных операций и их комбинаций. Кроме того, нужно определить, насколько сильно изменение одного конкретного параметра повлияет на общий результат работы модели. **Материалы и методы.** В созданную ранее имитационную модель ко времени отдельных операций добавляется стохастическая задержка. Исследуется добавление такой задержки с разным статистическим распределением, но с одинаковым математическим ожиданием. Результаты моделирования сравниваются между собой, для каждой отдельной операции показывается абсолютное и относительное отклонение результатов. Далее производится аналогичное моделирование при изменении всех выбранных параметров одновременно. **Результат.** Показано, что величина отклонения значительно различается между собой для всех отклонений. Для различных единичных изменений операций наибольшее и наименьшее отклонение могут дать разные статистические распределения. Для исследования совместного изменения всех параметров реализуются 3 сценария моделирования: все равномерные распределения (этот случай используется сейчас), сценарий с наименьшим отклонением и сценарий с наибольшим отклонением. Показано значительное изменение результатов моделирования при переходе к другому сценарию. **Заключение.** Делается вывод, что показано значительное влияние выбора использованных статистических распределений на точность моделирования работы комбайна, особенно при их совместном учете. Полученные результаты могут использоваться для уточнения влияния отдельных факторов в имитационной модели и улучшения планирования калийных горно-выемочных работ, в том числе для отдельных комбайнов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, стохастическая модель, калийная руда, горно-выемочные работы, статистическое распределение, равномерное распределение, нормальное распределение, распределение Пуассона, отрицательное биномиальное распределение.

Введение

Калийные удобрения имеют важное значение для мирового сельского хозяйства. На территории России добыча калийной руды выполняется компаниями АО «МХК «ЕвроХим» и ПАО «Уралкалий» на территории Верхнекамского месторождения. Важность калийных удобрений для мировой экономики показывает, в частности, тот факт, что эта отрасль ощутила на себе меньшие потери, чем другие добывающие отрасли, особенно нефтегазовая [1]. Планирование добычи является важной составляющей работы любого предприятия. Для уточнения планов добычи может быть использовано имитационное моделирование [2, 3], предлагаемая имитационная модель была описана ранее.

Материалы и методы

Модель оснащена регламентными либо предельными временами технологических операций [4]. В реальности же все эти параметры имеют стохастический характер. При увеличении стохастических отклонений от заданных параметров результат имитационного моделирования значительно меняется [5, 6]. В созданной нами системе [7] определяется большое количество обусловленных человеческим фактором стохастических параметров, статистические распределения которых неизвестны и не могут быть определены из наблюдений. Описанные имитационные модели горной добычи [8–13] указывают на наличие таких случайных факторов, но либо используемое в них распределение не указывается, либо используется только одно распределение для всех параметров (чаще всего нормальное). Таким образом, ставится задача исследования влияния четырех выбранных статистических распределений случайных величин на результаты моделирования горно-выемочных работ. Для проведения эксперимента были выбраны 4 технологические операции комбайна, занимающие вместе с регламентированными остановками работы около 80 % времени работы комбайна в модели. Остальные 20 % времени приходятся на различные короткие остановки работы комбайна для вентиляционного бурения, переноса маркшейдерских точек и т. д. Для всех операций исследовались 4 статистических распределения: равномерное, нормальное, распределение Пуассона и отрицательное биномиальное распределение.

Имитационное моделирование производилось с добавлением стохастической задержки с одинаковым математическим ожиданием, но с разными статистическими распределениями последовательно к длительности одной технологической операции, в последнем эксперименте – к длительности всех выбранных технологических операций. В реальности математическое ожидание задержки также неизвестно, поэтому для проведения эксперимента оно было выбрано достаточно большим (30–50 % времени соответствующей операции). Ранее было показано, что разница между разными статистическими распределениями в модели значительно увеличивается по мере роста математического ожидания задержки [14].

Результат и обсуждение

Для проведения эксперимента в существующей модели время основного состояния «Отбойка руды» было увеличено на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным 3. Результат моделирования представлен на рис. 1.

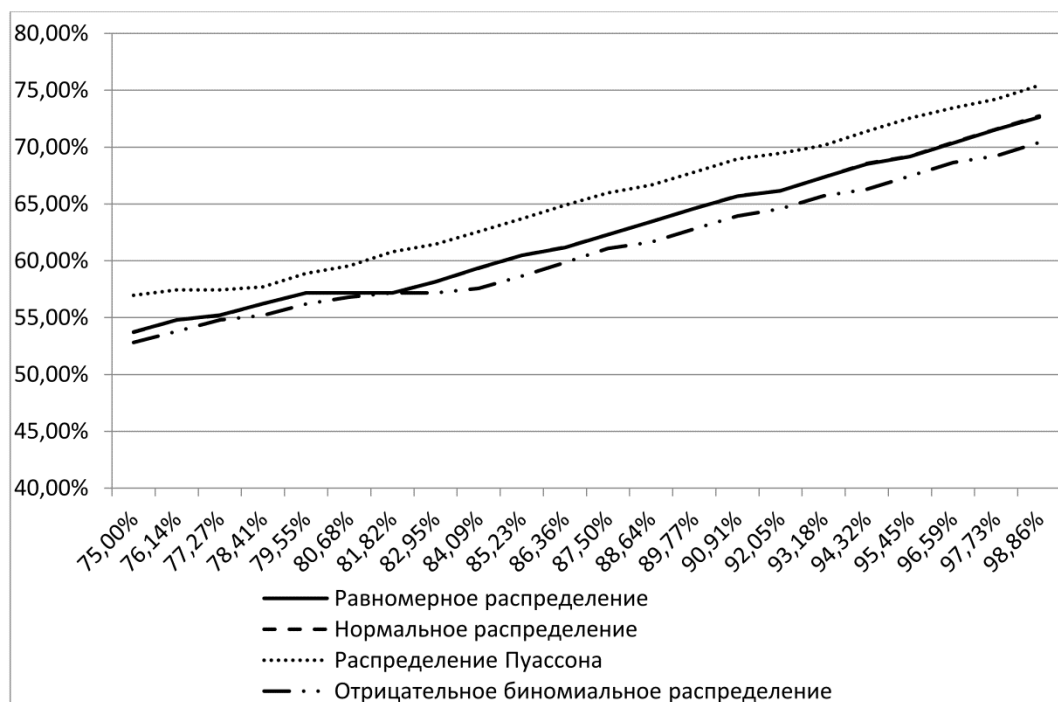


Рис. 1. Изменения параметра «отбойка руды»

Fig. 1. "Ore breaking" parameter changes

Автоматизированные системы управления...

Как видно из графика, результаты моделирования для нормального и равномерного распределений очень близки, а для распределения Пуассона и отрицательного биномиального разница значительная. Эта разница увеличивается со временем, достигая значения 5 % в абсолютных значениях к концу моделирования длительностью 1 месяц. Другой технологической операцией, занимающей большой процент времени работы моделируемой системы, является отгрузка руды из бункера-перегрузателя комбайна на самоходный вагон. Для эксперимента эта величина была увеличена на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным 2 минутам. Результат моделирования представлен на рис. 2.

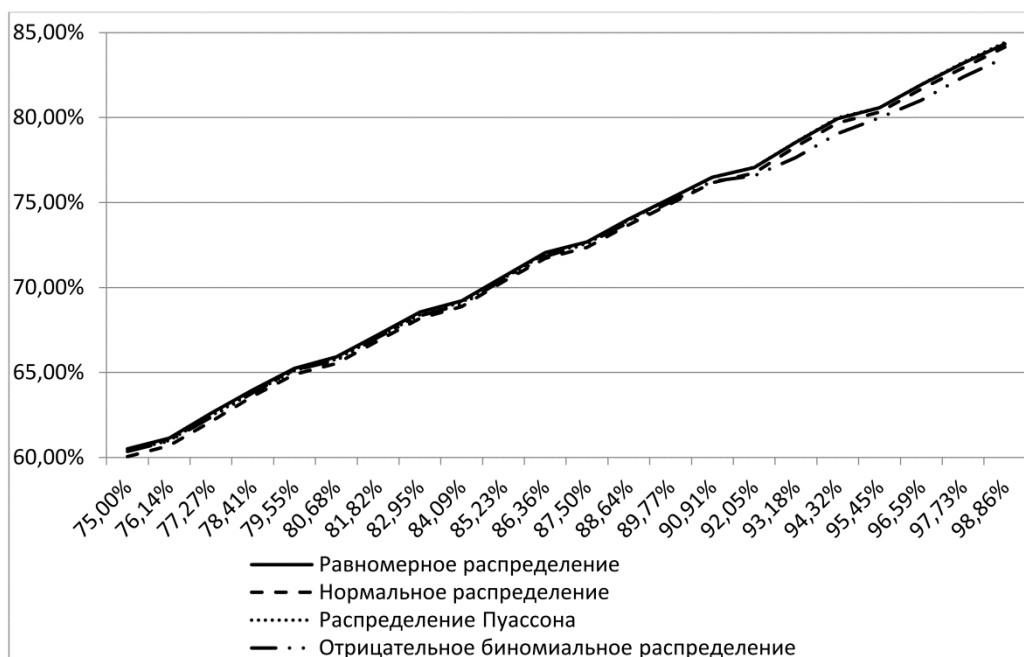


Рис. 2. Изменение параметра «Перегрузка руда»
Fig. 2. “Ore loading” parameter changes

Для данной технологической операции выбор статистического распределения менее важен, чем для предыдущей, так как в данном случае все значения выработки ближе друг к другу, общая разница выработки не превышает 2 % в абсолютных значениях на диапазоне в 1 месяц, хотя и в этом случае отрицательное биномиальное распределение показывает наименьшее значение выработки.

Другим важным типом технологической операции является операция, наступающая редко, но занимающая длительное время. Наиболее значимой такой операцией для исследования влияния выбора статистического распределения является отгон комбайна – выполняется 1 раз для каждой проходки камеры, но общее время в работе модели составляет до 10 %. Данный параметр для экспериментов был увеличен на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным 5 часам. Результат моделирования представлен на рис. 3.

Изменение статистического распределения для технологической операции «Отгон» более важно, чем для предыдущей, однако в данном случае мы наблюдаем другую картину: абсолютная разница в объеме выработки может значительно колебаться от 1 до 10 %, что объяснимо для данной операции: за время отбойки одной камеры комбайн всегда добывает одно и то же количество руды, различается только время между отбойками камеры, различие в котором нарастает со временем. Ещё одной технологической операцией, время выполнения которой может значительно влиять на общий объем выработки, является выполнение длительного планового или внепланового ремонта [15]. Хотя для этой операции статистическое распределение должно соответствовать распределению Пуассона, в существующей модели для предприятия используется равномерное распределение, и мы должны понять, насколько это влияет на результат моделирования. Данный параметр для экспериментов был увеличен на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным половине времени выполнения самого ремонта. Результат моделирования представлен на рис. 4.

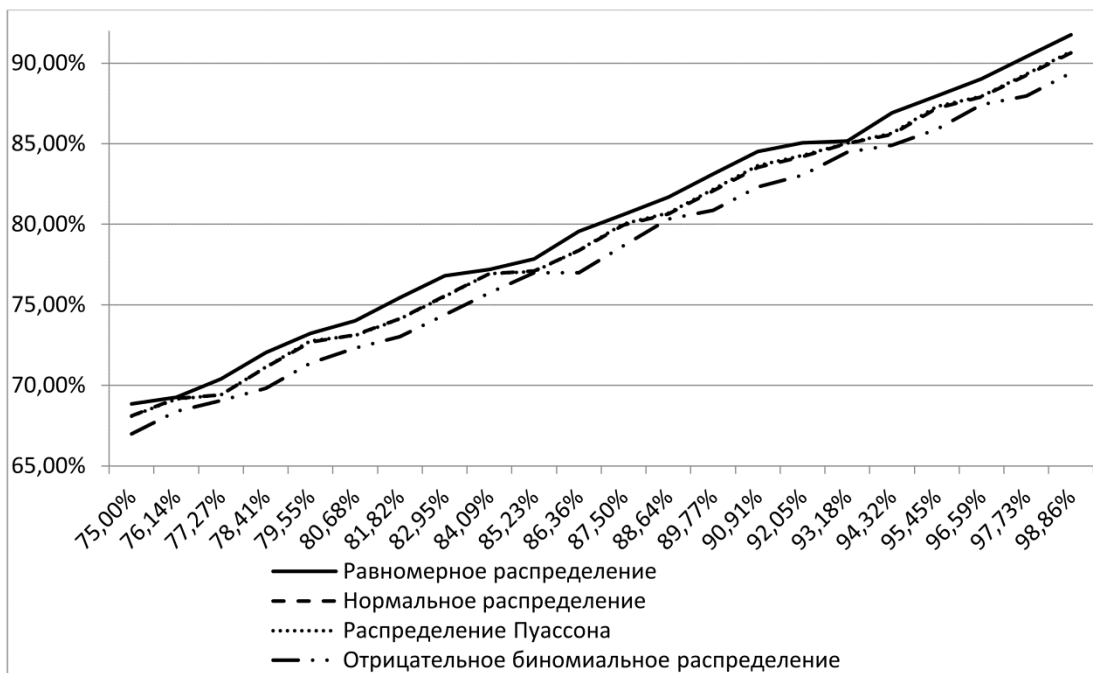


Рис. 3. Изменение параметра «Огон»
Fig. 3. "Mining machine passage" parameter changes

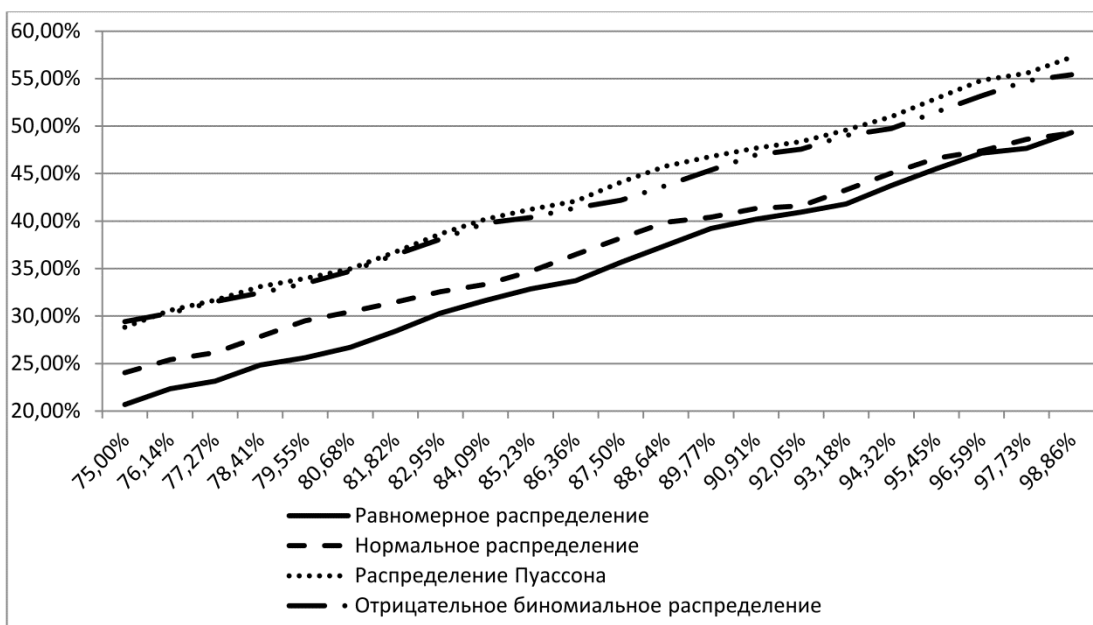


Рис. 4. Изменение параметра «Время выполнения ремонта»
Fig. 4. "Maintenance time" parameter changes

Отклонение для распределения Пуассона для данной операции оказывается наименьшим, а для равномерного – наибольшим. Таким образом, неверный выбор распределения для одной только этой операции может дать погрешность при моделировании в абсолютном объеме выработки до 10 % за 1 месяц.

На основе всех полученных распределений для четырех вышеописанных операций была определена относительная степень влияния выбора того или иного распределения для каждой операции. Результаты моделирования представлены в таблице.

Автоматизированные системы управления...

Относительное отклонение результатов моделирования, %
Relative deviation of simulation results, %

	Равномерное	Нормальное	Отрицательное биномиальное	Пуассон
Отбойка	12,58	11,94	21,85	–
Отгрузка	1,01	2,28	4,44	–
Отгон	–	14,29	31,27	12,94
Выполнение ремонта	17,39	15,35	1,77	0,00

Как видно из таблицы и графиков, хотя абсолютное значение разницы между статистическими распределениями для одной технологической операции могут быть не очень большими, в относительных цифрах разница может колебаться от 1 до 31,3 % в зависимости от характера технологической операции.

По требованию заказчика для эксплуатации модели в реальном производстве все случайные величины должны иметь равномерное распределение. Чтобы определить, насколько сильно такое допущение может влиять на результаты выработки, проверим работу модели для комбинации из всех четырёх вышеописанных операций для следующих случаев:

- 1) равномерное распределение для всех операций;
- 2) для каждой операции такое распределение, при котором отклонение результата является наименьшим;
- 3) для каждой операции такое распределение, при котором отклонение результата является наибольшим.

Результат моделирования представлен на рис. 5.

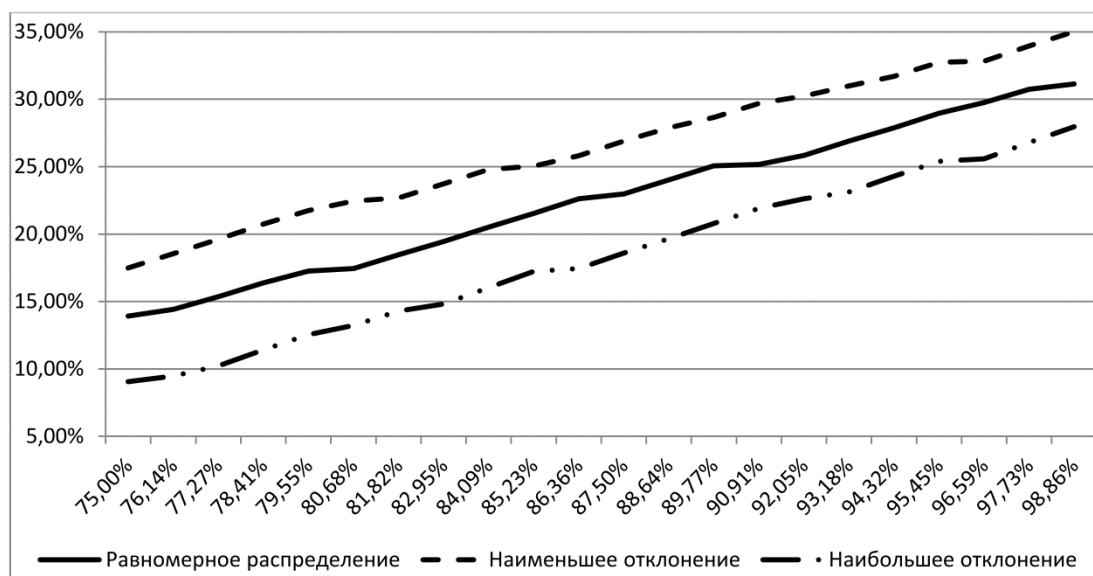


Рис. 5. Общий результат моделирования
Fig. 5. Overall simulation result

Полученные данные общего моделирования подтверждают результаты отдельных экспериментов – общий результат работы модели значительно меняется при различном выборе статистических распределений. Выбор по умолчанию – все равномерные распределения – оказывается ровно между наибольшим и наименьшим отклонением с разницей около 10 % абсолютного объема выработки.

Выводы

Таким образом, исследование показало значительное влияние выбора использованных статистических распределений отдельных параметров на точность моделирования работы комбайна и,

как следствие, на точность составления плана добычи калийной руды. Полученные результаты могут использоваться для уточнения влияния отдельных факторов в имитационной модели и, следовательно, для улучшения планирования калийных горно-выемочных работ. Степень влияния выбора распределения может различаться в зависимости от типа технологической операции, однако для общего результата предполагаемое к использованию на данный момент равномерное распределение дает усредненный результат, по которому можно составить прогноз общей добычи рудника на некоторый период времени, но крайне сложно составить план работы для каждого отдельного комбайна.

Литература

1. Еврохим. Финансовые результаты по МСФО за 2020 год. – <https://www.eurochemgroup.com/ru/media-announcements/finansovyye-rezultaty-po-msfo-za-2020-god/> (дата обращения: 17.05.2021).
2. Morales, N. Incorporation of geometallurgical attributes and geological uncertainty into long-term open-pit mine planning / N. Morales, S. Seguel, A. Cáceres et al. // *Minerals*. – 2019. – Vol. 9, iss. 2, pap. 108. DOI: 10.3390/min9020108
3. Шек, В.М. Использование имитационного моделирования для оптимизации проведения горных работ / В.М. Шек, М.Ю. Соболева // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – № 10. – С. 201–205.
4. Zatonkiy, A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes / A.V. Zatonkiy // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 60–67. DOI: 10.14529/ctcr190306
5. Соловьев, В.А. Разработка калийных месторождений: практикум / В.А. Соловьев, А.И. Секунцов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 265 с.
6. Затонский, А.В. Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов / А.В. Затонский, В.Н. Уфимцева // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2018. – № 4. – С. 56–62.
7. Разработка имитационной модели для планирования горно-выемочных работ / С.А. Варламова, Ю.И. Володина, А.В. Затонский, П.А. Язев // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 10. – С. 214–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-100-214-222
8. Голодов, М.А. Обоснование параметров короткозабойных технологий отработки околоствольных целиков с закладкой выработанных пространств: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск: Шахтинский университет (филиал ЮРГПУ (НПИ)), 2009. – 227 с.
9. Разработка имитационной модели шагающей крепи с интеграцией алгоритмов управления для визуализации технологических процессов / М.С. Никитенко, С.С. Журавлев, Ю.В. Малахов, Н.В. Абабков // *Вестник КузГТУ*. – 2019. – №1. – С. 49–58.
10. Непша, Ф.С. Методология имитационного компьютерного моделирования системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / Ф.С. Непша, В.А. Воронин, А.Н. Ермаков // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2020. – № 6 (152). – С. 59–67.
11. Okolnishnikov, V.V. Modelling of Longwall Coal Mining // *2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE)*. – Madrid, Spain, 2020. – P. 202–208. DOI: 10.1109/MACISE49704.2020.00044
12. Matamoro, M.E.V. Stochastic short-term mine production schedule accounting for fleet allocation, operational considerations and blending restrictions / M.E.V. Matamoro, R. Dimitrakopoulos // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – Vol. 255. – P. 911–921.
13. Применение имитационного моделирования для оценки вариантов отработки выемочного блока короткими забоями / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев, И.С. Кузнецов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 48. – С. 181–193. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-48-181-193
14. Язев, П.А. Использование статистических распределений случайной величины при моделировании горно-выемочных работ / П.А. Язев, О.Н. Лапаев // *Молодежная наука в развитии регионов*. – 2020. – С. 30–32.
15. Кузнецов, И.С. Исследование влияния внеплановых простоев горных машин на добычу угля открыто-подземным способом методом имитационного моделирования / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов // *Уголь*. – 2020. – № 9. – С. 10–13. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-10-13

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; z Xenon@narod.ru.

Язев Павел Александрович, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; yazev1988@gmail.com.

Поступила в редакцию 18 мая 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210313

INVESTIGATION OF THE RANDOM VALUE STATISTICAL DISTRIBUTIONS MODELS CHOICE INFLUENCE ON THE MINING OPERATIONS MODELING RESULTS

A.V. Zatonskiy¹, z Xenon@narod.ru,
P.A. Yazev², yazev1988@gmail.com

¹ Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation,

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The importance of production planning for improving the performance indicators of a mining enterprise is indicated. The possibility of simulation modeling using for this aim is shown. It is shown that the created model has a large number of stochastic parameters. It is investigated that there is a problem of research lack about the choice influence of the mining modeling results with different statistical distributions. It is known that with an increase in stochastic deviations from the initial parameters, the productivity of queuing systems decreases. **Purpose of work** is to study this influence with four statistical distributions of a random quantity (uniform, normal, negative binomial and Poisson distribution) for individual operations and their combinations. In addition, it is necessary to determine how much a change in one particular parameter will affect the overall result of the modeling. **Materials and methods.** In the previously created simulation model, a stochastic delay is added to the time of individual operations. The addition of such a delay with different statistical distributions and with the same mathematical expectation is investigated. The simulation results are compared with each other, for each individual operation the absolute and relative deviation of the results is shown. Further, a similar simulation is performed when all the simultaneously selected parameters changing. **Result.** It is shown that the magnitude of the deviation significantly differs among all deviations. It is shown that for various single changes in operations, the largest and smallest deviations can be given by different statistical distributions. To study the joint change with all parameters, 3 modeling scenarios are implemented: all uniform distributions (this case is used now), the scenario with the smallest deviation and the scenario with the largest deviation. It is shown that switching to another scenario leads to a significant change in the simulation. **Conclusion.** It is concluded that the used significant influence of statistical distributions choice to the accuracy of modeling the operation of the mining machine is shown, especially when they are taken into account together. The results can be used to clarify the influence of individual factors in the simulation model and improve the planning of potash mining operations, for individual mining machines too.

Keywords: simulation modeling, stochastic model, potash ore, mining operations, statistical distribution, uniform distribution, normal distribution, Poisson distribution, negative binomial distribution.

References

1. *Evrohim. Finansovye Rezul'taty po MSFO za 2020 god* [Eurochem. 2020 Year IFRS Financial Results] Available at: <https://www.eurochemgroup.com/ru/media-announcements/finansovye-rezultaty-po-msfo-za-2020-god/> (accessed 17.05.2021).

2. Morales N., Seguel S., Cáceres A., Jélvez E., Alarcón M. Incorporation of Geometallurgical Attributes and Geological Uncertainty into Long-term Open-pit Mine Planning. *Minerals*, 2019, vol. 9, iss. 2, pap. 108, DOI: 10.3390/min9020108
3. Shek V.M., Soboleva M.Yu. [Using Simulation to Optimize Mining Operations] *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'* [MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin], 2005, no. 10, pp. 201–205. (in Russ.)
4. Zatonskiy A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 60–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190306
5. Solov'ev V.A., Sekuncov A.I. *Razrabotka kaliynnykh mestorozhdeniy: praktikum* [Development of Potash Deposits: Practicum]. Perm, PNRSTU Publ., 2013. 265 p.
6. Zatonskiy A.V., Ufimtseva V.N. [Development of Object Tools for Simulation and Multi-Agent Modeling of Production Processes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2018, no. 4, pp. 56–62. (in Russ.)
7. Varlamova S.A., Volodina Yu.I., Zatonskiy A.V., Yazev P.A. [Simulation Model for Planning Mining Operations]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin], 2019, no. 10, pp. 214–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222. (in Russ.)
8. Golodov M.A. *Obosnovaniye parametrov korotkozaboynykh tekhnologiy otrabotki okolostvol'nykh tselikov s zakladkoy vyrabotannykh prostranstv: dis. kand. tekhn. nauk* [Substantiation of the Parameters of Short-term Technologies for Mining Near-wellbore Pillars with Backfilling of Mined-out Spaces. Cand. sci. diss.]. Novocherkassk, 2009. 227 p.
9. Nikitenko M.S., Zhuravlev S.S., Malakhov Yu.V., Ababkov N.V. [Development of a Simulation Model of the Walking Roof Support with Integrated Control Algorithms for Visualizing Mining Processes] *Vestnik KuzGTU*, 2019, no. 1, pp. 49–58. (in Russ.)
10. Nepsha F.S., Voronin V.A., Ermakov A.N. [Methodology of Simulation Computer Modeling of the Power Sup-Ply System of the Coal Mine Extraction Area]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2020, no. 6 (152), pp. 59–67. (in Russ.)
11. Okolnishnikov V.V. Modelling of Longwall Coal Mining. *2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE)*. Madrid, Spain, 2020, pp. 202–208. DOI: 10.1109/MACISE49704.2020.00044
12. Matamoro M.E.V., Dimitrakopoulos R. Stochastic Short-Term Mine Production Schedule Accounting for Fleet Allocation, Operational Considerations and Blending Restrictions. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 255, pp. 911–921.
13. Zinov'ev V.V., Starodubov A.N., Nikolaev P.I., Kuznetsov I.S. [Simulation Use for Evaluation of Working Block Mining Variants in Pillar Mining]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2018, no. 48, pp. 181–193. (in Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-48-181-193
14. Yazev P.A., Lapaev O.N. [The use of statistical distributions of a random variable in modeling mining operations] *Molodezhnaya nauka v razvitii regionov* [Youth science in the development of regions], 2020, pp. 30–32 (in Russ.)
15. Kuznetsov I.S., Zinov'ev V.V., Starodubov A.N. [Investigation of the influence of unscheduled downtime of mining machines on coal mining by open-underground method using the method of simulation modeling]. *Ugol'* [Coal], 2020, no. 9, pp. 10–13. (in Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-10-13.

Received 18 May 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Затонский, А.В. Исследование влияния выбора моделей статистических распределений случайной величины на результаты моделирования горно-выемочных работ / А.В. Затонский, П.А. Язев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 130–137. DOI: 10.14529/ctcr210313

FOR CITATION

Zatonskiy A.V., Yazev P.A. Investigation of the Random Value Statistical Distributions Models Choice Influence on the Mining Operations Modeling Results. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 130–137. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210313

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАДАЧИ СПЛАЙНОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

И.П. Болодурина, Л.С. Гришина, Л.М. Анциферова

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

В настоящее время проблемы искажения данных измерений шумом и появления неопределенностей в критериях качества послужили причиной повышенного интереса к исследованиям в области сплайновой аппроксимации. При этом существующие методы минимизации эмпирического риска, предполагая, что шум является равномерным распределением с более тяжелыми хвостами, чем гауссов, ограничивают области применения данных исследований. Проблема оценки искаженных шумом данных, как правило, основывается на решении оптимизационной задачи с функцией, содержащей неопределенность, возникающей на основе задачи поиска оптимальных параметров. В связи с этим оценка искаженных шумов не может быть разрешена классическими методами. **Цель исследования.** Данное исследование направлено на решение и анализ задачи сплайновой аппроксимации данных в условиях неопределенности на основе параметризации управления и алгоритма проекции градиента. **Методы.** Исследование задачи сплайновой аппроксимации зашумленных данных проведено методом приближения кусочно-постоянной функции управления. При этом параметризация управления возможна только при конечном числе точек разрыва первого рода. В рамках экспериментального исследования применен алгоритм метода проекции градиента для численного решения задачи сплайновой аппроксимации. Предложенные методы применены для исследования параметров задачи сплайновой аппроксимации данных в условиях неопределенности. **Результаты.** Численное исследование подхода к параметризации управления и алгоритма проекции градиента проведено на основе разработанного программно-алгоритмического средства для решения задачи сплайновой модели аппроксимации в условиях неопределенности. Для оценки искаженных шумом данных проведены численные эксперименты по исследованию параметров модели и установлено, что повышение значения параметра α ведёт к увеличению точности, но к потере гладкости. Кроме того, проведенный анализ показал, что рассмотренные законы распределения не изменили точность и скорость сходимости алгоритма. **Заключение.** Предложенный подход для решения задачи сплайновой аппроксимации в условиях неопределенности позволяет определить проблемы искажения данных измерений шумом и появления неопределенностей в критериях качества. Исследование параметров модели показало, что построенная система устойчива к ошибке начального приближения, а законы распределения не оказывают существенного влияния на точность и сходимость метода проекции градиента.

Ключевые слова: цитирование, наукометрические методы, агрегирование библиографической информации, модификация метода *Winnowing*, метод Левенштейна, метод шинглов.

Введение

В настоящее время исследования в области сплайновой аппроксимации стали наиболее актуальными в прикладных задачах. Например, сплайны играют ведущую роль в качестве генераторов контуров или кривых, а сглаживающие сплайны достаточно часто применяются в статистике. Классические сплайны представляют интерполяционные кривые, в то время как сплайны сглаживания удовлетворяют условию аппроксимации достаточно «близко» к точкам исходных данных. В рамках данной работы сглаживающие сплайны представлены как естественная часть теории оптимального управления (ОУ). При этом теоретические концепции управления позволяют находить и интерпретировать сплайны наиболее эффективно.

Исходная форма полиномиальной интерполяции содержит недостатки, которые ограничивают ее применение во многих сферах деятельности, в частности, для многомерных задач.

Основные недостатки исправляет теория сплайнов, в связи с этим рассмотрение вопросов применения сплайнов в различных областях является актуальным вопросом.

В рамках данного исследования рассмотрена линейная квадратичная задача ОУ, для которой не задано начальное состояние системы, однако известны априорные сведения о данной системе. При решении задачи о поиске данных параметров с наиболее эффективным значением функционала качества по набору измеренных данных, необходимо учитывать шум и искажения данных. Данная работа рассматривает частный пример задачи ОУ – задачу аппроксимации сплайновой. Функционал качества вычисляется на основе входных данных и, следовательно, содержит искаженную информацию. В связи с этим данная задача относится к задаче с неопределенностью.

1. Обзор исследований

Исследованиями и разработкой методов аппроксимации сплайн-функций с целью моделирования взаимосвязи между целевым откликом и несколькими переменными предикторами занимаются по всему миру.

Сплайн широко используется в обработке сигналов, дискретных вычислениях, статистике и, в частности, сплайн сглаживания позволят получить гладкую кривую, которая наилучшим образом подходит для аппроксимации данных с шумом [1, 2]. Теоретический сглаживающий сплайн в работе [3] является обобщением сглаживающего сплайна с использованием новых подходов управления, с помощью которых кривая сплайна определяется выходом линейной динамической системы.

В исследовании [4] показано, что управляющие теоретические сплайны относительно полиномиальных позволяют построить более широкий набор сглаживающих кривых. Кроме того, теоретический сплайн управления доказал свою полезность для планирования траектории мобильных роботов [5], контурного моделирования изображений [6], оценки распределения вероятностей [7] и других. Дополнительные приложения и наиболее обширные сведения о теории управления сплайнами представлены в исследовании [8].

Традиционный вид теоретических сплайнов управления основан на оптимизации L_2 и имеет два основных недостатка. Во-первых, данный подход требует количество параметров, равное размерности данных, чтобы представить подобранную кривую.

Оператор наименьшей абсолютной усадки и выбора LASSO представлен в работах [9, 10]. Методы минимизации эмпирического риска, предполагая, что шум является равномерным распределением, представлены в исследовании [11]. Затем проблема описывается в выпуклой оптимизации, которая может быть эффективно решена с помощью численных методов.

В исследовании [12] рассматривается подход к решению задачи ОУ с априорными знаниями и предположениями о распределении шума на входных данных. Данную проблему оценки параметров авторы сформулировали в виде стохастической задачи выбора оптимального параметра.

Таким образом, анализ современных исследований показал, что оценку шума исходных данных можно проводить статистическими методами. Тогда для перевода функционала качества с неопределенностью в детерминированную функцию можно использовать выпуклую комбинацию среднего значения и дисперсии исходной функции. В результате применения данного подхода и формирования детерминированной задачи выбора оптимального параметра возможно использование градиентных алгоритмов оптимизации.

Данная работа направлена на исследование задачи сплайновой аппроксимации данных в условиях неопределенности на основе параметризации управления и алгоритма метода проекции градиента.

2. Постановка задачи сплайновой аппроксимации данных

Рассмотрим задачу сплайновой аппроксимации данных, если входные данные представляют собой зафиксированные значения функции в конкретные моменты времени с применением метода интерполяции сплайнами [13].

Пусть $D = \{(t_i, \alpha_i) : i = 1, \dots, n\}$ – набор данных в момент времени t_i и значением α_i , а $F = \{f \in C^2[0, T] | f(t_i) = \alpha_i\}$ – множество дважды непрерывно дифференцируемых функций, которые интерполируют данные.

Краткие сообщения

Рассмотрим задачу сплайновой аппроксимации данных:

$$\min_{f \in L_2[0, T]} \int_0^T u(t)^2 dt + \lambda \sum_{i=1}^N (y(t_i) - \eta_i)^2, \quad (1)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t), \quad (2)$$

$$x(0) = x_0, \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (4)$$

Пусть $f: [0, T] \rightarrow R^m$ – функция, которую необходимо аппроксимировать. После проведения эксперимента данные измерений $f(t)$ при t_1, \dots, t_N могут отличаться от реальных значений из-за шума или погрешности измерения. Тогда значения измерений в каждый момент времени имеют вид

$$\beta_i = f(t_i) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

где $\varepsilon_i = [\varepsilon_1^i, \dots, \varepsilon_m^i]$ – случайные отклонения, генерируемые наложенным шумом и соответствующей ошибкой измерения. Предположим, что средние значения, дисперсии и третьи моменты известны.

Оптимизируемая функция примет вид

$$g(x_0, u) = \sum_{i=1}^N w_i \|y(t_i) - \beta_i\|^2 + \lambda \int_0^T \|u(t)\|^2 dt, \quad (6)$$

где $w_i, i = 1, \dots, N$ – весовые коэффициенты, λ – константа для регулирования гладкости кривой аппроксимации $x(t | x_0, u)$, $\|\cdot\|$ – Евклидова норма.

Так как функция $g(x_0, u)$ содержит случайные значения, то преобразуем ее к детерминированной с помощью выпуклой комбинации среднего значения и дисперсии данной функции.

Таким образом, задача состоит в отыскании начального условия $x_0 \in X$ и управляющей функции $u(t) \in U$ для целевого функционала

$$\hat{G}(x_0, u) = \alpha M\{g(x_0, u)\} + (1 - \alpha) Var\{g(x_0, u)\}, \quad (7)$$

минимизируемого по $x_0 \in X$ и $u(t) \in U$, где $M\{\cdot\}$ – математическое ожидание, $Var\{\cdot\}$ – дисперсия, а $\alpha \in [0, 1]$ – весовой коэффициент.

Функцию $\hat{G}(x_0, u)$ можно преобразовать в детерминированную и задача ОУ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \hat{G}(x_0, u) = & \alpha \left\{ \sum_{i=1}^N w_i (y(t_i))^T y(t_i) - 2 \sum_{i=1}^N w_i (y(t_i))^T M\{\beta_i\} + \sum_{i=1}^N w_i M\{(\beta_i)^T \beta_i\} + \lambda \int_0^T \|u(t)\|^2 dt \right\} + \\ & + (1 - \alpha) \left\{ 4 \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N (y(t_i))^T Cov\{(\beta_i)^T \beta_l\} y(t_l) + Var\left\{ \sum_{i=1}^N w_i (\beta_i)^T \beta_i \right\} - \right. \\ & \left. - 4 \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N 1^m Cov\{(\beta_i)^2, \beta_l\} y(t_l) \right\}, \quad (8) \end{aligned}$$

где $u(t): [0, T] \rightarrow U$ – функция управления, где U – компактное выпуклое множество в R^r , $y(t) \in R^m$ – результирующая функция, а $x_0 \in X$ – неизвестное начальное состояние, где X является компактным подмножеством R^n .

Подход к параметризации управления является наиболее распространенным для решения задачи ОУ общего вида. В этом случае временной интервал разбивается на несколько частей и на каждом строится кусочно-постоянная функция управления с возможными точками разрыва первого рода в точках разбиения интервала.

Используя данную схему аппроксимации, формируют конечномерную задачу аппроксимации исходной ОУ, которая соответствует задаче выбора оптимального параметра.

3. Методы решения задачи сплайновой аппроксимации данных

Для численного решения задачи (2)–(4), (8) представим управление кусочно-постоянной функцией с конечным числом переключений методом параметризации управления.

Для каждого $i=1, \dots, N+1$ разобьем интервал $[t_{i-1}, t_i]$ на p_i подинтервалов, а граничные точки обозначим как τ_j^i , где $j=1, \dots, p_i-1$.

Последовательность $[\tau_{j-1}^i, \tau_j^i)$, $i=1, \dots, N+1$; $j=1, \dots, p_i$ называется разделом временного горизонта, а $\tau^{M-1} = [\tau_1^1, \dots, \tau_{p_{N+1}-1}^{N+1}] \in R^{M-1}$ – вектором допустимого времени переключения при

$$M = \sum_{i=1}^{N+1} p_i.$$

Для некоторого управления $\mathbf{u}(t) \in U$ определим конечномерное приближение

$$\mathbf{u}(t) \approx \mathbf{u}^M(t) = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^{p_i} \gamma^{\zeta_j^i} \chi_{[\tau_{j-1}^i, \tau_j^i)}(t), t \in [0, T], \quad (9)$$

где $\zeta_j^i = \sum_{l=1}^{i-1} p_l + j$ – метка подинтервала, $\gamma^i = [\gamma_1^i, \dots, \gamma_r^i]^T \in R^r$, $\gamma_l^i \in U$, $l=1, \dots, r$ – допустимый

вектор управления и $\chi_l(t)$ – индикаторная функция вида

$$\chi_l(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \in I, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

При подстановке приближения (9) в уравнение (2) получим систему, которая определена на подинтервале $[\tau_{j-1}^i, \tau_j^i)$:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = A\mathbf{x}(t) + B\gamma^{\zeta_j^i}, \quad (10)$$

$$\mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t). \quad (11)$$

Детерминированная задача выбора оптимального параметра

Для динамической системы (10)–(11) найти $\mathbf{x}_0 \in X$ и $\gamma \in \Gamma$, соответствующие минимуму функции:

$$\begin{aligned} \hat{G}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}) = & \alpha \left\{ \sum_{i=1}^N w_i (\mathbf{y}(t_i))^T \mathbf{y}(t_i) - 2 \sum_{i=1}^N w_i (\mathbf{y}(t_i))^T M \{\beta_i\} + \sum_{i=1}^N w_i M \{(\beta_i)^T \beta_i\} + \lambda \int_0^T \|\mathbf{u}(t)\|^2 dt \right\} + \\ & + (1 - \alpha) \left\{ 4 \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N (\mathbf{y}(t_i))^T \text{Cov} \{(\beta_i)^T \beta_l\} \mathbf{y}(t_l) + \text{Var} \left\{ \sum_{i=1}^N w_i (\beta_i)^T \beta_i \right\} - \right. \\ & \left. - 4 \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^N 1^m \text{Cov} \{(\beta_i)^2, \beta_l\} \mathbf{y}(t_l) \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

Метод проекции градиента

Для решения поставленной задачи (12) в рамках данной работы рассмотрен алгоритм метода проекции градиента [14, 15], основная идея которого состоит в поиске экстремума функции в направлении антиградиента функции. В данной работе антиградиент функции сформирован таким образом, чтобы выполнялось свойство допустимости значений траектории движения.

4. Вычислительные эксперименты

В рамках данной статьи рассмотрено исследование параметров численного решения задачи сплайновой аппроксимации данных при различных весовых коэффициентах между математическим ожиданием и дисперсией исходной функции, а также различных подходах к наложению шума на аппроксимируемые данные.

Краткие сообщения

Для проведения численных экспериментов были зафиксированы следующие параметры задачи: $A=1,8$, $B=0,2$, $C=2$, $q=10\,000$, $x_0=-0,5$, $u=0,5$, $M(\beta_i)=-0,528$, $Var(\beta_i)=3,4483$, $\alpha=0,5$, $p_i=100$.

Исходные данные содержат 10^6 измерений, имеющие нормальный закон распределения, и с наложенным шумом в виде функции $f(t)$:

$$f(t) = \begin{cases} -0,2074x^2 + 0,5584x - 0,2321, & \text{if } t \in [0; 0,5713], \\ 0,02x^3 - 0,224x^2 + 0,562x - 0,2323, & \text{if } t \in [0,5713; 7,8013], \\ 0,2815x^2 - 3,7729x + 12,137, & \text{if } t \in [7,8013; 10]. \end{cases} \quad (13)$$

Отметим, что погрешности полученных значений $\max(y(t_i) - C * f(t_i)) = 0,074$, $\max(x(t_i) - f(t_i)) = 0,037$ первого порядка и соответствуют устойчивой модели с достаточно высокой точностью.

Проведём исследование влияния параметра весового коэффициента α между математическим ожиданием и дисперсией исходной функции при следующих значениях $\alpha = 0,2; 0,5; 0,7$ (рис. 1, 2).

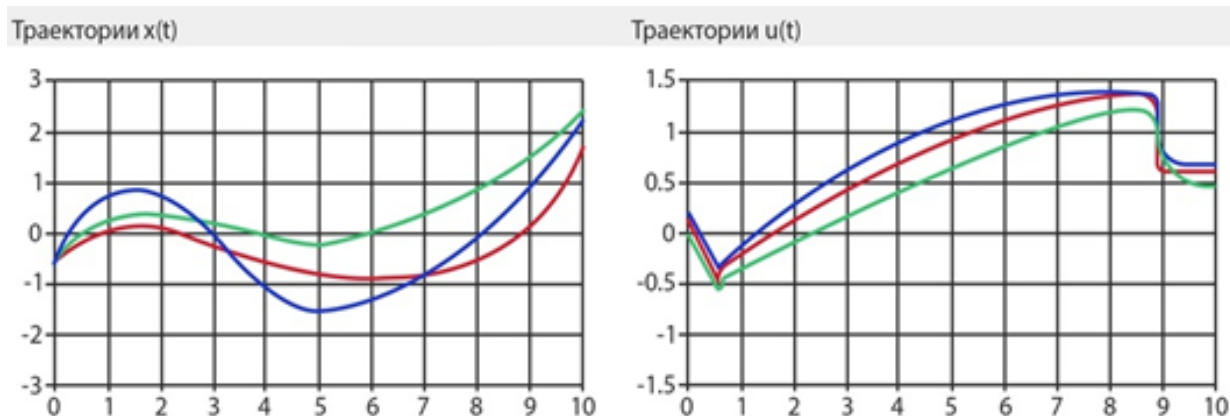


Рис. 1. Траектория $x(t)$ и управление $u(t)$ при различных значениях весового коэффициента α
 Fig. 1. Trajectory $x(t)$ and control $u(t)$ at different values of the weight coefficient α

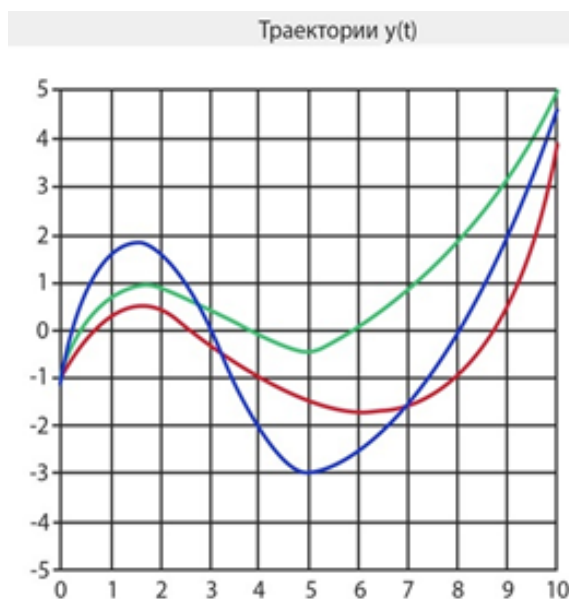


Рис. 2. Траектория $y(t)$ при различных значениях весового коэффициента α
 Fig. 2. Trajectory $y(t)$ at different values of the weight coefficient α




Результаты исследования влияния параметра весового коэффициента α на аппроксимационную функцию представлены в табл. 1 с указанием количества итераций и погрешностей.

Таблица 1

Результаты исследования параметра α

Table 1

Results of the study of the parameter α

α	 0,2	 0,5	 0,8
J	34,02	1,2	0,34
$Count$	11 235	13 101	12 540
$\frac{\sum_{i=1}^N (x(t_i) - f(t_i))}{N}$	0,068	0,037	0,021
$\frac{\sum_{i=1}^N (y(t_i) - f(t_i))}{N}$	0,079	0,044	0,027

При увеличении α значения $x(t_i)$ и $y(t_i)$ имеют большее отклонение к реальным значениям набора данных. Однако данное поведение сопровождается сильным искривлением графиков, что соответствует уровню гладкости второй производной функции $y(t_i)$. При этом погрешность снижается, а точность решения значительно увеличивается.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при $\alpha = 0,5$ решение задачи соответствует достаточно высокой точности и не имеет больших потерь в гладкости функций.

Исследование влияния закона распределения шумов

Исследуем влияние закона распределения шумов, накладываемых на исходную функцию, на точность и скорость сходимости данного метода. Рассмотрим следующие законы распределения накладываемых шумов: нормальный, экспоненциальный и равномерный. Зафиксируем параметры для каждого закона распределения.

Нормальный закон распределения шумов:

$$\beta_i = (t_i) + \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(t_i-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad i=1, \dots, N, \quad \mu=5, \quad \sigma^2=0,0001. \quad (14)$$

Равномерный закон распределения шумов:

$$\beta_i = f(t_i) + \begin{cases} 0, & t_i < a, \\ \frac{t_i - a}{b - a} * 3, & a \leq t_i \leq b, \quad i=1, \dots, N, \quad a=0, \quad b=10. \\ 0, & t_i > b. \end{cases} \quad (15)$$

Экспоненциальный закон распределения шумов:

$$\beta_i = f(t_i) + \begin{cases} 0, & t_i < 0, \\ 1 - e^{-\lambda t_i}, & t_i \geq 0, \quad i=1, \dots, N, \quad \lambda=3. \end{cases} \quad (16)$$

На рис. 3, 4 представлены графики $x(t)$ и $u(t)$, полученные при наложении шумов с разными законами распределения.

Результаты исследования влияния закона распределения шумов на аппроксимационную функцию представлены в табл. 2 с указанием количества итераций и погрешностей.

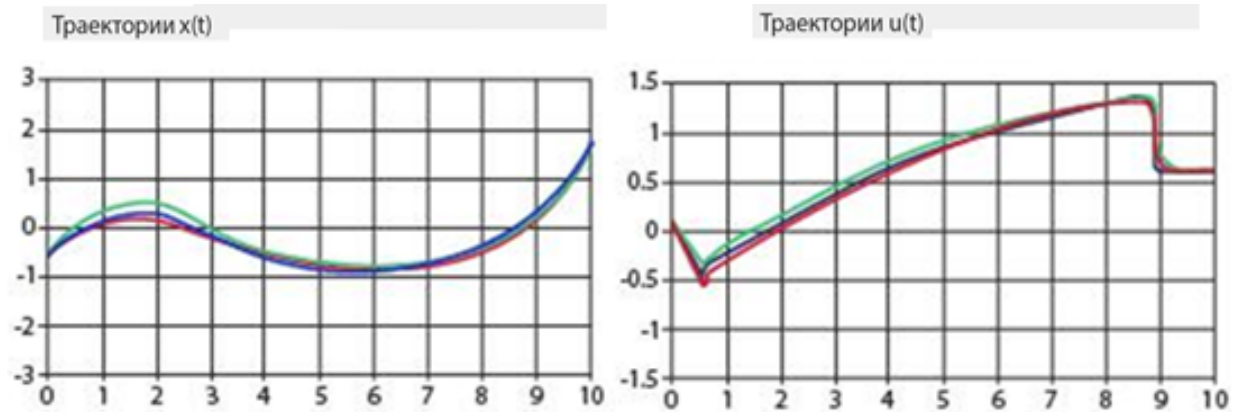


Рис. 3. Траектория $x(t)$ и управление $u(t)$ при различных законах распределения шумов
 Fig. 3. Trajectory $x(t)$ and control $u(t)$ under different noise distribution laws

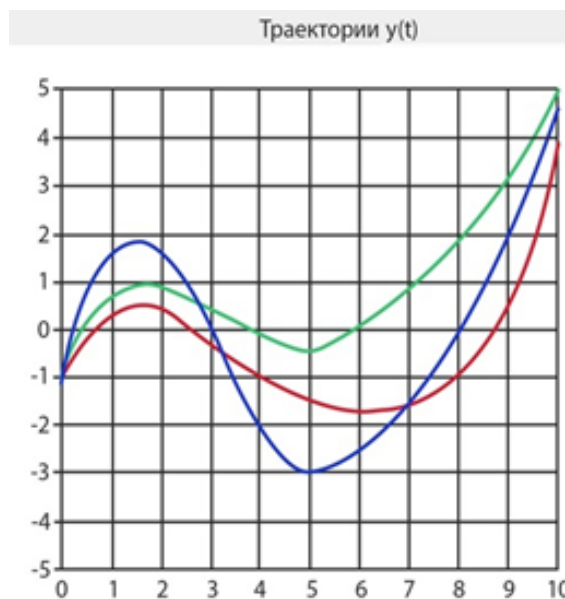


Рис. 4. Траектория $y(t)$ при различных законах распределения шумов
 Fig. 4. Trajectory $y(t)$ under different noise distribution laws

Результаты анализа изменения закона распределения шумов
 Results of the analysis of changes in the noise distribution law

Таблица 2

Table 2

Закон распределения	Экспоненциальный	Нормальный	Равномерный
J	0,61	0,58	0,563
$Count$	12 351	11 927	11 468
$\frac{\sum_{i=1}^N (x(t_i) - f(t_i))}{N}$	0,031	0,024	0,021
$\frac{\sum_{i=1}^N (y(t_i) - f(t_i))}{N}$	0,06	0,049	0,044

Результаты исследования показали, что различные законы распределения шумов не оказывают сильного воздействия на сходимость метода и количество итераций варьируется не значительно. Таким образом, при равномерном распределении шумов на исходных данных значения погрешностей найденных траекторий сравнительно ниже, чем при иных законах.

При задании параметра α с потерей гладкости, но с повышением точности аппроксимации произойдет изменение порядка ранжирования законов распределения шумов.

Данные результаты свидетельствуют об устойчивости предлагаемого подхода к подбору начальных условий. В частности, весовой коэффициент α регулирует гладкость функции и точность аппроксимации. При этом закон распределения шумов на исходных данных не влияет в должной степени на точность данного подхода и свидетельствует об устойчивости модели и пригодности метода при ограниченных знаниях о шумах.

Заключение

В рамках данного исследования решена задача сплайновой аппроксимации данных в условиях неопределённости. Для применения параметризации управления представлена стохастическая функция, в дальнейшем преобразованная в детерминированную. На основе метода параметризации управления сформирована последовательность приближенного оптимального управления.

С использованием численного метода проекции градиента разработано программное обеспечение для решения задачи сплайновой аппроксимации на зашумленных данных.

Результаты численных экспериментов исследования параметров модели показали, что повышение значений весового коэффициента α при математическом ожидании искомой функции приводит к повышению точности, однако решение в некоторой степени теряет гладкость. Кроме того, проведенный анализ показал, что изученный закон распределения шумов не влияет в должной степени на точность данного подхода и свидетельствует об устойчивости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-01065, а также гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-2502.2020.9).

Литература

1. Lai, M.J. Scattered data interpolation with nonnegative preservation using bivariate splines and its application / M.J. Lai, C. Meile // *Computer Aided Geometric Design*. – 2015. – Vol. 34. – P. 37–49. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.02.004
2. A comparative study on application of Chebyshev and spline methods for geometrically nonlinear analysis of truss structures / S.H. Mahdavi, H.A. Razak, S. Shojaee, M.S. Mahdavi // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2015. – Vol. 101. – P. 241–251. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.08.001
3. Inversion of top of atmospheric reflectance values by conic multivariate adaptive regression splines / S. Kuter, G.W. Weber, Z. Akyürek, A. Özmen // *Inverse Problems in Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 23, iss. 4. – P. 651–669. DOI: 10.1080/17415977.2014.933828
4. Agwu, N.N. Optimal control of dynamic systems: application to spline approximations / N.N. Agwu, C.F. Martin // *Applied Mathematics and Computation*. – 1998. – Vol. 97, iss. 2. – P. 99–138. DOI: 10.1016/S0096-3003(97)10101-1
5. Burt, P.J. A multiresolution spline with application to image mosaics / P.J. Burt, E.H. Adelson // *ACM Transactions on Graphics*. – 1983. – Vol. 2, iss. 4. – P. 217–236. DOI: 10.1145/245.247
6. A Distributionally robust linear receiver design for multi-access space-time block coded MIMO systems / B. Li, Y. Rong, J. Sun, K.L. Teo // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. – 2016. – Vol. 16, iss. 1. – P. 464–474. DOI: 10.1109/TWC.2016.2625246
7. Some characterizations of robust optimal solutions for uncertain fractional optimization and applications / X.K. Sun, X.J. Long, H.Y. Fu, X.B. Li // *Journal of Industrial & Management Optimization*. – 2017. – Vol. 13, iss. 2. – pp. 803–824. DOI: 10.3934/jimo.2016047
8. Wang, J. Data-driven tight frame for multi-channel images and its application to joint color-depth image reconstruction / J. Wang, J.F. Cai // *Journal of the Operations Research Society of China*. – 2015. – Vol. 3. – P. 99–115. DOI: 10.1007/s40305-015-0074-2

9. Yan, H.Y. *A linear-quadratic control problem of uncertain discrete-time switched systems* / H.Y. Yan, Y. Sun, Y.G. Zhu // *Journal of Industrial & Management Optimization*. – 2017. – Vol. 13, iss. 1. – P. 267–282. DOI: 10.3934/jimo.2016016
10. *A sequential regression model for big data with attributive explanatory variables* / Q.T. Zhang, Y. Liu, W. Zhou, Z.W. Yang // *Journal of the Operations Research Society of China*. – 2015. – Vol. 3. – P. 475–488. DOI: 10.1007/s40305-015-0109-8
11. Friedman, J.H. *Multivariate adaptive regression splines* / J.H. Friedman // *The Annals of Statistics*. – 1991. – Vol. 19, iss. 1. – P. 1–141. DOI: 10.1214/aos/1176347963
12. Taylan, P. *New approaches to regression by generalized additive models and continuous optimization for modern applications in finance, science and technology* / P. Taylan, G.W. Weber, A. Beck // *Optimization* – 2007. – Vol. 56, iss. 6. – P. 675–698. DOI: 10.1080/02331930701618740
13. Исаков, В.Н. *Оптимальная регулярная локальная сплайновая интерполяция сигналов* / В.Н. Исаков // *Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей*. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 24–31. DOI: 10.38013/2542-0542-2016-4-24-31
14. Новиков, М. Ю. *Конечномерная оптимизация. Алгоритм метода проекции градиента* / М.Ю. Новиков // *Устойчивое развитие российских регионов: экономическая политика в условиях внешних и внутренних шоков: сб. науч. тр.* – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 781–785.
15. Голубев, М.О. *Метод проекции градиента для сильно выпуклого множества* / М.О. Голубев // *Известия Саратовского университета. Серия Математика. Механика. Информатика*. – 2013. – № 13 (2). – С. 33–38.

Болодурина Ирина Павловна, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; prmat@mail.osu.ru.

Гришина Любовь Сергеевна, аспирант кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; grishina_ls@inbox.ru.

Анциферова Лариса Михайловна, канд. пед. наук, доцент кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург; antsiferova_68@mail.ru.

Поступила в редакцию 21 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210314

INVESTIGATION OF PARAMETERS OF THE PROBLEM OF SPLINE APPROXIMATION OF NOISY DATA BY NUMERICAL METHODS OF OPTIMAL CONTROL

I.P. Bolodurina, prmat@mail.osu.ru,

L.S. Grishina, grishina_ls@inbox.ru,

L.M. Antsiferova, antsiferova_68@mail.ru

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Currently, the problems of distortion of measurement data by noise and the appearance of uncertainties in quality criteria have caused increased interest in research in the field of spline approximation. At the same time, existing methods of minimizing empirical risk, assuming that the noise is a uniform distribution with heavier tails than Gaussian, limit the scope of application of these studies. The problem of estimating noise-distorted data is usually based on solving an optimization problem with a function containing uncertainty arising from the problem of finding optimal parameters. In this regard, the estimation of distorted noise cannot be solved by classical methods. **Aim.** This study is aimed at solving and analyzing the problem of spline approximation

of data under uncertainty conditions based on the parametrization of control and the gradient projection algorithm. **Methods.** The study of the problem of spline approximation of noisy data is carried out by the method of approximation of the piecewise constant control function. In this case, parametrization of the control is possible only for a finite number of break points of the first kind. In the framework of the experimental study, the gradient projection algorithm is used for the numerical solution of the spline approximation problem. The proposed methods are used to study the parameters of the problem of spline approximation of data under conditions of uncertainty. **Results.** The numerical study of the control parametrization approach and the gradient projection algorithm is based on the developed software and algorithmic tool for solving the problem of the spline approximation model under uncertainty. To evaluate the noise-distorted data, numerical experiments were conducted to study the model parameters and it was found that increasing the value of the parameter α leads to an increase in accuracy, but a loss of smoothness. In addition, the analysis showed that the considered distribution laws did not change the accuracy and convergence rate of the algorithm. **Conclusion.** The proposed approach for solving the problem of spline approximation under uncertainty conditions allows us to determine the problems of distortion of measurement data by noise and the appearance of uncertainties in the quality criteria. The study of the model parameters showed that the constructed system is stable to the error of the initial approximation, and the distribution laws do not significantly affect the accuracy and convergence of the gradient projection method.

Keywords: citation system, scientometric methods, aggregation of bibliographic information, modification of the Winoing method, Levenshtein method, shingle method.

References

1. Lai M.J., Meile C. Scattered data interpolation with nonnegative preservation using bivariate splines and its application *Computer Aided Geometric Design*, 2015, vol. 34, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.cagd.2015.02.004
2. Mahdavi S.H., Razak H.A., Shojaee S., Mahdavi M.S. A comparative study on application of Chebyshev and spline methods for geometrically non-linear analysis of truss structures *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, vol. 101, pp. 241–251. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.08.001
3. Kuter S., Weber G.W., Akyürek Z., Özmen A. Inversion of top of atmospheric reflectance values by conic multivariate adaptive regression splines *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2015, vol. 23, iss. 4, pp. 651–669. DOI: 10.1080/17415977.2014.933828
4. Agwu N.N., Martin C.F. Optimal control of dynamic systems: application to spline approximations *Applied Mathematics and Computation*, 1998, vol. 97, iss. 2, pp. 99–138. DOI: 10.1016/S0096-3003(97)10101-1
5. Burt P.J., Adelson E.H. A multiresolution spline with application to image mosaics *ACM Transactions on Graphics*, 1983, vol. 2, iss. 4, pp. 217–236. DOI: 10.1145/245.247
6. Li B., Rong Y., Sun J., Teo K.L. A Distributionally robust linear receiver design for multi-access space-time block coded MIMO systems *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, vol. 16, iss. 1, pp. 464–474. DOI: 10.1109/TWC.2016.2625246
7. Sun X.K., Long X.J., Fu H.Y., Li X.B. Some characterizations of robust optimal solutions for uncertain fractional optimization and applications *Journal of Industrial & Management Optimization*, 2017, vol. 13, iss. 2, pp. 803–824. DOI: 10.3934/jimo.2016047
8. Wang J., Cai J.F. Data-driven tight frame for multi-channel images and its application to joint color-depth image reconstruction *Journal of the Operations Research Society of China*, 2015, vol. 3, pp. 99–115. DOI: 10.1007/s40305-015-0074-2
9. Yan H.Y., Sun Y., Zhu Y.G. A linear-quadratic control problem of uncertain discrete-time switched systems *Journal of Industrial & Management Optimization*, 2017, vol. 13, iss. 1, pp. 267–282. DOI: 10.3934/jimo.2016016
10. Zhang Q.T., Liu Y., Zhou W., Yang Z.W. A sequential regression model for big data with attributive explanatory variables *Journal of the Operations Research Society of China*, 2015, vol. 3, pp. 475–488. DOI: 10.1007/s40305-015-0109-8
11. Friedman J.H. Multivariate adaptive regression splines *The Annals of Statistics*, 1991, vol. 19, iss. 1, pp. 1–141. DOI: 10.1214/aos/1176347963

Краткие сообщения

12. Taylan P., Weber G.W., Beck A. New approaches to regression by generalized additive models and continuous optimization for modern applications in finance, science and technology *Optimization*, 2007, vol. 56, iss. 6, pp. 675–698. DOI: 10.1080/02331930701618740

13. Isakov V.N. [Optimal regular local spline signal interpolation]. *Bulletin of Koncern VKO Almaz-Antey*, 2016, vol. 19, no. 4. – pp. 24–31. (in Russ.)

14. Novikov M.Yu. [Finite-dimensional optimization. Algorithm of the gradient projection method]. *Ustoychivoye razvitiye rossiyskikh regionov: ekonomicheskaya politika v usloviyakh vneshnikh i vnutrennikh shokov: sb. nauch. tr.* [Sustainable development of Russian Regions: Economic Policy in the conditions of external and internal shocks: collection of scientific papers], Yekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2015, pp. 781–785. (in Russ.)

15. Golubev M.O. [The gradient projection method for a strongly convex set]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 33–38. (in Russ.)

Received 21 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Болодурина, И.П. Исследование параметров задачи сплайновой аппроксимации зашумленных данных численными методами оптимального управления / И.П. Болодурина, Л.С. Гришина, Л.М. Анциферова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 138–148. DOI: 10.14529/ctcr210314

FOR CITATION

Bolodurina I.P., Grishina L.S., Antsiferova L.M. Investigation of Parameters of the Problem of Spline Approximation of Noisy Data by Numerical Methods of Optimal Control. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 138–148. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210314

REQUIREMENTS FOR DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS TO SUPPORT SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL ACTIVITIES

S.K. Serikbayeva¹, J.A. Tussupov¹, M.A. Sambetbayeva^{1, 2}, J.K. Serikbayeva³

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan,

² Institute of Information and Computational Technologies CS MES RK, Almaty, Republic of Kazakhstan,

³ Educational and Methodological Center for the Development of Education of the Karaganda Region, Karaganda, Republic of Kazakhstan

To increase the effectiveness of research, it is necessary to have access to systematic information resources of scientific work. Therefore, in any field of science, it begins with research, the search for scientific information, but with the growing number of scientific articles, books, monographs, patents, the search for information becomes more and more difficult. Creating a unified information system that allows scientists to quickly get acquainted with the results of other scientific research and prevent their duplication. The main tasks of creating a model of a distributed information system that supports scientific and educational activities, the functional capabilities of the model, the concept of metadata, and the requirements for the metadata profile are described. The task, subject area, subjects, objects, the main functionality of the information system are defined, a list of the main types of information resources is provided. The paper analyzes the functional requirements for such systems. **Purpose.** In the process of creating distributed information systems that support scientific and educational activities, it is necessary to study the requirements imposed on the information system. **Methods.** The article discusses in detail technological methods for constructing models of information systems for supporting scientific and educational activities. **Results.** Using the requirements, models, metadata of a distributed information system supporting scientific and educational activities, the architecture of the information system was developed and a scheme for exchanging information in the information system through information protocols was presented. **Conclusion.** The article discusses technological methods of a distributed information system that supports scientific and educational activities. The main tasks for building a model of a distributed information system supporting scientific and educational activities, ensuring the functional functioning of the model, the concept of metadata for this system, and the requirements for the metadata profile are described. Based on the proposed requirements, the architecture of a distributed information system supporting scientific and educational activities has been developed and the structure has been clearly described.

Keywords: distributed information system, electronic library, scientific and educational activities, metadata, functional requirements, Z39.50, LDAP, PostgreSQL, Solr.

Introduction

In recent years, high technologies in the field of information transmission and processing have been rapidly developing, in particular, the creation of modern telecommunications systems has led to the emergence of new opportunities for organizing all levels of scientific and educational activities, which has led to a qualitative increase in the needs of information systems supporting scientific and educational activities [1].

Distributed information systems that support scientific and educational activities can work with various information systems. The main goal of creating a distributed information system supporting scientific and educational activities is to accelerate the pace and improve the quality of information exchange in the scientific environment. One of the most pressing issues is the division of the unified compatibility of the information system and the work on the systematization of information resources into professional areas. These can be scientific articles, scientific documents, electronic collections, ontological descriptions, data sets, logical descriptions, and so on. Semantic connections between information resources increase their value and provide additional opportunities for searching and identifying information [2].

The paper considers technological methods for constructing models of information systems designed to support scientific and educational activities. The model under consideration is that the developed model of an information system for working with scientific materials should solve the problems of long-term storage of information, organizing data search by attributes, accumulating and replacing metadata.

Model of a distributed information system that supports scientific and educational activities

The rapid development of global information and computing systems leads to a change in the fundamental paradigms of data processing, which is characterized as the transition to the use and development of distributed information resources [3]. Therefore, the most important goal associated with the technology of working with information is to study approaches to the compatibility of distributed data sources.

Compatibility of information resources refers to the presentation of them depending on the purpose of their use, the storage of various information in their composition, and the provision of user-friendly interfaces. At the same time, resource aggregation should not be carried out physically. The main thing is that it provides the user with the information available in a single way. In particular, regardless of the specifics of access to information systems in electronic libraries, it is necessary to ensure the operation of heterogeneous databases or data, ensuring the effectiveness of the user in searching for Information [4].

An urgent problem is the creation of a model of a distributed information system that supports scientific and educational activities:

- Unification of efforts to exchange the results of scientific work;
- Work with data and documents integrated into an open semantic space;
- Description, presentation, and conversion of resources in accordance with the user's needs.

The model should provide the following functions:

- It is necessary to describe the article resources, including registration procedures, annotation procedures and steps for determining the format;
- Analytical analysis of resources;
- Access to published resources;
- Monitoring the automated system of resources and updating their metasispatas;
- Notify the user of the appearance and update of new resources.

Select metadata profile

Due to the large amount of scientific data in the internet, the problem of document search is at the forefront, and metadata can be used to systematize it.

Metadata is an effective tool for describing information objects. Meteors have a special character in relation to the field of resource use. Metadata can describe objects in the information space and in relation to the real world. Metadata of information resources can be stored separately (Fig. 1) [5].

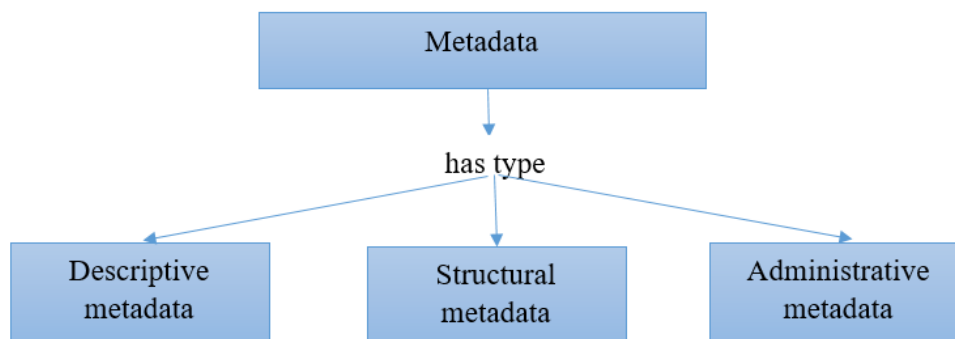


Fig. 1. Metadata structure

Metadata can provide a description of additional information about the document. For example, you can see the author, title, short abstract, and so on.

Metadata – data about data – data describing entities presented in information systems are the characteristics of the entities described for the purposes of their identification, search, evaluation and management.

Metadata is structured information that describes, explains, and indicates the location of an information resource.

Different approaches to metadata classification are possible. Metadata classifications have the right to exist according to their functions, according to the levels of semantic abstraction, according to their properties, according to the levels of information architecture to which the described resources belong, as well as according to a number of other criteria [6].

The main types of metadata:

Descriptive metadata-metadata describes the content of a resource (for example, it is a set of values of metadata elements of the Dublin Core), its bibliographic data (if it is a publication), annotation, resource identifiers (for example, URI or DOI, etc.);

Structural metadata – metadata characterizes the overall structure of the resource and its components, the volume and other similar properties of the described resource;

Administrative metadata – serves for the management and administration of electronic collections and other information resources.

A special type of data is an identifier, whose task is to unambiguously represent a digital object for the outside world and various applications.

The main catalog of information resources of the information system metadata server is built in accordance with the Dublin Core metadata scheme. The developed scheme takes into account the main requirements of this standard, and the metadata scheme is also expanded according to GOST 7.19 (MEKOF).

The term “metadata schema” is widely used in the literature and, in fact, is synonymous with the term “set of metadata elements”. A metadata schema is a set of metadata elements, each of which has a certain name and semantics, takes values with established semantics, sometimes values from a managed dictionary. According to the recommendations of Dublin Core, an information object should have a basic set of attributes. The set of attributes of an object is expanded depending on its type.

Metadata performs many functions in the systems that use it. Their specific functions and composition significantly depend on the information technologies on which the system is based, on its functionality, the properties of the information resources supported in it, the ways of their organization in the system, the specifics of their processing tasks, and on many other factors [7].

Metadata is necessary for solving the following tasks:

- providing information about an object to obtain its content, structure, methods of use, etc.;
- collecting and systematizing information about objects of description;
- selection from a set of objects of a certain subset by formal characteristics and comparison of objects by formal characteristics;
- internal technological tasks related to the preparation of objects, the placement of objects in the information fund, etc.;
- external technological tasks related primarily to the exchange of data with external information systems.

The implementation of subsystems of information systems should be based on open specifications related to international standards. Distributed information should be data synchronization in the system environment, for example, it should be distributed in the form of replication (Fig. 2). In addition, standard protocols such as OAI-RMN, OAI-ORE, SRW/SRU, Z39.50, and LDAP should provide cross-network interaction.

Metadata is needed to solve the following problems:

- Providing information about the content, structure, application methods, etc. of the document;
- Systematization and classification of needs;
- Stage of organization of subsystems;
- Support the exchange of external information systems.

Metadata is divided into several classes: descriptive, structural, and administrative.

Descriptive metadata-describes the content of information resources, for example, a set of values of metadata elements of the Dublin core Dublin Core, if it contains articles bibliographic Data, Annotations, resource IDs, etc.

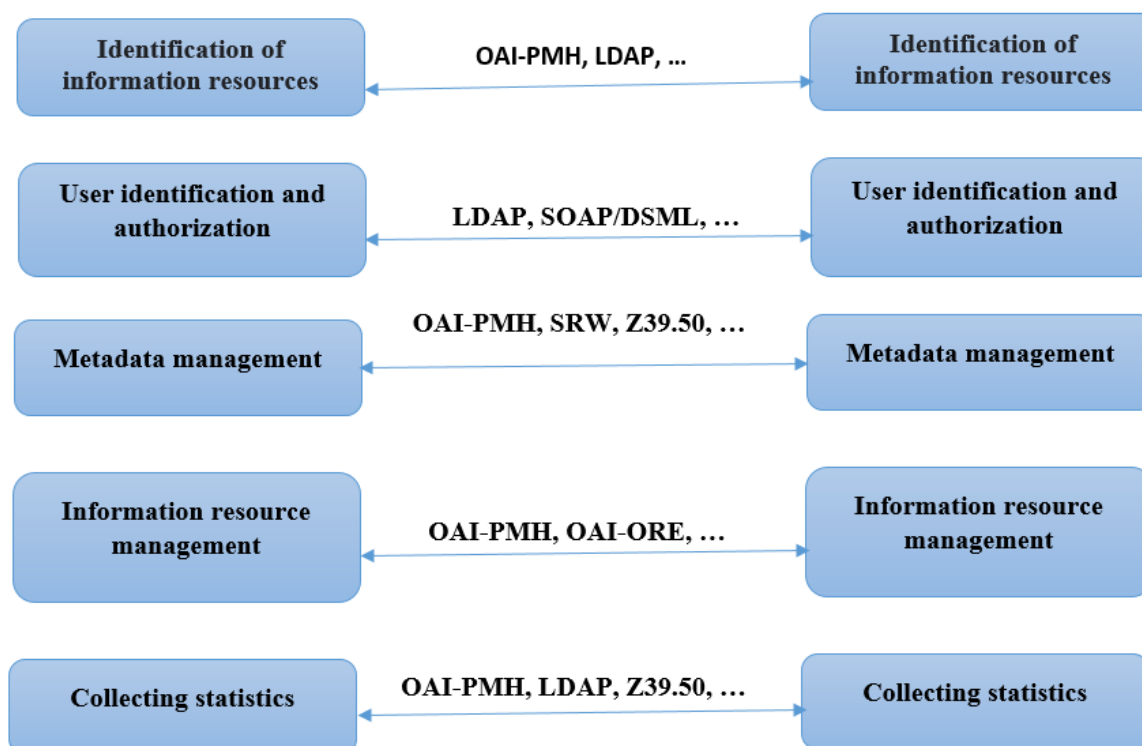


Fig. 2. Protocol of mutual network communication of subsystems of distributed information systems

Structured metadata-describes the overall structure of a resource and its structure, resource size, and other similar properties.

Administrative metadata-describes the date of creation of the resource, who created or changed it, who is the rightholder of resus, user access Authority, data on storage and copies of resources, and resource management data.

For complex search and classification functions for information by attributes, full-text search, it is necessary to provide the ability to view resources by category and dictionary classifiers. Due to insufficient interaction issues at the stage of developing their characteristics: agreements and recommendations for standardization of submitted documents, tools for harmonization of various information resources are poorly used. Interaction of Information Systems is understood as the degree of its ability to interact with other information systems, including people. But if the main burden of achieving mutual understanding in human communication (as in Information Systems) lies with the latter, which can handle poorly organized information, then it is necessary to ensure effective interaction between the correct, special technological methods of Information Systems, and general agreements are required. All this data creates the need to maintain compliance of schematic interfaces and protocols with international standards and recommendations.

The standard application profile is developed on the basis of specific groups or functional tasks of users. This means that it optimizes the creation of metadata processing systems. Metadata profile the label can define the selected standard classes, subsets, additional features, and parameters required to perform a single function [8].

In the field of metadata for articles, it is necessary to have a list of specialized elements of special resources, to set dictionaries to describe the values of elements that complement or expand the set of values allowed in accordance with the standard. In addition, additional characteristics of the elements can be presented.

The basis for the development of a scientific system are standards and international recommendations that form the profile of the scientific and educational system, which are aimed at solving certain requirements, the classes of standards necessary for performing specific functions are selected, represent a set of one or more basic regulatory and technical documents indicating their subsets and options. The metadata profile is the most important in the information system turnover [9].

The metadata profile must meet the following requirements:

- Providing a description of the main types of necessary information supporting scientific and educational activities;
- Ensure that access is open in accordance with the metadata description;
- Provide the ability to specify extended characteristics;
- Integration of information and ensuring information compatibility;
- Ensuring sorting, systematization and classification of information;
- Providing opportunities for placement and search of information in a distributed environment, interaction with other systems;
- Description of information and emphasis on the use of modern technologies [10].

Requirements for distributed information systems that support scientific and educational activities

High requirements are placed on many Information Systems: ease of Use and ease of learning for the user; on the technical side – compatibility with various information systems and ensuring interaction with standard protocols.

In the process of working with scientific documents, several requirements are formulated. It is possible to identify several sets of functional requirements that support scientific and educational activities [11].

1. Accumulation of Information Resources. Collecting information it is necessary to use different types of data input:

- enter user data;
- data collection through special internet programs;
- exchange of data from other information resources.

2. Relevance of documents. For a distributed information system that supports scientific and educational activities, automatic accumulation of information on the internet can be both important and irrelevant. Therefore, the problem can be solved in the following ways:

- creation of basic systematized formats for providing metadata about resources and structured definitions for classifying topics. It is necessary to describe the metadata of distributed information systems supporting scientific and educational activities and provide users with interactive web pages to create metadata in a certain format when placing resources;
- distribution of information resources by users and experts depending on the version of access to the Web page system, as well as increasing the degree of reliability of information;
- specify the search and classification space for information retrieval tools, as well as criteria for evaluating the quality of information entered;
- use the resource classification scheme according to the needs of users and classify information resources according to the scheme [12].

3. Relevance, completeness, and authenticity of documents. The issues of relevance and completeness of Information documents are similar to the approaches to solving resource issues. And ways to determine the correct origin of information:

- only verified (authenticated) users can enter interactive information for input;
- setting restrictions on the scope of application of an agent performing automated information collection systems;
- conducting sorting in the process of exchanging information with resources of other imported information systems;
- it is necessary to conduct methods of verification and classification of all entered information.

4. Use of intelligent services in processing user requests. By user query processing services-must provide attribute search, Full-Text Search, Resource search by category, and semantic search (optional).

5. Knowledge output. Partial automation of knowledge extraction can be used. The main approach to the proposed text is based on the type of semantic network, and the principle of its construction is based on the use of the frequency of conjugation of concepts in the text. Network user thematic terms are presented in the form of a tree, which means that it allows the user to navigate and greatly simplifies the processes of text search and research. In addition, this approach can be used to solve such problems

as classification and clustering of abstracts, text topics, semantic search, and so on. It is necessary to consider the following requirements for a distributed information system that supports scientific and educational activities that work with various types of information.

6. Support for the architecture of decentralized information systems. This requirement is a necessary condition for the completeness, authenticity and relevance of the information. The experience of using a distributed information system that supports scientific and educational activities has shown the complexity of creating centralized scientific systems that contain scientific information in one area of science or in any other.

7. Structure of the information space. In order to use complex functions of information search and classification, in addition to storing full-text information, it is necessary to search for information by attributes, search for full-text information, view resources by categories and classification dictionaries. This situation is characterized by the degree of specialization of the system in the selection of the classifier.

8. Adaptive presentation of information. According to the requests of users of the distributed information system supporting scientific and educational activities, it is necessary to increase the speed and accuracy of information search and selection without losing the quality of information search, take into account competence, time constraints when working in the system. It should allow users of a distributed information system that supports scientific and educational activities to obtain different levels of abstraction when presenting information from a brief description to a specific description of information objects for a quick search.

9. Historicity of information. A special feature of scientific information is its rapid obsolescence and loss of relevance. For many types of information resources, it is important to keep all changes in the information in the database and the ability to restore it is necessary. For example, when changing a person's last name, place of work, information about authors may change over time. Therefore, it is necessary to use up-to-date information for subjects related to time intervals, taking into account the time factor.

10. Archive. As noted above, the relevance of most scientific information becomes obsolete. But it is necessary to provide access to information resources for a long time. For example, they may require long-term legal documents, patents, or multimedia information at any time. At the same time, scientific reports of scientists in the field of science, speeches of scientists can acquire great historical value, gaining significance over time. Therefore, it is necessary to support the possibility of long-term restoration of information resources.

11. Application of Information Classification in the search for information. In order to use complex functions for searching and classifying information, in addition to preserving full-text characteristics, it is necessary to perform attribute search, full-text search, category and word-classifier search. The degree of selection of classifiers is determined by a specialized system. For the implementation of these functions, there must be dictionary-classifiers that ensure the identification and classification of resources that support scientific and educational activities.

12. Distribution support. With the rapid growth of the development of distributed information systems supporting scientific and educational activities in the world, the following requirements are imposed:

- support for metadata standards for exporting and importing accepted data;
- support for information exchange protocols between other information systems;
- support for both user interfaces for communicating with internal resources and features at the system level [13].

In accordance with the above requirements, we will consider the technology of creating a prototype of a distributed information system that supports scientific and educational activities. The main tasks of information systems are to collect, store, process information resources, register, update and ensure the processing of user requests.

1. Accumulation and registration of Information Resources. Services for collecting and registering information resources can be carried out simultaneously. When performing the functions of collecting and registering information resources, it is necessary to solve the following tasks:

- The task of sorting data. The information system receives information from any data source, so

many of them may be redundant. As a result of sorting information, the necessary data is selected from the information set included in the system;

– The task of verifying data. Provides verification of the reliability and logical integrity of data. It is carried out on the basis of expert analysis and verification of compliance with the information entered in the database. It is carried out at the stage of preliminary information processing with the help of tools for monitoring the logical integrity of data;

– Data compression task. It is carried out in order to minimize the storage of information resources in memory, as well as reduce the cost of transmitting data through communication channels;

– The task of converting data from one format to another. Transfer of data from one information system to another is carried out when it is necessary and when data is transferred between different types of information in the system.

The implementation of these functions is based on the use of the z39.50 and LDAP protocols in solving the problems of cleaning, verifying, compressing data, and converting data from one format to another. Common databases on different systems can be found using the same local client or interface. This does not solve the problem of what the interface should look like or how it should behave, it depends on the user to choose the interface. The connection of library systems with the internet and the development of the Z39.50 protocol open the way for access to an ever-growing array of bibliographic databases and full-text databases through a local automated system. The ability to directly connect users to resources offered by various computing platforms has increased the attractiveness of the Z39.50 protocol for libraries that connect institutional systems. As a result of using this protocol, it is possible to create distributed information systems that include databases of various organizations [14].

2. Storage of Information Resources. The system provides management and data storage of distributed information systems, the structure in which various types of data are stored, their integrity and access to them.

3. Processing of Information Resources. Processing information resources stored in the database allows you to present the processed information to the user. When performing information processing functions in the system, it performs data collection, search for dictionaries and indexes.

4. Relevance of Information Resources. Allows you to describe models and support the subject area of information resources in Information Systems. It is necessary to increase the relevance of Dynamic models of information systems by subject area. The relevance of Information Resources is achieved by including, deleting, and changing links to links between documents. When the structure of the subject area of information systems changes, the database scheme changes when updating information.

5. Providing information resources to users. The main purpose of Creating Information Systems is to provide the necessary information resources at the user's request and to meet their information needs. To provide resources, you can use pull and push technologies:

– Pull-technology is implemented on the basis of user initiative, providing mechanisms for searching and navigating information resources through user interfaces.

– Push technology is used to distribute various types of information between users in accordance with certain rules and based on a specific user framework. Users registered in the system are notified of the receipt of new documents in scientific and educational activities [15].

To meet these requirements, it is necessary to create an Information Service or environment for the provision and exchange of metadata – structured information about information resources and principles of access to them. Currently, many information centers engaged in the collection and distribution of metadata are actively interested in organizing interaction in order to exchange resources in them. As a rule, the basis for such a combination of funds is the development of a standard for the presentation of metadata, as well as the integration of arrays of normative reference information [16].

Within the framework of the tasks set, an Information System Architecture has been developed (Fig. 3), a multi-level DL architecture consisting of a data warehouse, a repository, a metadata server, an application server, a reference dictionary, as well as a software implementation of the developed architecture will be used to systematize the resources of the Digital Library.

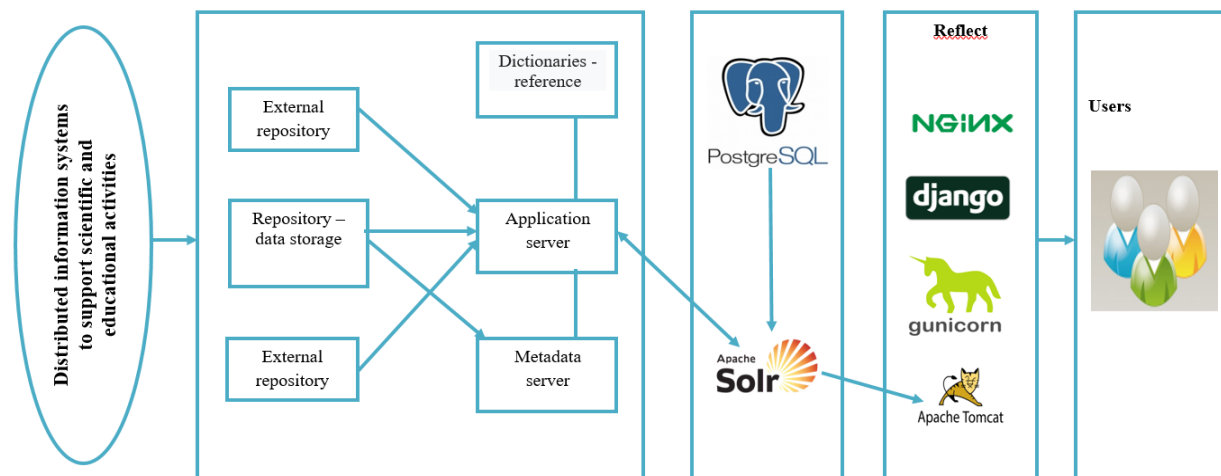


Fig. 3. Architecture of a distributed information system for supporting scientific and educational activities

It was developed taking into account the need for scalability and scalability of the architecture due to the need to store and process large amounts of data, as well as the use of resources of cost-effective algorithms for machine (including deep) learning. Let's look at the main components of this system, which are shown in Fig. 2.

The data warehouse is designed to store additional metadata about collections and their structure. They ensure the safety of electronic versions of articles, books, etc. and allow them to be accessed by external systems and users [16].

The use of electronic library materials depends on the availability of metadata to ensure effective and accurate viewing of content. Metadata must be generated when content is added to the digital library. Metadata and data should be logically linked to each other and, over time, there should be a reliable basic technology for managing logical communication between platforms and excessive geographical separation, everything will be implemented in a network distributed system.

For effective operation of the application server, it is necessary to use a set of classifier dictionaries containing both classification signs and a set of basic terms (with order relations), in which the systematization and classification of the material is carried out.

A dictionary reference is a set of terms that make up a dictionary for describing the content of a document. It is supported by standardization bodies to develop a standard method for categorizing materials included in the archive.

A clear categorization of material using a reference dictionary increases the likelihood that documents related to the search expression will be found when organizing a search in one or more electronic libraries as a result of the search.

1) PostgreSQL-serves as a permanent storage for structured data. The main types of data stored in this database are: a) news and metadata; b) processed data at the level of various basic units of analysis (lexema / word / phrase / sentence / text), including vectorization, lemmatization, cleaning results, etc.; c) thematic modeling results; results of classification of news by various criteria (tonality, political science, social significance, etc.)

2) ApacheSolr is a popular, rapidly developing open source search platform built on ApacheLucene. Solr is highly reliable, scalable, and fault tolerant, providing distributed indexing, replication, and load balancing, automatic disaster recovery, centralized configuration, and more. Solr supports the search and navigation functions of many of the largest Internet sites in the world. Since Solr has distributed search and replication capabilities, Solr is highly scalable. Here are some of the main features that solr provides:

- a) advanced full-text search capabilities;
- b) optimized for high volume traffic;
- c) open interfaces based on standards-XML, JSON and HTTP;
- d) comprehensive administration interfaces;
- e) easy monitoring;

- f) high scalability and fault tolerance;
- g) flexible and adaptable with simple configuration;
- h) next to the real-time index;
- i) extensible Plugin architecture;

Distributed Search in Solr has the following limitations. Each indexed document must have a unique key.

If Solr detects duplicate document IDs, Solr selects the first document and deletes subsequent documents.

Solr offers simple keyword search support for complex queries across multiple fields and multi-faceted search results. Search has more information about search and queries.

If Solr's capabilities aren't impressive enough, its ability to handle applications with very large volumes should help.

The figure will contain the following subsystems:

– Subsystem – a repository of digital objects that provides user and administrative WEB interfaces for accessing digital objects and collections, as well as compatibility interfaces with other subsystems based on open international standards.

– Subsystem for managing current research information, which includes articles by employees, information about their participation in conferences and the implementation of research projects.

– The subsystem will include user and administrative interfaces, as well as compatibility interfaces with other subsystems based on open international standards.

– Subsystem for integrating distributed information resources based on Apache Solr technology.

– Subsystem for accessing distributed information resources the basis of the technology is Nginx, Django, Apache Tomcat.

Conclusion

The main functional requirements for working with documents of a distributed information system supporting scientific and educational activities are formulated. To date, all the necessary components for creating a qualitatively new scientific information system have been developed and clearly systematized. A large part of science-centered distributed systems allow us to create a single environment for the exchange of scientific information.

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP09057872).

References

1. Fedotov A.M. [Methodologies for building distributed systems]. *Selected reports of the X Russian Conference. Distributed information and computing resources. (DICR-2005)*, 2005, no. 11, pp. 3–16. (in Russ.)

2. Fedotov A.M., Zhizhimov O.L., Fedotova O.A., Baraxnin V.B. [A model of an information system to support scientific and pedagogical activities]. *Bulletin of the Novosibirsk State University Ser. Inform. Technologies*, 2014, vol. 12, no. 1, pp. 89–101. (in Russ.)

3. Zhizhimov O.L., Fedotov A.M., Fedotova O.A. [Building a standard model of an information system for working with documents on scientific heritage]. *Bulletin of the Novosibirsk State University Ser. Inform. Technologies*, 2012, vol. 10, no. 3, pp. 5–14. (in Russ.)

4. Fedotov A.M. Leonova Yu.V. [Requirements for the prototype of an information resource management system in distributed information systems for supporting scientific research]. *Computational Technologies*, 2018, no. 5, vol. 23, pp. 82–109. (in Russ.)

5. Kogalovsky M.R. [Metadata, its properties, functions, classification and presentation tools]. *Proceedings of the 14th All-Russian Scientific Conference "Electronic Libraries: promising methods and technologies, electronic collections" – RCDL 2012, Pereslavl-Zalessky, Russia, 2012*, pp. 4–14. (in Russ.)

6. Bezdushnyy A.N., Bezdushnyy A.A., Serebryakov V.A., Filippov V.I. [Integration of metadata of the Unified Scientific Information Space of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, Computing Center of RAS named after A.A. Dorodnitsyn, 2006. 237 p. (in Russ.)

7. Shokin Y.I., Fedotov A.M., Zhizhimov O.L., Fedotova O.A. [The evolution of information systems: from Web sites to information resource management systems]. *Bulletin of the Novosibirsk State University. Series: Information Technologies*, 2015, vol. 13, no. 1, pp. 117–134. (in Russ.)
8. Shokin Yu.I., Fedotov A.M. [Support and development of distributed information and computing resources of SB RAS]. *Bulletin of the Al-Farabi Kazakh National University. Series: Mathematics, mechanics, computer Science*, 2004, vol. 4, no. 3, pp. 324–334. (in Russ.)
9. Zhizhimov O.L., Mazov N.M., Bolvanov A.Yu. [Experience in building a distributed information system based on the Z39.50 protocol]. *Libraries and associations in a changing world: new technologies and new forms of cooperation: 6th International Conference "Crimea 99" (June 5–13, 1999, Sudak): Materials of the conference*. Simferopol, Tavrida Publ., 1999, iss. 1, pp. 249–252. (in Russ.)
10. Serikbayeva S.K., Tussupov D.A., Sambetbayeva M.A., Yerimbetova A.S., Taszhurekova Zh.K., Borankulova G.S. [EduDIS construction technology based on Z39.50 protocol]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2021, vol. 99, no. 10, pp. 2244–2255.
11. Kutsenogy K.P., Kutsenogy P.K., Molorodov Yu.I., Fedotov A.M. [Development of the metadata structure for atmospheric aerosols based on an information model]. *Special issue: Proceedings of the International conference "Computational and Information Technologies for Environmental Sciences" (CITES 2003)*. Tomsk, 2003, vol. 9, pp. 25–33. (in Russ.)
12. Kogalovsky M.R. [Metadata in computer systems]. *Programming*, 2013, no. 4, pp. 28–46. (in Russ.)
13. Soviets B.Ya., Tsekhanovsky V.V. *Informatsionnyye tekhnologii: uchebnik dlya vuzov* [Information technologies: a textbook for universities]. Moscow, Higher School Publ., 2005. 327 p.
14. Kogalovsky M.R. *Perspektivnyye tekhnologii informatsionnykh sistem* [Promising technologies of information systems]. Moscow, DMK Press; IT Company Publ., 2003. 288 p.
15. Kogalovsky M.R., Parinov S.I. [Information resources, scientometric indicators and indicators of the quality of metadata of the Socionet system]. *Proceedings of the Ninth All-Russian Conference "Electronic Libraries: promising methods and technologies, electronic collections" – RCDDL'2007. Pereslavl-Zalessky, Russia*, 2007, pp. 45–54. (in Russ.)
16. Kogalovsky M.R., Novikov B.A. [Electronic libraries – a new class of information systems]. *Programming*, 2000, no. 3, pp. 3–8. (in Russ.)

Received 12 June 2021

УДК 004.7:004.75

DOI: 10.14529/ctcr210315

ТРЕБОВАНИЯ К РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИНФОРМАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

С.К. Серикбаева¹, Дж.А. Тусупов¹, М.А. Самбетбаева^{1, 2}, Ж.К. Серикбаева³

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
г. Нур-Султан, Республика Казахстан,

² Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК,
г. Алматы, Республика Казахстан,

³ Учебно-методический центр развития образования Карагандинской области,
г. Караганда, Республика Казахстан

Для повышения эффективности научных исследований необходимо иметь доступ к систематизированным информационным ресурсам научной работы. Поэтому в любой области науки она начинается с исследований, поиска научной информации, но с ростом числа научных статей, книг, монографий, патентов поиск информации становится все более и более сложным. Создание единой информационной системы позволяет ученым быстро знакомиться

с результатами других научных исследований и предотвращать их дублирование. Описаны основные задачи создания модели распределенной информационной системы, поддерживающей научную и образовательную деятельность, функциональные возможности модели, концепция метаданных и требования к профилю метаданных. Определены задача, предметная область, субъекты, объекты, основные функциональные возможности информационной системы, приведен перечень основных видов информационных ресурсов. В статье анализируются функциональные требования к таким системам. **Цель.** В процессе создания распределенных информационных систем, поддерживающих научную и образовательную деятельность, необходимо изучить требования, предъявляемые к информационной системе. **Методы.** В статье подробно рассматриваются технологические методы построения моделей информационных систем поддержки научной и образовательной деятельности. **Результаты.** С использованием требований, моделей, метаданных распределенной информационной системы поддержки научной и образовательной деятельности разработана архитектура информационной системы и представлена схема обмена информацией в информационной системе посредством информационных протоколов. **Заключение.** В статье рассматриваются технологические методы создания распределенной информационной системы, поддерживающей научную и образовательную деятельность. Описаны основные задачи построения модели распределенной информационной системы, поддерживающей научную и образовательную деятельность, обеспечивающую работоспособность функциональной модели, концепции метаданных для этой системы и требования к профилю метаданных. На основе предложенных требований была разработана архитектура распределенной информационной системы поддержки научной и образовательной деятельности и четко описана структура.

Ключевые слова: распределенная информационная система, электронная библиотека, научная и образовательная деятельность, метаданные, функциональные требования, Z39.50, LDAP, PostgreSQL, Solr.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP09057872).

Литература

1. Федотов, А.М. *Методологии построения распределенных систем* / А.М. Федотов // *Избранные доклады X Российской конференции. Распределенные информационно-вычислительные ресурсы. (DICR-2005).* – 2005. – № 11. – С. 3–16.
2. *Модель информационной системы для поддержки научно-педагогической деятельности* / А.М. Федотов, О.Л. Жижимов, О.А. Федотова, В.Б. Баракшин // *Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Информ. технологии.* – 2014. – № 1 (12). – С. 89–101.
3. *Жижимов, О.Л. Построение типовой модели информационной системы для работы с документами по научному наследию* / О.Л. Жижимов, А.М. Федотов, О.А. Федотова // *Вестник Новосибирского государственного университета Сер. Информ. технологии.* – 2012. – № 3 (10). – С. 5–14.
4. *Федотов, А.М. Требования к прототипу системы управления информационными ресурсами в распределенных информационных системах поддержки научных исследований* / А.М. Федотов, Ю.В. Леонова // *Вычислительные технологии.* – 2018. – № 5 (23). – С. 82–109.
5. *Козаловский, М.Р. Метаданные, их свойства, функции, классификация и средства представления* / М.Р. Козаловский // *Труды 14-й Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL2012, Переславль-Залесский, Россия.* – 2012. – С. 4–14.
6. *Интеграция метаданных Единого научного информационного пространства РАН* / А.Н. Бездушный, А.А. Бездушный, В.А. Серебряков, В.И. Филиппов. – М.: *Вычисл. центр РАН им. А.А. Дородницына.* – 2006. – 237 с.
7. *Эволюция информационных систем: от Web-сайтов до систем управления информационными ресурсами* / Ю.И. Шокин, А.М. Федотов, О.Л. Жижимов, О.А. Федотова // *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии.* – 2015. – № 1 (13). – С. 117–134.
8. *Шокин, Ю.И. Поддержка и развитие распределенных информационно-вычислительных ресурсов СО РАН* / Ю.И. Шокин, А.М. Федотов // *Вестник КазНУ им. Аль-Фараби. Серия: Математика, механика, информатика.* – 2004. – № 3 (4). – С. 324–334.

Краткие сообщения

9. Жижимов, О.Л. Опыт построения распределенной информационной системы на базе протокола Z39.50 / О.Л. Жижимов, Н.М. Мазов, А.Ю. Болванов // Библиотеки и ассоциации в меняющемся мире: новые технологии и новые формы сотрудничества: 6-я междунар. конф. «Крым 99» (5–13 июня 1999 г., г. Судак): материалы конф. – Симферополь: Таврида, 1999. – Вып. 1. – С. 249–252.

10. EduDIS construction technology based on Z39.50 protocol / S.K. Serikbayeva, D.A. Tussupov, M.A. Sambetbayeva и др. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2021. – No. 10 (99). – P. 2244–2255.

11. Разработка структуры метаданных по атмосферным аэрозолям на основе информационной модели / К.П. Куценогий, П.К. Куценогий, Ю.И. Молородов, А.М. Федотов // Специальный выпуск: Труды международной конференции «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде» (CITES 2003). – Томск, 2003. – Т. 9. – С. 25–33.

12. Когаловский, М.Р. Метаданные в компьютерных системах / М.Р. Когаловский // Программирование. – 2013. – № 4. – С. 28–46.

13. Советов, Б.Я. Информационные технологии: учеб. для вузов / Б.Я. Советов, В.В. Цехановский. – М.: Высшая школа, 2005. – 327 с.

14. Когаловский, М.Р. Перспективные технологии информационных систем / М.Р. Когаловский. – М.: ДМК Пресс: Компания АйТи, 2003. – 288 с.

15. Когаловский, М.Р. Информационные ресурсы, наукометрические показатели и показатели качества метаданных системы Соционет / М.Р. Когаловский, С.И. Паринов // Труды Девятой Всероссийской конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» – RCDL'2007, г. Переславль-Залесский, Россия. – 2007. – С. 45–54.

16. Когаловский, М.Р. Электронные библиотеки – новый класс информационных систем / М.Р. Когаловский, Б.А. Новиков // Программирование. – 2000. – № 3. – С. 3–8.

Серикбаева Сандугаш Курманбековна, PhD докторант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Республика Казахстан; inf_8585@mail.ru.

Тусупов Джамалбек Алиаскарович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Республика Казахстан; tussupov@mail.ru.

Самбетбаева Мадина Аралбаевна, д-р философии (PhD) по специальности 6D070300 – Информационные системы, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан; Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК, г. Алматы, Республика Казахстан; madina_jgtu@mail.ru.

Серикбаева Жаркынай Курманбековна, магистр информатики, методист, Учебно-методический центр развития образования Карагандинской области, г. Караганда, Республика Казахстан; jarkinai_ser@mail.ru.

Поступила в редакцию 12 июня 2021 г.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Requirements for Distributed Information Systems to Support Scientific and Educational Activities / S.K. Serikbayeva, J.A. Tussupov, M.A. Sambetbayeva, J.K. Serikbayeva // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 149–160. DOI: 10.14529/ctcr210315

FOR CITATION

Serikbayeva S.K., Tussupov J.A., Sambetbayeva M.A., Serikbayeva J.K. Requirements for Distributed Information Systems to Support Scientific and Educational Activities. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 149–160. DOI: 10.14529/ctcr210315

ОСНОВЫ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

К.А. Коренная¹, А.В. Голлай², О.В. Логиновский²

¹ АО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

На сегодняшний день проблема повышения эффективности деятельности крупных российских промышленных предприятий является одной из важнейших народнохозяйственных проблем отечественной экономики. **Цель исследования.** В этой связи целью исследования данной работы является совершенствование процессов подготовки и принятия управленческих решений по стратегическому и оперативному управлению промышленными предприятиями нашей страны в современных условиях глобальной нестабильности и ужесточения международной конкуренции. **Материалы и методы.** Приведенные в статье научные положения представляют собой целостный комплекс мер, обеспечивающий реализацию для промышленных предприятий управленческих алгоритмов как стратегического, так и оперативного характера. При этом использовались методы математического моделирования и финансово-экономической аналитики. **Результаты.** Результатами проведенного исследования являются: обоснованный комплекс научных положений по стратегическому управлению промышленными предприятиями, а также прогнозно-адаптивный подход к оперативному управлению производственными компаниями в условиях как стабильного развития мировой экономики, так и международных финансово-экономических кризисов. На базе разработанных комплексов научных положений сформированы наборы математических моделей по стратегическому управлению промышленными предприятиями и оперативному управлению ими. **Заключение.** Представленные в данной статье научные положения и материалы дают возможность руководителям промышленных предприятий сформировать целостные и всесторонне обоснованные стратегии их перспективного развития, а также алгоритмы оперативного управления производственными подразделениями предприятий в периоды глобальной нестабильности.

Ключевые слова: стратегическое управление, оперативное управление, промышленные предприятия, методы и математические модели, подготовка и принятие решений.

Введение

В современных условиях ведения бизнеса, характеризующихся усилением глобальной нестабильности, антироссийской санкционной политикой стран Запада по отношению к отечественным промышленным предприятиям и т. п., акционеры и руководители производственных компаний нашей страны должны отчетливо понимать значимость воздействия подобных факторов на их бизнес.

В этой связи руководители российских промышленных предприятий кроме сложившихся у них традиционных представлений об экономике и финансах производственных компаний, современной логистике, основах создания и развития информационно-компьютерных сетей и систем предприятий, методах и моделях управления различного рода ресурсами и другими сферами внутрифирменной деятельности должны сконцентрировать свои руководящие установки и воздействия на анализе динамики и учете сложившихся и вновь возникающих тенденций в международной финансово-экономической аналитике, оценке возрастания влияния внешних воздействий на деятельность собственных предприятий, а также возможностях использования наиболее эффективных стратегических и оперативных подходах, методах и математических моделях, которые могли бы способствовать повышению эффективности их деятельности вкупе с новейшими технологиями по развитию информационных систем и методами цифровизации.

Разумеется, что для различных промышленных предприятий, к тому же работающих в разнообразных отраслях промышленности нашей страны, избранные стратегии развития и оперативного управления будут некоторым образом отличаться между собой. Однако их ключевые

императивы не могут не быть близки по своей сути и составу основных научно-технических положений.

Основные научные положения по управлению промышленными предприятиями в условиях нестабильности

В научно-технической литературе в течение нескольких последних десятилетий был предложен целый ряд научных подходов по совершенствованию управления промышленными предприятиями (процессный, системный, ситуационный и др.). Среди множества научных работ по повышению эффективности деятельности промышленных предприятий, созданию новых методов, моделей и механизмов, направленных на достижение указанной цели, необходимо упомянуть следующие публикации: [1–7, 13, 19–27]. Однако все упомянутые идеи и разработки в последние годы утратили свое значение как руководство к действию в условиях усиления глобальной нестабильности и ужесточению конкуренции на международных рынках за счет использования политических технологий.

Одной из немногих попыток создать адекватную современным условиям ведения бизнеса в России концепцию стратегического и оперативного управления промышленным предприятием, которая бы позволяла не только обеспечивать эффективность производств, но и давала возможности для его развития как в близком, так и в отдалённом будущем, является новая концепция управления компанией, разработанная на базе АО «Кузнецкие ферросплавы» [16]. Данная работа базируется на проведенных под руководством К.А. Коренной многолетних научных исследованиях [8–12, 14–16, 18, 28].

Проведенные исследования показали, что ни одна из западных теорий менеджмента не позволяет в условиях становления и развития российской рыночной экономики успешно управлять предприятиями. Актуальная идеология стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями должна учитывать логическую взаимосвязь целей и задач управления компаниями с такими воздействующими на неё факторами и процессами внешней среды, как глобализация, формирование новой геоэкономической конфигурации современного мира, усиление и укрупнение международных и транснациональных корпоративных структур, всеобщая модернизация производственных технологий и др. При этом необходимо учитывать процессы динамики международного торгово-хозяйственного нормативно-правового регулирования и создания всемирных коммуникационных и информационных сетей и систем.

Сегодня многие российские промышленные предприятия и производственные корпорации не просто работают на зарубежных рынках, значительное количество таких предприятий открыло свои представительства практически во всех регионах и государствах, которые являются потребителями их продукции. Миссии этих предприятий, цели и направления производственной деятельности стали неотделимы от потребностей мировой экономической конъюнктуры. К примеру, АО «Кузнецкие ферросплавы», выпускающее 600 тыс. тонн ферросилиция в год, более 80 % своей продукции поставляет на экспорт. Таким образом, для промышленных предприятий, ориентированных на производство и продажу продукции на зарубежных рынках, факторы внешнеэкономического и политического характера (или в терминологии ситуационного подхода – внешние ситуационные переменные, оказывающие не прямое, а косвенное воздействие на предприятие) приобретают для управления компанией определяющее значение. Именно факторы косвенного воздействия (потребности международных рынков, курсы валют, социально-политические и финансово-экономические потрясения и т. п.) указывают предприятию на необходимость изменений в объемах и номенклатуре выпускаемой продукции, ценовой политике и др. [11, 16].

Потребности международных рынков и уровень цен, по которым предприятие может реализовывать выпускаемую им продукцию, в сущности является основным ограничителем при формировании его производственного плана, а также позволяет оценить размеры прибыли, которая может быть получена в складывающейся ситуации. Таким образом, усиление глобальной нестабильности, невозможность формировать обоснованные прогнозы потребностей международных рынков, неустойчивость валютных трендов сделали концепцию ситуационного подхода не соответствующей реалиям нового времени. Ведь согласно идеологии ситуационного подхода, основными факторами (или ситуационными переменными), воздействующими на любое промышленное предприятие, являются внутренние факторы развития компании, а также факторы внешнего

прямого воздействия на её деятельность (поставщики, конкуренты, потребители и т. д.). Тогда как промышленным предприятиям сегодня приходится в первую очередь обращать внимание не на факторы прямого внешнего воздействия на предприятие и его внутрифирменного развития, а прежде всего на факторы косвенного внешнего воздействия (потребности крупнейших покупателей продукции промышленного предприятия на мировом рынке, цены на производимую предприятием продукцию на международных рынках, курсы валют и пр.).

Таким образом, чтобы гибко и эффективно работать в таких условиях, промышленным предприятиям необходим новый подход к управлению, который дал бы возможность развивать предприятия не только в периоды стабильного развития мировой экономики, но и в периоды финансово-экономической нестабильности или мировых кризисов, вызванных различными причинами.

Суть такого подхода состоит в том, что в условиях стабильного развития мировой экономики промышленное предприятие должно четко сформулировать концепцию своего перспективного развития и сформировать стратегию своего поведения на достаточно длительный период времени.

В условиях же возникновения мировых финансово-экономических кризисов и последующей за ними глобальной экономической нестабильности промышленное предприятие должно управляться совершенно иначе – на основе прогнозно-адаптивного подхода. Сущностью последнего является гибкое адаптационное управление предприятием посредством краткосрочных прогнозов изменения внутренних и внешних ситуационных переменных, причем не столько прямого, сколько косвенного воздействия [11, 18].

Таким образом, в условиях глобальной нестабильности необходимо ввести упреждающее управление производственными заданиями на основе краткосрочных прогнозов развития ситуации. Именно по отношению к этим прогнозам и должна выстраиваться упреждающая адаптивная стратегия поведения компании. Отметим, что и само название данного подхода вполне отражает его сущность и этим в корне отличает его от известного ситуационного.

Таким образом, в периоды стабильности мировой экономики промышленные предприятия имеют возможность успешно строить свои миссии, цели и концепции развития (включая стратегии по различным направлениям деятельности) не только на краткосрочную, но и на долгосрочную перспективы, владельцы промышленных предприятий при этом, сформировав совместно с руководителями этих предприятий указанные стратегии, могут позволить себе доверить их реализацию и непосредственное оперативное управление предприятием высококвалифицированным топ-менеджерам, осуществляя лишь ежемесячный или подекадный контроль за работой своих компаний.

Следует отметить, что в период стабильного развития экономики промышленное предприятие имеет возможность увеличить свои финансовые ресурсы за счет капитализации [11]. Это может достигаться следующим образом:

– путем преобразования средств (части чистой прибыли, дивидендов и др. или всей прибыли) в добавочный капитал, добавочные факторы производства (такие как средства труда, предметы труда, рабочую силу и т. д.), в результате чего достигается увеличение размера собственных средств;

– за счет роста рыночной капитализации, которая представляет собой произведение количества выпущенных акций на цену одной акции по биржевому курсу.

Оценка рыночной капитализации основана на теории свободного рынка, согласно которой свободный рынок способен учитывать все факторы, влияющие на цену компании, в совокупности. Именно в результате биржевых торгов и только благодаря им можно определить истинную стоимость компании. При этом понятие капитализации распространяется не только на отдельные промышленные предприятия, но и на целые отрасли промышленности и даже на все компании отдельных государств.

Многие факторы косвенного воздействия на предприятия в условиях нестабильного развития экономики и в периоды финансово-экономических кризисов значительно увеличивают своё влияние на промышленные предприятия и выбор линий экономического поведения последних.

Констатируем, таким образом, следующее. Если в периоды стабильности значение внутрифирменной динамики и факторов прямого воздействия на предприятие его руководством во многом учитывается при принятии управленческих решений, то в периоды финансово-экономических кризисов, когда факторы косвенного воздействия гораздо в большей степени начинают вли-

ять на деятельность компании, выбор линий поведения последних перестает ключевым образом зависеть от внутренних факторов и факторов прямого воздействия на предприятие.

В период же глобальной нестабильности, а возможно, и в некоторых других случаях, предприятие начинает работать в режиме, когда его функционирование прибыли не приносит. В частности, когда выручка от продажи готовой продукции равна себестоимости, то предприятию удастся лишь возместить затраты на производство и реализацию продукции. Если затраты на производство и продажу продукции превышают выручку, в этом случае предприятие терпит убытки. Для предприятий, осуществляющих непрерывное производство в условиях резкого снижения спроса и соответственно продаж, а также падения цен на международных рынках, их производственная деятельность, как правило, становится убыточной. Поэтому обеспечение работы предприятия в подобных условиях возможно только за счет дополнительного финансирования со стороны его собственников.

Выбор линий поведения предприятия в условиях, когда любая из этих линий заведомо оказывается убыточной, является для топ-менеджеров компании самым сложным и наиболее ответственным управленческим периодом, требующим досконального оперативного анализа складывающихся ситуаций и сравнения всех возможных финансовых потерь компании.

Следует особо подчеркнуть, что в периоды финансово-экономических кризисов экспортно-ориентированные предприятия при резком падении спроса на производимую ими продукцию в большинстве случаев идут либо на максимальное сокращение объемов производств, либо на полную остановку последних. Для отдельных промышленных отраслей, например, для экспортно-ориентированных ферросплавных производств, подобная ситуация усугубляется еще и тем, что данный тип производства является непрерывным. Печи по производству ферросилиция нельзя остановить полностью, они должны работать независимо от того, будет ли их продукция востребована покупателями или нет. В результате возникает ситуация, когда производства не могут быть остановлены, и компания продолжает нести затраты на сырье и материалы, заработную плату работникам, электроэнергию, транспортное и техническое обслуживание и т. д. [16].

Однако оплачивать все эти расходы в условиях почти полного отсутствия продаж руководство предприятия не имеет возможности. Все указанные расходы, таким образом, ложатся на собственников компании, и пока кризис не закончится и мировые рынки снова не начнут приобретать продукцию предприятия, владельцы корпорации вынуждены брать на себя основное бремя по принятию управленческих решений, причем не только стратегического, сколько оперативного характера.

2. Стратегическое управление промышленными предприятиями в условиях международной нестабильности

История и теория промышленного менеджмента отчетливо показывают, что основной тенденцией в науке и практике управления промышленными предприятиями и корпорациями за многие прошедшие десятилетия было постепенное усиление роли стратегического планирования фактически от нуля в период становления капиталистических отношений до преобладающих позиций в современную эпоху постиндустриального общества.

В библиографическом списке к данной работе представлен достаточно емкий перечень основных публикаций по данному вопросу. Анализ различных идей по этой тематике можно найти, например в [16, 17].

Формирование стратегических приоритетов промышленных предприятий должно осуществляться с учетом целого ряда соображений и обоснований.

Собственники и руководители промышленных предприятий, которые желают добиться высокой эффективности принимаемых решений по управлению предприятием, должны всячески способствовать тому, чтобы сложившаяся на промышленном предприятии или в корпорации система подготовки и принятия управленческих решений как на оперативном, так и на стратегическом уровнях обеспечивала наиболее продуктивную реализацию самых разнообразных задач в рамках достижения основных целей компании.

В этой связи используемые в различного рода расчетах математические модели должны вполне соответствовать тому, чтобы получаемые на их основе результаты удовлетворяли запросам лиц, принимающих решение на всех уровнях руководства компанией. Если какая-либо из

используемых моделей создает препятствие для решения каких-либо задач в рамках производственных цепочек либо управленческой вертикали, то такая модель должна быть заменена на более пригодную или подвергнута содержательной корректировке на уровне логико-математического моделирования.

В зависимости от динамики изменения условий внешней среды и характера особенностей производственной деятельности внутри компании владельцы и топ-менеджеры промышленных предприятий должны постоянно совершенствовать систему управления всеми сферами и направлениями производственной деятельности корпорации, вводя при этом как новые методы и механизмы умного управления, так и совершенствуя методы и модели подготовки и принятия управленческих решений.

На основе перечисленных позиций собственники и руководители любого промышленного предприятия или корпорации могут достаточно объективно оценить стратегический потенциал компании и перспективы ее дальнейшего развития.

Успех деятельности руководителей промышленных предприятий во многом связан с тем, имеют ли эти руководители личную концепцию развития предприятия или иной иерархии управления, возглавляемой ими.

Личная концепция – это видение руководителем того, каким должно стать предприятие в будущем в совокупности с перечнем необходимых для этого мероприятий, личных шагов руководителя и т. д. В этой связи функция планирования деятельности организации должна быть подчинена целям формирования личной концепции с учетом прогнозов развития организации и стремления к наиболее эффективному стилю руководства на этапах достижения цели [16].

Отечественные промышленные предприятия и корпорации при формировании своих стратегических и тактических приоритетов должны также учитывать ряд следующих положений [16].

Производить оценку используемых в компании управленческих идеологий и в случае неудовлетворенности осуществлять обоснование более привлекательной концепции производственного менеджмента.

Проводить анализ структуры компании и ее кадрового состава с целью обеспечения не только решения задач оперативного управления промышленным предприятием, но и эффективного стратегического развития последнего.

Совершенствовать систему сложившейся производственной логистики на промышленном предприятии. Создать эффективную систему материально-технического обеспечения производств, учета и контроля движения материальных ресурсов по производственным цехам предприятия вплоть до реализации готовой продукции и ее доставки покупателям.

Повышать адекватность системы оперативного управления к текущим задачам предприятия и требованиям собственников. Сколь бы обоснована и всесторонне проработана не была принимаемая стратегия развития промышленного предприятия или корпорации, тем не менее она не может не базироваться на эффективных подходах, методах и моделях оперативного управления производственной деятельностью компании.

Развивать качество управления проектами и систему проектного управления на предприятии, а также оценивать адекватность используемых производственных технологий компании и необходимость перехода на более современные промышленные уклады. При этом необходимо помнить, что процесс технологического обновления на промышленных предприятиях является высокотратным мероприятием. Собственники и руководители промышленных предприятий в условиях политической, экономической и социальной нестабильности (а также нарастающей неопределенности в том, будут ли покупатели произведенной продукции готовы приобретать ее более высокого качества, но по возросшей цене, либо наоборот – ориентироваться на невысокое качество продукции, но по низким ценам и т. п.) должны иметь возможность обоснованно оценивать предложения по созданию проектов технологического обновления имеющихся на предприятии производственных мощностей (например, различного рода печей и иного самого разнообразного технологического оборудования). В условиях падения производств в мире и отсутствия у собственников значительных финансовых ресурсов для перехода промышленных предприятий к новейшим промышленным технологиям вряд ли следует говорить о том, что в недалеком будущем подобный переход станет экономически обоснованным. Вполне возможно, что в случае отсутствия уверенности в том, что новые технологии, безусловно, позволят добиться высоких результа-

тов в борьбе с конкурентами, лицам, принимающим решения по стратегическим императивам компании, имеет смысл выждать время. И только когда станет ясно, что вложение денег в новые технологии – это совершенно необходимый шаг для выживания промышленного предприятия и обеспечения его конкурентоспособности в будущем, на подобные затраты можно пойти.

Производить анализ информационно-компьютерной инфраструктуры компании и используемых на предприятии систем АСУ, АСУТП и др. Существеннейшей стороной стратегического развития промышленного предприятия является создание в компании современной информационно-компьютерной инфраструктуры, базирующейся на адекватных возросшим требованиям пользователей и уровню ведения бизнес-процессов автоматизированных систем управления всеми сферами деятельности промышленного предприятия и процессами производственно-хозяйственной деятельности.

При этом не следует забывать и о том, что использование в составе информационно-вычислительной инфраструктуры промышленного предприятия зарубежного оборудования, вычислительной техники, а также изготовленного за границей программного обеспечения в случае ухудшения военно-политической ситуации в мире не гарантирует того, что предприятие будет способно выполнять свои производственные задачи и сердце информационно-вычислительной системы не даст сбой.

Осуществлять анализ динамики технико-экономических показателей деятельности промышленного предприятия или корпорации. В рамках анализа показателей производственно-хозяйственной деятельности промышленного предприятия очень важно найти соответствие (или несоответствие) складывающейся динамики технико-экономических показателей работы компании другим стратегическим императивам развития предприятия. При формировании методических положений по разработке стратегии развития промышленного предприятия или корпорации очень важно учитывать, что в случае несоответствия складывающейся динамики намерениям и планам собственников и руководителей промышленного предприятия необходима корректировка всего набора указанных стратегических императивов. Эта корректировка должна обеспечить позитивную динамику показателей технико-экономического развития компании на перспективу.

Оценивать состав и качество используемых математических моделей в управлении промышленным предприятием. Формировать состав и содержание актуальных механизмов и моделей умного управления. Совершенствовать систему подготовки и принятия управленческих решений и уровня их обоснованности.

Заключение

Рассмотренные в данной статье наиболее важные аспекты стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями позволяют акционерам и руководителям последних сформировать набор методических научных положений, нацеленный на повышение эффективности подготовки и принятия управленческих решений (причем как оперативного, так и стратегического характера), который даст возможность их компаниям вполне успешно функционировать как в периоды стабильного развития мировой экономики, так и в периоды мировых финансово-экономических кризисов, усиления международной нестабильности и т. п.

Они также могут воспользоваться разработанными в целом ряде научных трудов авторов комплексами научных методов и математических моделей по стратегическому и оперативному управлению компаниями [8–12, 14–16, 18, 28–30].

Литература

1. Аакер, Д. *Стратегическое рыночное управление* / Д. Аакер; пер. с англ. – СПб.: Питер, 2002. – 544 с.
2. Акофф, Раассел Л. *Планирование будущего корпорации* / Раассел Л. Акофф. – М.: СИРИН, 2002. – 256 с.
3. Бир, С. *Мозг фирмы* / С. Бир; пер. с англ. – М.: Либроком, 2009. – 416 с.
4. 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.

5. Вумек, Джеймс П. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Джеймс П. Вумек, Дэниел Т. Джонс; пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. – 473 с.
6. Каплан, Роберт С. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию / Роберт С. Каплан, Дейвид П. Нортон; пер. с англ. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003. – 304 с.
7. Кондратьев, Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения: избранные труды / Н.Д. Кондратьев, Ю.В. Яковец, Л.И. Абалкин. – М.: Экономика, 2002. – 767 с.
8. Коренная, К.А. Интегрированные информационные системы промышленных предприятий: монография / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. А.Л. Шестакова. – Челябинск: ЮУрГУ, 2012. – 314 с.
9. Коренная, К.А. Информационно-ресурсное обеспечение управления промышленными предприятиями на основе прогнозно-адаптивного подхода / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов // Информационные ресурсы России. – М., 2012. – № 2 (126). – С. 16–20.
10. Коренная, К.А. Разработка модели реализации продукции промышленного предприятия, обеспечивающей безубыточность / К.А. Коренная // Экономика и менеджмент систем управления. – 2015. – № 2 (16). – С. 40–46.
11. Коренная, К.А. Управление промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности: монография / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – 403 с.
12. Коренная, К.А. Обеспечение взаимосвязи стратегического и оперативного управления промышленным предприятием как концептуальная основа его развития / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов, К.С. Халдин // Известия вузов. Уральский регион. – 2015. – № 4. – С. 34–45.
13. Кох, Р. Стратегия. Как создавать и использовать эффективную стратегию / Р. Кох. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 320 с.
14. Логиновский, О.В. Повышение эффективности работы предприятия на основе современных управленческих технологий и информационно-аналитических систем: доклад / О.В. Логиновский, К.А. Коренная // Автоматизация и управление промышленными предприятиями: науч.-техн. конф. всерос. форума «Информационное общество – 2015: вызовы и задачи». – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2015. – С. 4–38.
15. Логиновский, О.В. Развитие информационных систем крупных промышленных предприятий / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, К.А. Коренная // Известия вузов. Уральский регион. – 2012. – № 2. – С. 40–51.
16. Логиновский, О.В. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: монограф. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.
17. Логиновский, О.В. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. – М.: Инфра-М, 2020. – 456 с.
18. 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 и практики управления. – М., 2012. – № 9-10. – С. 145–150.
19. Масааки Имаи. Кайдзен: ключ к успеху японских компаний: пер. с англ. / М. Имаи. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. – 274 с.
20. Минцберг, Г. Школы стратегии / Г. Минцберг, Б. Альстренд, Дж. Лэмпел; пер. с англ. под ред. Ю.Н. Каптуревского. – СПб.: Питер, 2000. – 336 с.
21. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. – 604 с.
22. Поспелов, Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
23. Райс-Джонстон, У. Тактический менеджмент: пер. с англ. / У. Райс-Джонстон. – СПб.: Питер, 2001. – 672 с.
24. Шелдрейк, Дж. Теория менеджмента: от тейлоризма до японизации / Дж. Шелдрейк; пер. с англ. под ред. В.А. Спивака. – СПб.: Питер, 2001. – 352 с.

25. Шееп, А-В. *Моделирование бизнес-процессов* / А-В. Шееп. – М.: Весть-МетаТехнология, 2000. – 205 с.

26. Burkov, V. *Introduction to theory of control in organizations* / V. Burkov, M. Goubko, N. Korin, D. Novikov. – London: CRC Press, 2015. – 346 p.

27. Burkov, V.N. *Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems* / V.N. Burkov, D.A. Novikov, A.V. Shchepkin. – Berlin: Springer, 2015. – 174 p.

28. Korennaya, K.A. *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations* / K.A. Korennaya, O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.V. Zimin; ed. A.L. Shestakov. – Kostanay: KSU, 2014. 230 p.

29. Loginovskiy, O.V. *Mathematical models for decision-making on strategic management of industrial enterprise in conditions of instability* / O.V. Loginovskiy, O.I. Dranko, A.V. Hollay // Leipzig: CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – No. 2093. – P. 1–12.

30. Shestakov, A.L. *Modern Information Technologies and the Need for Improving the Quality of Organizational and Corporate Structures' Management* / A.L. Shestakov, O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.V. Hollay // Proceedings – 2020. Global Smart Industry Conference, GloSIC-2020. – 2020. – P. 127–131. DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267861

Коренная Кристина Александровна, канд. техн. наук, генеральный директор, АО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк; kkris221@mail.ru.

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gollaiav@susu.ru.

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

Поступила в редакцию 29 июня 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210316

FUNDAMENTALS OF EFFECTIVE MANAGEMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES IN MODERN CONDITIONS

K.A. Korennaya¹, kkris221@mail.ru,

A.V. Hollay², gollaiav@susu.ru,

O.V. Loginovsky², loginovskiiov@susu.ru

¹ JSC “Kuznetsk Ferroalloys”, Novokuznetsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Today, the problem of increasing the efficiency of large Russian industrial enterprises is one of the most important national economic problems of the domestic economy. **Purpose of the study.** In this regard, the purpose of the study of this work is to improve the processes of preparing and making managerial decisions on the strategic and operational management of industrial enterprises of our country in the current conditions of global instability and increasing international competition. **Materials and methods.** The scientific provisions presented in the article are an integral set of measures that ensure the implementation of both strategic and operational management algorithms for industrial enterprises. At the same time, the methods of mathematical modeling and financial and economic analytics were used. **Results.** The results of the study are: a well-founded set of scientific provisions on the strategic management of industrial enterprises, as well as a predictive and adaptive approach to the operational management of production companies in the conditions of

both stable development of the world economy and international financial and economic crises. On the basis of the developed sets of scientific provisions, sets of mathematical models for the strategic management of industrial enterprises and their operational management are formed. **Conclusion.** The scientific provisions and materials presented in this article enable the heads of industrial enterprises to form holistic and comprehensively justified strategies for their long-term development, as well as algorithms for operational management of industrial divisions of enterprises during periods of global instability.

Keywords: strategic management, operational management, industrial enterprises, methods and mathematical models, preparation and decision-making.

References

1. Aaker D. *Strategicheskoye rynochnoye upravleniye* [Strategic Market Management]. St. Petersburg, Peter, 2002. 544 p.
2. Ackoff L. Raassel. *Planirovaniye korporatsii* [Planning the Future of the Corporation]. Moscow, SI-RIN, 2002. 256 p.
3. Beer S. *Mozg firmy* [Brain of the Firm]. Moscow, Librokom, 2009. 416 p.
4. Burkov V.N., Burkova I.V., Gubko M.V. *Mekhanizmy upravleniya: Upravleniye organizatsiyey: planirovaniye, organizatsiya, stimulirovaniye, kontrol'* [Management Mechanisms: Organization Management: Planning, Organization Stimulation, Control: Textbook; edited by D.A. Novikov]. Moscow, LENAND, 2013. 216 p.
5. Wumek James P., Jones Daniel T. *Berezhlivoye proizvodstvo: Kak izbavit'sya ot poter' i dobit'sya protsvetaniya vashey kompanii* [Lean Manufacturing: How to get Rid of Losses and Achieve Prosperity of Your Company; trans. from English]. Moscow, Alpina Business Books, 2004. 473 p.
6. Kaplan, Robert S., Norton David P. *Sbalansirovannaya sistema pokazateley. Ot strategii k deystviyu* [A Balanced Scorecard. From Strategy to Action; trans. from English]. Moscow, CJSC Olymp-Business, 2003. 304 p.
7. Kondratiev N.D., Yakovets Yu.V., Abalkin L.I. *Bol'shiye tsikly kon'yunktury i teoriya predvideniya: izbrannyye trudy* [Large Cycles of Conjuncture and the Theory of Foresight: Selected Works]. Moscow, Ekonomika, 2002. 767 p.
8. Korennaya K.A., Loginovsky O.V., Maksimov A.A. *Integrirovannyye informatsionnyye sistemy promyshlennykh pred-priyatiy: monografiya* [Integrated Information Systems of Industrial Enterprises: a Monograph; edited by A.L. Shestakov]. Chelyabinsk, SUSU, 2012. 314 p.
9. Korennaya K.A., Loginovsky O.V., Maksimov A.A. Information and Resource Support of Management of Industrial Enterprises on the Basis of a Predictive and Adaptive Approach. *Informatsionnyye resursy Rossii* [Information Resources of Russia], 2012, no. 2 (126), pp. 16–20. (in Russ.)
10. Korennaya K.A. Development of a Model for the Sale of Products of an Industrial enterprise that Ensures Break-Even. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya* [Economics and Management of Management Systems], 2015, no. 2 (16), pp. 40–46. (in Russ.)
11. Korennaya K.A., Loginovsky O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami v usloviyakh global'-noy nestabil'nosti: monografiya* [Management of Industrial Enterprises in the Conditions of Global Instability: a Monograph; edited by A.L. Shestakov]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013. 403 p.
12. Korennaya K.A., Loginovsky O.V., Maksimov A.A., Khaldin K.S. Ensuring the Relationship Between Strategic and Operational Management of an Industrial Enterprise as a Conceptual Basis for its Development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ural'skiy region* [News of higher educational institutions. Ural region], 2015, no. 4. pp. 34–45. (in Russ.)
13. Koch R. Strategy. *Strategiya. Kak sozdat' i ispol'zovat' effektivnyuyu strategiyu* [How to Create and Use an Effective Strategy]. St. Petersburg, Peter, 2003. 320 p.
14. Loginovsky O.V., Korennaya K.A. Improving the Efficiency of the Enterprise on the Basis of Modern Management Technologies and Information and Analytical Systems: Report. *Avtomatizatsiya i upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. vserossiyskogo foruma "Informatsionnoye obshchestvo – 2015: vyzovy i zadachi"* [Automation and management of industrial enterprises: scientific and technical conference. All-Russian Forum "Information Society – 2015: Challenges and Objectives"]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2015. pp. 4–38. (in Russ.)

Краткие сообщения

15. Loginovsky O.V., Maksimov A.A., Korennaya K.A. Development of information systems of large industrial enterprises. *Izvestiya vuzov. The Ural region*, 2012, no. 2, pp. 40–51. (in Russ.)
16. Loginovsky O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems: Mono-graph]. Moscow, INFRA-M, 2018. 410 p.
17. Loginovsky O.V., Hollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., ShinKarev A.A. *Effektivnoye upravleniye organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective Management of Organizational and Production Structures]. Moscow, Infra-M, 2020. 456 p.
18. Maksimov A.A., Korennaya K.A., Loginovskiy O.V. Adaptive Management of an Industrial Corporation in Conditions of Uncertainty (on the Example of Ferroalloy Production). *Problemy teorii i praktiki upravleniya* [Problems of Management Theory and Practice], 2012, no. 9-10. pp. 145–150. (in Russ.)
19. Masaaki Imai. *Kayzen: klyuch k uspekhu yaponskikh kompaniy* [Kaizen: the Key to the Success of Japanese Companies; translated from English]. Moscow, Al'pina Biznes Buks, 2004. 274 p.
20. Mintzberg G., Alstrand B., Lampel J. *Shkoly strategii* [Schools of Strategy; trans. from English. edited by Yu.N. Kapturevsky]. St. Petersburg, Peter, 2000. 336 p.
21. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Management of Organizational Systems]. Moscow, Publishing House of Physical and Mathematical literature, 2012. 604 p.
22. Pospelov D.A. *Situatsionnoye upravleniye: Teoriya i praktika* [Situational Management: Theory and Practice]. Moscow, Nauka, 1986. 288 p.
23. Rice-Johnston W. *Takticheskiy menedzhment* [Tactical Management; trans. from English]. St. Petersburg, Peter, 2001. 672 p.
24. Sheldrake J. *Teoriya menedzhmenta: ot teylorizma do yaponizatsii* [Management Theory: from Taylorism to Japanization; trans. from English. edited by V.A. Spivak]. St. Petersburg, Peter, 2001. 352 p.
25. Scheer A-V. *Modelirovaniye biznes-protsessov* [Modeling of Business Processes]. Moscow, Vest'-MetaTekhnologiya, 2000. 205 p.
26. Burkov V., Goubko M., Korgin N., Novikov D. *Introduction to Theory of Control in Organizations*. London, CRC Press, 2015. 346 p.
27. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems*. Berlin, Springer, 2015. 174 p.
28. Korennaya, K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Zimin A.V. *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisation*. Ed. A.L. Shestakov. Kostanay, KSU, 2014. 230 p.
29. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. *Mathematical Models for Decision-Making on Strategic Management of Industrial Enterprise in Conditions of Instability*. Leipzig: CEUR Workshop Proceedings, 2018, 2093, no. 2093. pp. 1–12.
30. Shestakov A.L., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Hollay A.V. *Modern Information Technologies and the Need for Improving the Quality of Organizational and Corporate Structures' Management*. *Proceedings – 2020. Global Smart Industry Conference, GloSIC-2020*, 2020, pp. 127–131. DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267861

Received 29 June 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Коренная, К.А. Основы эффективного управления промышленными предприятиями в современных условиях / К.А. Коренная, А.В. Голлай, О.В. Логиновский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 161–170. DOI: 10.14529/ctcr210316

FOR CITATION

Korennaya K.A., Hollay A.V., Loginovsky O.V. *Fundamentals of Effective Management of Industrial Enterprises in Modern Conditions*. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 161–170. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210316

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, № 3

16+

Редакторы: *С.И. Уварова, Н.Н. Егорьева*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 30.07.2021. Дата выхода в свет 06.08.2021. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 19,99. Тираж 500 экз. Заказ 253/263. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.