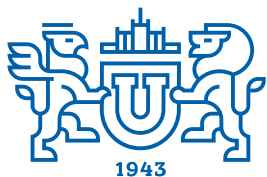


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2022
Т. 22, № 2

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. (*зам. гл. редактора*) (г. Челябинск);
Захаров В.В., *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

2022

Vol. 22, no. 2

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:

Loginosvkiy 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. (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Zakharov V.V., *executive secretary*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Barkalov S.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;

Berezansky L., PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;

Dzhaparov B.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan;

Zatonskiy A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;

Kulikov G.G., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;

Mazurov V.D., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;

Maksimov A.A., Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;

Melnikov A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;

Prangishvili A.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;

Shchepkin A.V., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

Yachikov I.M., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

Editorial Council:

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;

Ukhobotov V.I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Ushakov V.N., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

Shestakov I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;

Shiryayev V.I., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Schneider D.A., Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;

Shtessel Yu., PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика и вычислительная техника

ДМИТРИЕВ В.М., ГЕМБУХ Л.А. Концептуальная модель реально-виртуальной лаборатории	5
АНДРИЯНОВ Н.А., АТАХОДЖАЕВА М.Р., БОРОДИН Е.И. Математическое моделирование рекомендательной системы и обработка данных телекоммуникационной компании с помощью моделей машинного обучения	17
BUNOVA E.V., SEROVA V.S. Methodology for solving problems of classification of appeals/requests of citizens to the “hotline” of the President of the Russian Federation	29

Управление в технических системах

ТЕЛЕГИН А.И. Аналитическое решение первой задачи динамики манипуляторов с вращательными сочленениями	41
БАРКАЛОВ С.А., КАРПОВИЧ М.А., МОИСЕЕВ С.И. Метод анализа иерархий: подход, основанный на теории латентных переменных	58
БИЛЬФЕЛЬД Н.В., ВАРЛАМОВА С.А., ЗАХАРОВ В.В. Создание и тестирование моделей неопределенных систем	67
ЧЕРНЫШЕВ Н.Н., НИЖЕНЕЦ Т.В. Параметрическая оптимизация модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц	76

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

АЛАЛИ Ш., АЛХАДЖ ХАССАН Ф., ГАЙНУЛЛИНА Л.Р. Разработка портативного электромиографа для фиксации биоэлектрических потенциалов, возникающих в мышцах	87
---	----

Управление в социально-экономических системах

ЗАТОНСКИЙ А.В., СИРОТИНА Н.А. Управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края на основе конечно-разностной модели второго порядка	96
LOGINOVSKIY O.V., SHESTAKOV A.L., KORENNAYA K.A. Information and analytical support of strategic management of enterprises in global instability conditions	107
TASHKIN A.O., HOLLAY A.V. Development of a decision support system of city's social infrastructure accessibility based on GIS-technologies	122
АВЕРИНА Т.А., ЛАВРОВА Ю.С., МЕЛЬНИЧУК В.Н. Концепция трехфакторной модели цифровой экосистемы ЖКХ	132

Краткие сообщения

АВДЕЕВА Е.А., АВЕРИНА Т.А., БАЛАШОВА Н.А. Технологические прорывы как основополагающий фактор глобальной конкурентоспособности	141
САПОЖНИКОВ А.Ю., КУЛИКОВ Г.Г., КУЗНЕЦОВ А.А., ЮРЛОВ М.В. Управление знаниями на примере машиностроительного предприятия и вуза	148
ЦИБУЛИС Д.Э., РАГОЗИН А.Н., ДАРОВСКИХ С.Н., КУЛГАНАТОВ А.З. Исследование нелинейной цифровой фильтрации сигналов с использованием генеративно-состязательной нейронной сети	158

CONTENTS

Informatics and computer engineering

DMITRIEV V.M., GEMBUH L.A. A conceptual model of a real virtual laboratory	5
ANDRIYANOV N.A., ATAKHODZHAEVA M.R., BORODIN E.I. Mathematical modeling of recommender system and data processing of a telecommunications company using machine learning models	17
BUNOVA E.V., SEROVA V.S. Methodology for solving problems of classification of appeals/requests of citizens to the “hotline” of the President of the Russian Federation	29

Control in technical systems

TELEGIN A.I. Analytical solution of the first problem of dynamics of manipulators with rotational joints	41
BARKALOV S.A., KARPOVICH M.A., MOISEEV S.I. Analytic hierarchy process: An approach based on the theory of latent variables	58
BIL'FEL'D N.V., VARLAMOVA S.A., ZAKHAROV V.V. Creating and testing models of uncertainty systems	67
CHERNYSHEV N.N., NIZHENETS T.V. Particle swarm parametric optimization of a constrained state feedback controller	76

Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

ALALI Sh., ALHAJJ HASSAN F., GAINULLINA L.R. Development of a portable electromyograph for recording bioelectric potentials appearing in muscles	87
--	----

Control in social and economic systems

ZATONSKIY A.V., SIROTINA N.A. Management of the natural resource potential of the Perm region on the basis of a second-order finite-difference model	96
LOGINOVSKIY O.V., SHESTAKOV A.L., KORENNAYA K.A. Information and analytical support of strategic management of enterprises in global instability conditions	107
TASHKIN A.O., HOLLAY A.V. Development of a decision support system of city's social infrastructure accessibility based on GIS-technologies	122
AVERINA T.A., LAVROVA Yu.S., MELNICHUK V.N. The concept of a three-factor model of the digital ecosystem of housing and communal services	132

Brief reports

AVDEEVA E.A., AVERINA T.A., BALASHOVA N.A. Technological breakthroughs as a fundamental factor in global competitiveness	141
SAPOZHNIKOV A.Yu., KULIKOV G.G., KUZNETSOV A.A., YURLOV M.V. Knowledge management on the example of a machine-building enterprise and a higher education institution	148
TSIBULIS D.E., RAGOZIN A.N., DAROVSKIKH S.N., KULGANATOV A.Z. Study of nonlinear digital filtering of signals using generative competitive neural network	158

Информатика и вычислительная техника

Informatics and computer engineering

Научная статья
УДК 378.147
DOI: 10.14529/ctcr220201

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ РЕАЛЬНО-ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

В.М. Дмитриев, dmitriewvm@gmail.com

Л.А. Гембух, lev.gembuh@mail.ru

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, Россия*

Аннотация. В статье предложена структурно-функциональная схема реально-виртуальной лаборатории, определены основные блоки реально-виртуальной лаборатории и связи между ними. Для целей формализации введены модули информационного образования, иллюстрирующие преобразования каждым блоком входных и внутренних переменных и характеристик в выходные. Также кратко рассмотрены некоторые дистанционные реально-виртуальные лаборатории с приведением их структурных схем. Описаны элементы, входящие в дистанционные реально-виртуальные лаборатории, с приведением описания функций, выполняемых в лабораториях. **Цель.** Разработать концептуальную модель реально-виртуальной лаборатории, предложив ее структурно-функциональную схему и определив основные блоки реально-виртуальной лаборатории, их функции, а также связи между ними. **Методы.** Для разработки новой структуры для реально-виртуальной лаборатории необходим анализ известных научных результатов и практических решений, для чего используются научные публикации, размещенные в различных источниках на английском и русском языках, а также методы программирования современных контроллеров, средств их связи с компьютером и лабораторным оборудованием и методы сетевого программирования. **Результаты.** Сделан краткий обзор существующих дистанционных лабораторий с приведением их структуры и описанием механизма взаимодействия удалённого пользователя с лабораторией. Предложена структурно-функциональная схема реально-виртуальной лаборатории, определены ее основные блоки и связи между ними. Для целей формализации введены модули информационного преобразования, иллюстрирующие преобразования каждым блоком входных и внутренних переменных и характеристик в выходные. **Заключение.** В результате рассмотрения некоторых реализаций удалённых лабораторий был сделан вывод, что большинство из них построены с использованием зарубежной платной среды разработки. В связи с этим, принимая во внимание общую ситуацию в мире и конкретно в нашей стране, было сделано умозаключение, что разработка своей собственной реализации удалённой лаборатории в отечественной среде разработки – это необходимая мера. В работе представлена структурно-функциональная схема РВЛ, отражающая ее блочную структуру. Процесс функционирования лаборатории отражают модули информационного преобразования входных переменных и параметров в выходные характеристики. Данный формализм может быть использован для построения функциональной модели реально-виртуальной лаборатории.

Ключевые слова: реально-виртуальная лаборатория, модуль информационного преобразования, микроконтроллер, датчики, исполнители, управление экспериментом

Для цитирования: Дмитриев В.М., Гембух Л.А. Концептуальная модель реально-виртуальной лаборатории // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 5–16. DOI: 10.14529/ctcr220201

A CONCEPTUAL MODEL OF A REAL-VIRTUAL LABORATORY

V.M. Dmitriev, dmitriewvm@gmail.com

L.A. Gembuh, lev.gembuh@mail.ru

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Abstract. The article proposes a structural and functional scheme of a real-virtual laboratory, defines the main blocks of a real-virtual laboratory and the connections between them. For the purposes of formalization, information education modules have been introduced, illustrating the transformation of input and internal variables and characteristics into output by each block. Some remote real-virtual laboratories with the ghost of their structural schemes are also briefly considered. The elements included in remote real-virtual laboratories with ghost descriptions of functions performed in laboratories are described. **Goal.** To develop a conceptual model of a real-virtual laboratory, proposing its structural and functional scheme and defining the main blocks of a real-virtual laboratory, their functions, as well as the connections between them. **Methods.** To develop a new structure for a real-virtual laboratory, it is necessary to analyze known scientific results and practical solutions, for which scientific publications published in various sources in English and Russian are used, as well as programming methods of modern controllers, their means of communication with computers and laboratory equipment, and methods of network programming. **Results.** A brief overview of the existing remote laboratories with a ghost of their structure and a description of the mechanism of interaction of the remote user with the laboratory is made. A structural and functional scheme of a real-virtual laboratory is proposed, its main blocks and connections between them are determined. For the purposes of formalization, information transformation modules have been introduced, illustrating the transformation of each block of input and internal variables and characteristics into output. **Conclusion.** As a result of reviewing some of the remote laboratories' realizations, it was concluded that most of them were built using a foreign paid development environment. In this regard, taking into account the general situation in the world and specifically in our country, we can conclude that the development of its own implementation of a remote laboratory in the domestic development environment is a necessary measure. The paper presents a structural and functional scheme of the RVL, reflecting its block structure. The process of functioning of the laboratory reflects the modules of information transformation of input variables and parameters into output characteristics. This formalism can be used to build a functional model of a real-virtual laboratory.

Keywords: real-virtual laboratory, information transformation module, microcontroller, sensors, performers, experiment control

For citation: Dmitriev V.M., Gembuh L.A. A conceptual model of a real virtual laboratory. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(2): 5–16. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220201

Введение

Определение: Реально-виртуальной моделирующей структурой (РВМС) называется некоторое в общем случае программно-аппаратное решение, позволяющее объединить каналы реального и виртуального моделирования с целью комплексного анализа (отображения) и автоматизации построения модели объекта исследования [1].

РВМС, включающая оба названных канала, позволяет сохранить преимущества реального и виртуального каналов и минимизировать присущие им недостатки.

Ее частным случаем применительно к учебно-научным исследованиям является реально-виртуальная лаборатория (РВЛ).

Концепция РВЛ основывается на том, что проводимый исследователем эксперимент может строиться в реально-виртуальных моделирующих структурах. Под РВЛ далее будем понимать автоматизированный лабораторный комплекс для учебно-научных целей, локализованный в пространстве и имеющий сетевую двухстороннюю связь с пользователем.

РВЛ и виртуальные приборы для её функционирования реализованы на базе графической среды моделирования MAPC [2, 3].

Далее рассмотрим некоторые существующие автоматизированные комплексы, реализующие РВЛ.

1. Существующие реально-виртуальные лаборатории

ACEL (Automatic Control Engineering Laboratory) – это система дистанционных лабораторий, состоящая из лаборатории исследования сервомеханизмов и лаборатории исследования свойств магнитных полей. В данной системе передача данных между пользователем и сервером осуществляется по протоколу TCP/IP, что позволяет работать с лабораторией удаленно из любой точки, где есть интернет. На рис. 1 представлена структурная схема дистанционной лаборатории ACEL [4].

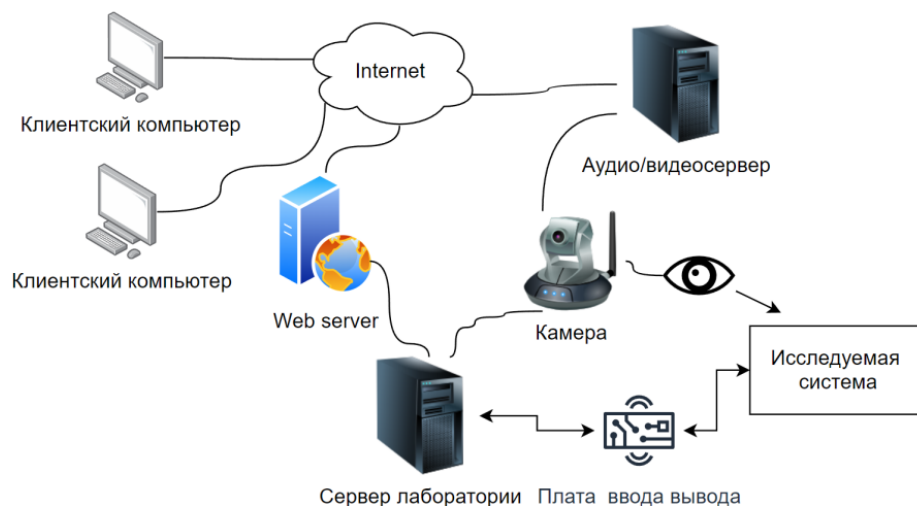


Рис. 1. Структурная схема системы ACEL
Fig. 1. Block diagram of the ACEL system

Лаборатория состоит из таких элементов, как: исследуемая система; сервер лаборатории; плата ввода-вывода для передачи данных между исследуемой системой и сервером лаборатории; сервер обработки аудио- и видеопотока; web-сервер для связи с удалённым пользователем; пользовательский интерфейс. Клиентская часть в виде отдельного приложения реализована в среде LabVIEW [5].

AIM-Lab (Automated Internet Measurement Laboratory) – это автоматизированная дистанционная лаборатория, предназначенная для исследования характеристик полевых транзисторов. Данная лаборатория является продуктом совместной работы Норвежского университета науки и технологии (NTNU) и политехнического института г. Хьеллер. Для измерений в лаборатории используются GPIB-устройства, подключённые по GPIB-шине (шине общего назначения) с выходом на web-сервер [6]. Структурная схема данной системы представлена на рис. 2.

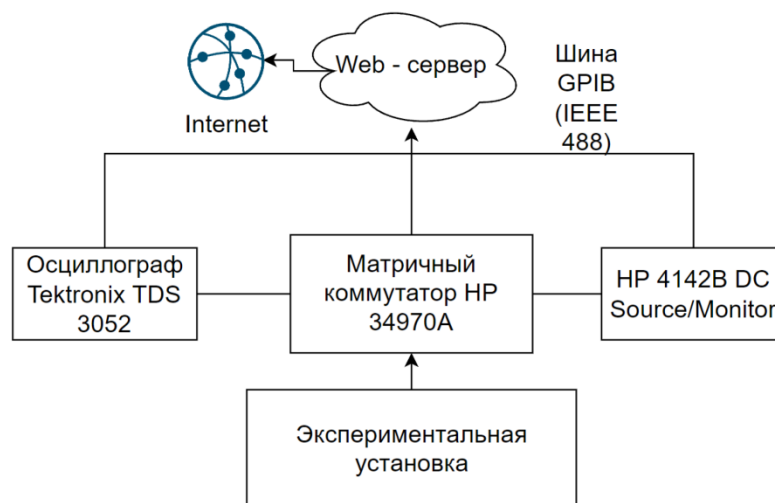


Рис. 2. Структурная схема системы AIM-Lab
Fig. 2. Structural diagram of the AIM-Lab system

Lab-on-Web – это лаборатория, предназначенная для изучения различных типовых устройств и схем, а также для демонстрации работы различных устройств и прогнозирования поведения более сложных схем. Изучение устройств и схем происходит при помощи интегральной схемы, на которой реализованы различные типовые структуры схем и устройств, изготовленные по технологии CMOS. Структура данной лаборатории представлена на рис. 3.

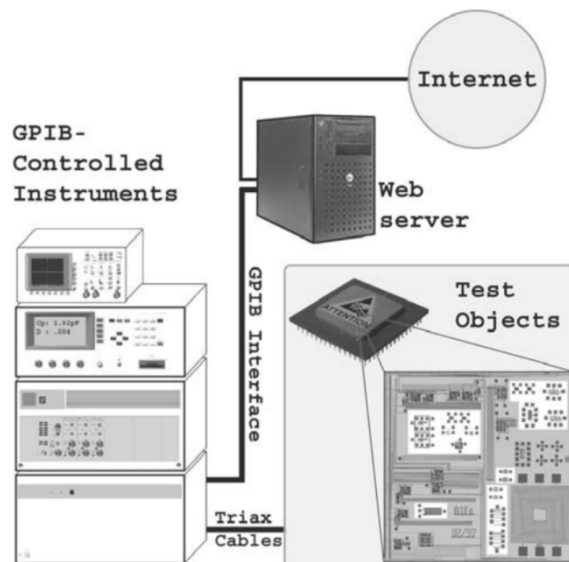


Рис. 3. Структурная схема системы Lab-on-Web
Fig. 3. Block diagram of the Lab-on-Web system

В AIM-Lab и Lab-on-Web пользовательский интерфейс реализован как в обычном интернет-браузере, так и в отдельном приложении. Приложение реализовано при помощи среды LabVIEW [7, 8].

Автоматизированный стенд для проведения лабораторных работ по электротехническим дисциплинам разработан в Черноморском инженерном институте ФГБОУ ВО «Донской ГАУ». Данный стенд используется в ряде дисциплин, связанных с изучением электроники, автоматике и автоматизированных систем управления технологическими процессами. Структурная схема данного стенда представлена на рис. 4.

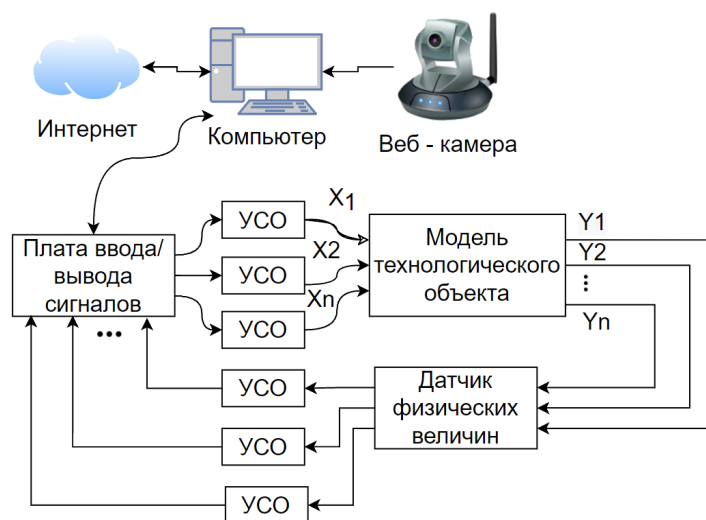


Рис. 4. Структурная схема автоматизированного стенда для проведения лабораторных работ по электротехническим дисциплинам
Fig. 4. Block diagram of an automated stand for laboratory work in electrical engineering disciplines

На схеме, представленной на рис. 4, при помощи устройств сопряжения задаются управляющие сигналы X_1, X_2, \dots, X_n и производятся измерения выходных величин Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Данный стенд разрабатывался для исследования асинхронного электропривода, но его структура позволяет исследовать и другие устройства. Для вывода данных со стенда на экран компьютера используется программа DataLogger компании Advantech [9].

Веб-лаборатория uCVLab. Данная лаборатория разработана в Новосибирском государственном техническом университете для исследования микроконтроллеров и сигнальных процессоров. На рис. 5 представлена структурная схема данной лаборатории [10, 11].

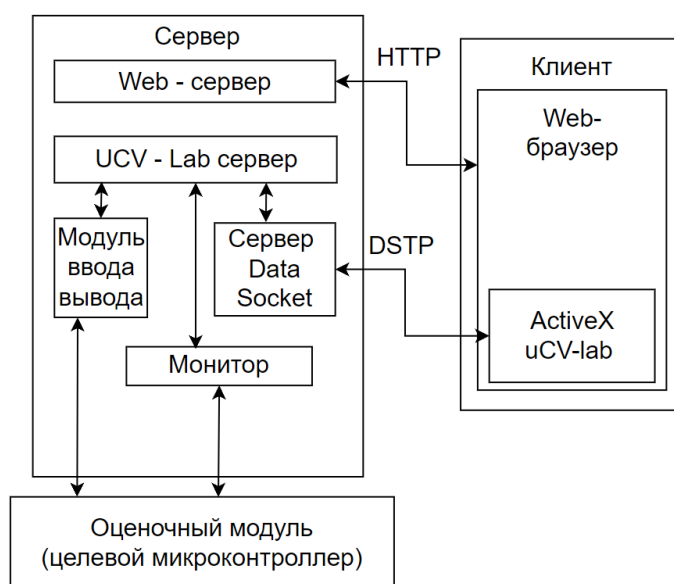


Рис. 5. Структурная схема веб-лаборатория uCVLab
Fig. 5. Block diagram of the uCVLab web lab

Модуль ввода-вывода встроен в персональный компьютер. На его основе реализованы: двухканальный осциллограф, двухканальный источник регулируемого напряжения постоянного тока, генератор импульсов регулируемой частоты, восемь индикаторов состояния, цифровой индикатор, четыре переключателя, четыре кнопки. Модуль ввода-вывода подключен к микроконтроллеру, обеспечивая возможность подавать сигналы на входы микроконтроллера и с помощью виртуальных измерительных приборов измерять отклик на входящие сигналы. Виртуальные приборы реализованы в среде LabVIEW.

Пользовательский интерфейс реализован как объект ActiveX, который встроен в страницу браузера, то есть пользователь получает доступ к взаимодействию с веб-лабораторией из своего браузера по протоколу HTTP. Передача данных между сервером и клиентом реализована с помощью протокола DSTP.

Как можно заметить, большинство из рассмотренных выше дистанционных реально-виртуальных лабораторий построены с использованием иностранной платной среды разработки LabVIEW. По сравнению с ними РВЛ будет строиться на основе своей собственной среды многоуровневого моделирования MARC. Данная среда разрабатывается на кафедре КСУП в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники. На её базе сформированы виртуальные приборы, позволяющие отображать результаты измерений, полученные с реальных устройств на экране компьютера.

Далее рассмотрим концептуальную модель РВЛ.

2. Подсистемы автоматизированного лабораторного комплекса

На рис. 6 приведен один из вариантов РВЛ, включающий в себя следующие основные подсистемы [12–15].



Рис. 6. Структурно-функциональная схема реально-виртуальной лаборатории с реальными объектами и виртуальными приборами
Fig. 6. Structural and functional diagram of a real-virtual laboratory with real objects and virtual devices

В соответствии с перечисленными функциями система РВЛ должна включать в себя следующие подсистемы: лабораторный макет, управляемые блоки питания, подсистемы сбора и передачи данных, датчики, микроконтроллер и драйвер, исполнительные блоки, экспериментальный стенд, управляющая подсистема, блок регистрации, блок обучения, блок контроля, блок проведения эксперимента и обработки результатов, блок формирования отчетов и выдачи протоколов.

2.1. Лабораторный макет

Лабораторный макет включает изучаемый реальный объект (установку), датчики физических величин, исполнительные устройства. При необходимости подключаются специализированные устройства согласования сигналов. В виртуальной лаборатории объект исследования через структуру формального отображения преобразуется в компьютерную модель, характеристики которой и подлежат исследованию.

Реальный объект может быть выполнен в виде лабораторной установки, технического устройства или технологического процесса и может располагаться как внутри, так и вне стен помещения, в котором расположена РВЛ.

Конкретизируем понятие лабораторного макета как совокупности лабораторных работ, объединенных в общем случае пространственно и (или) топологически:

$$LM = \bigcup_i L_i; P, T,$$

где L_i – i -я лабораторная установка; P и T – соответственно функции пространственного и топологического объединения лабораторных работ в интегрированный макет.

Будем различать объекты (структуры) электрической природы Se и объекты неэлектрической или смешанной природы Sn .

Рассмотрим сначала модели объектов типа Se . Объект может рассматриваться как компонент следующего вида (рис. 7).

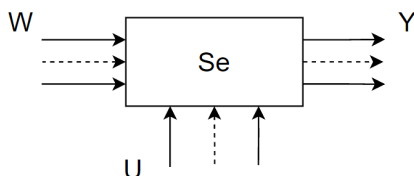


Рис. 7. Объект электрической природы
Fig. 7. An object of electrical nature

На рис. 7: W – множество входных переменных, токов и напряжений; Y – множество выходных (измеряемых) переменных сигналов; U – сигналы регулирования и управления объектом.

Если объект исследования имеет неэлектрическую природу, то его компонентное представление имеет вид (рис. 8).

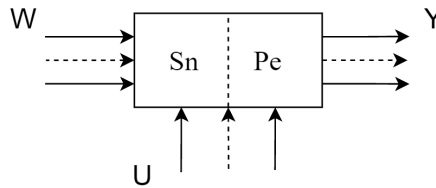


Рис. 8. Объект неэлектрической природы
Fig. 8. An object of non-electrical nature

На рис. 8: Pe – блок преобразователей, преобразующих неэлектрические величины W в электрические величины Y .

Обобщенный модуль информационного преобразования для объектов типа Se [16]:

$$\langle C_{\text{лр}}^j, P^j, W^j, U \rangle \Rightarrow \langle u, i \rangle,$$

где $C_{\text{лр}}^j$ – структура (компонентная цепь) i -й лабораторной установки; P^j – обобщенный вектор её внутренних параметров; W^j – вектор задающих воздействий; U – вектор управляющих воздействий; u, i – векторы потенциальных (напряжения) и потоковых (токи) переменных; j – текущий индекс.

Обобщенный модуль информационного преобразования для объектов типа Sn:

$$\langle C_{\text{лр}}^j, P^j, W^j, U \rangle \Rightarrow \langle V_p, V_f \rangle,$$

где V_p, V_f – соответственно потенциальная и потоковая переменные произвольной физической природы, действующие на объекте.

2.2. Регулируемый источник питания

Регулируемый источник питания (РИП) предназначен для получения питающих внешние устройства напряжений: постоянного регулируемого источника питания +15 В, 1 А; постоянного регулируемого источника питания –15 В, 1 А; постоянного нерегулируемого источника питания +5 В, 0,5 А.

В состав РИП входят: преобразователь напряжения сети в постоянные напряжения ($V_{\text{var}} \rightarrow V_{\text{const}}$), фильтрование пульсаций (Ft), стабилизаторы напряжений (St), интерфейсный модуль связи с РС (Ms), цифровой регулятор (ЦР), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП).

Следовательно, модуль информационного преобразования для блоков РИП примет вид

$$\langle V_{\text{var}} \rightarrow V_{\text{const}}, Ft, St, Ms, \text{ЦР}, \text{ЦАП} \rangle \rightarrow \langle V_u \rangle.$$

2.3. Датчики-преобразователи

К датчикам-преобразователям неэлектрической величины в электрическую относят, например, датчики сближения, термодатчики или датчики давления. Их компонентное представление имеет вид (рис. 9).

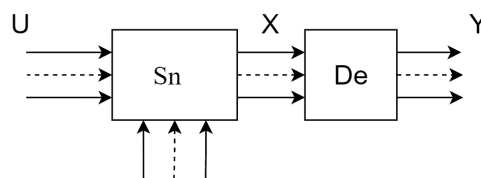


Рис. 9. Датчики-преобразователи
Fig. 9. Sensors-converters

В качестве выходных здесь могут быть такие характеристики электрической схемы, как амплитуда напряжения U и тока I , частота f и фаза ϕ переменного сигнала. Соответственно модуль информационного преобразования для таких датчиков имеет вид

$$\langle C_d^i, \mathbf{P}^i, F, M, v, w \rangle \Rightarrow \langle U, I, f, \varphi \rangle,$$

где C_d^i – структура (компонентная цепь) датчика; \mathbf{P}^i – геометрические параметры датчика; F, M – усилия и моменты, давление или температура; v, w – линейные и угловые скорости контролируемого объекта. В состав блока датчиков входит измерительный модуль, функцией которого является суммирование сигналов с нескольких чувствительных элементов, например, с помощью мостовых схем, и их последующее усиление.

2.4. Исполнительные элементы

К исполнителям обычно относят двигатели постоянного тока, серводвигатели и шаговые двигатели.

Соответственно модуль информационного преобразования для таких датчиков имеет вид

$$\langle C_d^i, \mathbf{P}^i, I, U, P_o \rangle \rightarrow \langle F, M, v, w \rangle,$$

где C_d^i – структура (компонентная цепь) исполнителя; \mathbf{P}^i – геометрические параметры исполнителя; I, U – токи и напряжения обмоток; P_o – выходная мощность контролируемого исполнителя. F, M – усилия и моменты; v, w – линейные и угловые скорости.

2.5. Лабораторное автоматизированное рабочее место

Лабораторное автоматизированное рабочее место содержит в своем составе персональный компьютер с установленным на нем специализированным программным обеспечением, он предназначен для обеспечения взаимодействия пользователя с объектом исследования. Наиболее эффективное использование локальных компьютеров производится в рамках компьютерного класса. В лабораториях такого класса используется отдельный сетевой сервер, через который организуется доступ к базе данных обучающей и контролирующей (допусковой контроль) подсистем. Этот же сервер может обеспечить доступ к подсистеме сбора данных, если она расположена за пределами класса, а также можно обеспечить режим «клиент-серверной» структуры для организации дистанционного проведения эксперимента с лабораторией.

2.6. Программируемый микроконтроллер

Микроконтроллер (МК) представляют собой законченную микропроцессорную МП-систему обработки информации, которая реализована в виде одной большой интегральной микросхемы. МК объединяет в пределах одного полупроводникового кристалла основные функциональные блоки МП управляющей системы: центральный процессор, ПЗУ, ОЗУ, периферийные устройства для ввода-вывода информации (рис. 10).

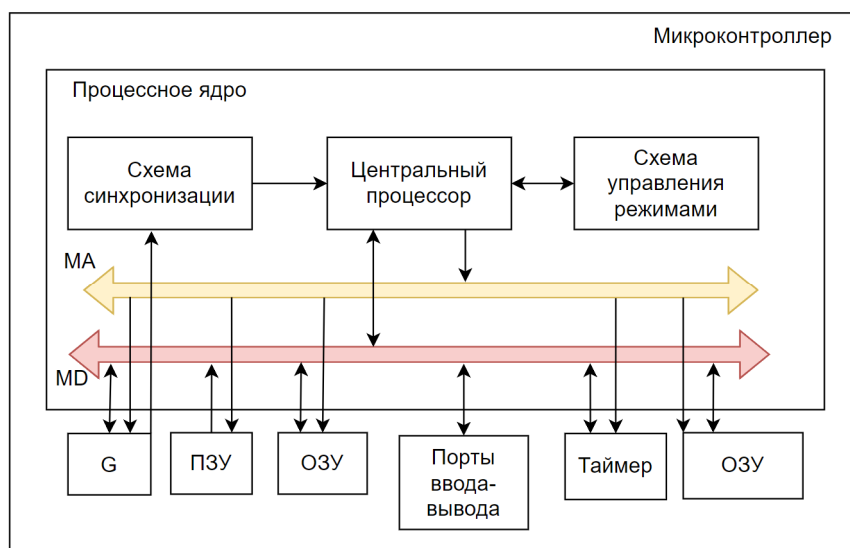


Рис. 10. Модульная организация микроконтроллера
Fig. 10. Modular organization of the microcontroller

Базовый функциональный блок или процессорное ядро МК включает: центральный процессор (ЦП), внутренние магистрали адреса, данных и управления (МА, МД), устройство управления режимами работы СУР, схему синхронизации для тактирования ЦП и межмодульных магистралей.

Соответственно модуль информационного преобразования для микроконтроллеров может иметь вид

$$\langle V_d, UB_i, \Pi_{io} \rangle \rightarrow \langle V_i \rangle,$$

где V_d – переменные сигналы с датчиков; UB_i – набор функциональных блоков МК; Π_{io} – порты ввода-вывода; V_i – сигналы исполнителям.

2.7. Блок генерирования сигналов

Генератор обеспечивает возможность задания формируемых сигналов одним из следующих способов: путем выбора одного из стандартных сигналов и задания его основных параметров (C_s, P^s), аналитически с помощью математических формул и библиотеки функций (C_A, P^A), в ручном режиме с помощью задания фиксированных точек (C_F, P^F).

Генератор обеспечивает формирование следующих стандартных сигналов: синусоидальной формы (Sin), треугольной (в т. ч. пилообразной) формы (Tr), прямоугольной формы (Pr), постоянный сигнал ($Const$).

Для каждого из перечисленных сигналов генератор обеспечивает возможность оперативного изменения его основных параметров (амплитуды, смещения и частоты) от компьютера.

Генератор обеспечивает формирование напряжения постоянной составляющей, сигналов синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы с амплитудой обычно в пределах динамического диапазона от -5 В до $+5$ В.

Тогда модуль информационного преобразования генератора примет вид

$$\langle C_s, P^s, C_A, P^A, C_F, P^F \rangle \rightarrow \langle Sin, Pr, Tr, Con \rangle.$$

2.8. Блок измерения

Основным элементом блока измерения является цифровой осциллограф.

Осциллограф цифровой двухканальный ОЦД (далее осциллограф) предназначен для исследования однократных и периодических электрических сигналов в диапазоне частот от 1 Гц до 100 кГц путем их регистрации в цифровой памяти и отображения на экране компьютера и цифрового измерения амплитудных и временных параметров, а также математической обработки результатов измерений.

Осциллограф обеспечивает автоматическую установку размеров изображения (автопоиск) постоянных, а также периодических сигналов с частотой от 50 Гц до 1 мГц и размахом от 200 мВ до 10 В по вертикали для обоих каналов и по горизонтали для активного канала в режиме внутренней синхронизации. Модуль информационного преобразования генератора может быть записан в виде

$$\langle V_i, P^s, P^u, P^r, N \rangle \rightarrow \langle A(V_o), f(V_o), \varphi(V_o) \rangle.$$

Здесь V_i – входной сигнал; P^s – параметры блока синхронизации; P^u – параметры блока усиления; P^r – параметры развертки; N – число каналов; A, f, φ – соответственно амплитуда, частота и фаза выходного сигнала V_o , отображаемого на осциллографе.

2.9. Блоки обработки сигналов

В общем случае эти блоки представляют собой функционал от первичного выходного сигнала от объекта, который, в свою очередь, подается на блок обработки сигналов (БОС).

Осциллограф обеспечивает следующие дополнительные режимы работы: хранение в памяти сигналов, количество которых ограничивается только объемом свободной памяти управляющего компьютера; хранение в памяти состояний панели и сигналов; обработка сигнала, записанного в памяти; усреднение периодических сигналов; сложение и вычитание сигналов по двум каналам; спектральный анализ сигнала (прямое быстрое преобразование Фурье); сравнение измеряемого сигнала с заданными верхними и нижними значениями амплитуды сигнала; сравнение выбран-

ного параметра измеряемого сигнала с заданной величиной. Развертка останавливается, когда величина параметра сигнала становится меньше/больше заданной.

Тогда модуль информационного преобразования для блоков БОС примет вид

$$\langle V_o, F_1(\mathbf{P}^i, V_o) \dots F_n(\mathbf{P}^n, V_o) \rangle \rightarrow \langle \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n \rangle.$$

Здесь на входе – функционалы от сигнала V_o и их параметры \mathbf{P}^i , на выходе – параметризованные характеристики сигнала. Управление указанными режимами осуществляется через меню.

2.10. Управляющая система

Управляющая подсистема включает в себя: регистрацию пользователя для выдачи ему соответствующих прав, блок регистрации студентов, блок обучения (отсылка к учебникам и методическим материалам), блок контроля исходных знаний, блок проведения эксперимента и обработки результатов, блок формирования отчетов и выдачи протоколов.

Управляющая подсистема связывает воедино все подсистемы и блоки РВЛ, обеспечивая необходимую последовательность прохождения основных этапов лабораторной работы. Она обеспечивает: регистрацию пользователя для выдачи ему соответствующих прав; содержит блок обучения, включающий описание объекта исследования и способы настройки его на нужный режим, а также необходимые методические указания; блок контроля с позволяет оперативно произвести допусковой контроль учащихся с целью определения их готовности к проведению лабораторного эксперимента; блок проведения эксперимента и обработки результатов представляет пользователю все необходимые инструменты для исследования различных сигналов; для обработки результатов используются программы цифровой обработки сигналов; блок формирования отчетов и выдачи протоколов обеспечивает хранение и документирование отчетов.

$$\langle \text{Reg, Lern, Contr, Exp, Vod} \rangle \rightarrow \langle \text{Report} \rangle.$$

Здесь в левой части информационного модуля все опции по подготовке и проведению лабораторного эксперимента, а в правой части – отчетная форма.

Заключение

В работе представлена структурно-функциональная схема РВЛ, отражающая ее блочную структуру. Процесс функционирования лаборатории отражают модули информационного преобразования входных переменных и параметров в выходные характеристики. Данный формализм может быть использован для построения структурно-функциональных моделей реально-виртуальных лабораторий.

Список литературы

1. СВИП – система виртуальных инструментов и приборов / В.М. Дмитриев, Т.В. Ганджа, В.В. Ганджа, Ю.И. Мальцев. Томск: В-Спектр, 2014. 216 с.
2. МАРС – среда моделирования технических устройств и систем / В.М. Дмитриев, А.В. Шутенков, Т.Н. Зайченко, Т.В. Ганджа. Томск: В-Спектр, 2011. 278 с.
3. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Панов С.А. Система виртуальных инструментов и приборов для автоматизации учебных и научных экспериментов // Международный журнал «Программные продукты и системы». 2016. Т. 32. С. 154–162. DOI: 10.15827/0236-235X.115.154-162
4. Naumovic M.B., Zivanovic D. Remote Experiments in Control Engineering Education Laboratory // International Journal of Online Engineering. 2008. Vol. 4, no. 2. P. 48–53. DOI: 10.3991/ijoe.v4i2.447
5. Тревис Д. LabVIEW для всех: пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2004. 537 с.
6. AIM-Lab: a system for remote characterization of electronic devices and circuits over the Internet / T.A. Fieldly, M.S. Shur, H. Shen, T. Ytterdal // Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems. 2000. P. I43/1–I43/6. DOI: 10.1109/ICCDACS.2000.869858
7. Fjeldly T.A., Stradman O.J., Berntzen R. Lab-on-Web – A Comprehensive Electronic Device Laboratory On A Chip Accessible Via Internet // International Conference on Engineering Education. Manchester, U.K., 2002. P. 1–5.
8. Fjeldly T.A., Shur M.S., Shen H., Ytterdal T. AIM-Lab: Lab-on-Web: performing device characterization via Internet using modern Web technology // Proceedings of the Fourth IEEE In-

ternational Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems. 2002. P. I022–I022. DOI: 10.1109/ICCDSCS.2002.1004079

9. Лебедев К.Н., Лебедев П.К. Автоматизированный стенд для проведения лабораторных работ по электротехническим дисциплинам // *Агротехника и энергообеспечение*. 2020. № 4 (29). С. 64–71.

10. Виртуальная лаборатория для дистанционного обучения методам проектирования микропроцессорных систем / Е.Д. Баран, Н.В. Голошевский, П.М. Захаров, Б.М. Рогачевский // *Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National instruments: сб. тр. конф.* М.: Российский университет дружбы народов, 2003. С. 28–31.

11. Баран Е.Д., Любенко А.Ю. Лабораторный практикум для дистанционного обучения общетехническим дисциплинам. URL: https://nitech.nstu.ru/library/publications/articles/pdf/nitech_lab_practice.pdf (дата обращения: 5.03.2022).

12. Компьютерное моделирование физических задач / В.М. Дмитриев, А.Ю. Филиппов, Т.В. Ганджа, И.В. Дмитриев. Томск: В-Спектр, 2010. 248 с.

13. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В. Среда многоуровневого моделирования химико-технологических систем. Томск: Изд-во ТГУ, 2017. 330 с.

14. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В. Элементы и устройства роботизированных систем. Томск: Изд-во ТУСУР, 2020. 355 с.

15. Программно-аппаратное и информационное обеспечение лаборатории элементов и устройств роботизированных систем / В.М. Дмитриев, В.М. Рулевский, Т.В. Ганджа и др. Томск: Изд-во ТУСУР, 2021. 185 с.

16. Дмитриев В.М., Арайс Л.А., Шутенков А.В. Автоматизация моделирования промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1995. 300 с.

References

1. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V., Gandzha V.V., Maltsev J.I. *SVIP – sistema virtual'nykh instrumentov i priborov* [SVIP – system of virtual instruments and devices]. Tomsk: V-Spektr Publ.; 2014. 216 p. (In Russ.)

2. Dmitriyev V.M., Shutenkov A.V., Zaychenko T.N., Gandzha T.V. *MARS – sreda modelirovaniya tekhnicheskikh ustroystv i sistem* [MARS – environment for modeling technical devices and systems]. Tomsk: V-Spektr Publ.; 2011. 278 p. (In Russ.)

3. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V., Panov S.A. The system of virtual instruments and devices for education and scientific experiment automation. *International journal "Programmnye produkty i sistemy"*. 2016;32:154–162. (In Russ.) DOI: 10.15827/0236-235X.115.154-162

4. Naumovic M.B., Zivanovic D. Remote Experiments in Control Engineering Education Laboratory. *International Journal of Online Engineering*. 2008;4(2):48–53. DOI: 10.3991/ijoe.v4i2.447

5. Travis D. *LabVIEW for Everyone*. New Jersey, Prentice Hall; 2001. 589 p. (Russ ed: Trevis D. *LabVIEW dlya vseh: per. s angl.* [LabVIEW for Everyone]. Moscow: DMK Publ.; 2004. 537 p.)

6. Fieldly T.A., Shur M.S., Shen H., Ytterdal T. AIM-Lab: a system for remote characterization of electronic devices and circuits over the Internet. In: *Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*; 2000. P. I43/1–I43/6. DOI: 10.1109/ICCDSCS.2000.869858

7. Fjeldly T.A., Stradman O.J., Berntzen R. Lab-on-Web – A Comprehensive Electronic Device Laboratory On A Chip Accessible Via Internet. In: *International Conference on Engineering Education*. Manchester, U.K.; 2002. P. 1–5.

8. Fjeldly T.A., Shur M.S., Shen H., Ytterdal T. AIM-Lab: Lab-on-Web: performing device characterization via Internet using modern Web technology. In: *Proceedings of the Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*; 2002. P. I022–I022. DOI: 10.1109/ICCDSCS.2002.1004079

9. Lebedev K.N., Lebedev P.K. [Automated stand for laboratory work in electrical engineering disciplines]. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2020;4(29):64–71. (In Russ.)

10. Baran E.D., Goloshevskiy N.V., Zakharov P.M., Rogachevskiy B.M. [Virtual laboratory for distance learning of microprocessor system design methods]. In: *Obrazovatel'nyye, nauchnyye i inzhenernyye prilozheniya v srede LabVIEW i tekhnologii National instruments: sb. tr. konf.* [Educational, scien-

tific and engineering applications in the LabVIEW environment and National instruments technology]. Moscow, RUDN University; 2003. P. 28–31. (In Russ.)

11. Baran E.D., Lyubenko A.Yu. *Laboratornyy praktikum dlya distantsionnogo obucheniya obshchetechnicheskimi distsiplinami* [Laboratory workshop for distance learning in general technical disciplines]. Available at: https://nitech.nstu.ru/library/publications/articles/pdf/nitech_lab_practice.pdf (accessed 5.03.2022). (In Russ.)

12. Dmitriyev V.M., Filippov A.Yu., Gandzha T.V., Dmitriyev I.V. *Komp'yuternoye modelirovaniye fizicheskikh zadach* [Computer modeling of physical problems]. Tomsk: V-Spektr Publ.; 2010. 248 p. (In Russ.)

13. Dmitriyev V.M., Gandzha T.V. *Sreda mnogourovnevnogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem* [Environment of multilevel modeling of chemical and technological systems]. Tomsk: TSU Publ.; 2017. 330 p. (In Russ.)

14. Dmitriyev V.M., Shutenkov A.V., Gandzha T.V. *Elementy i ustroystva robotizirovannykh sistem* [Elements and devices of robotic systems]. Tomsk: TUSUR Publ.; 2020. 355 p. (In Russ.)

15. Dmitriyev V.M., Rulevskiy V.M., Gandzha T.V., Kochergin M.I., Moskalenko N.V. *Programmno-apparatnoye i informatsionnoye obespecheniye laboratorii elementov i ustroystv robotizirovannykh sistem* [Software, hardware and information support of the laboratory of elements and devices of robotic systems]. Tomsk: TUSUR Publ., 2021. 185 p. (In Russ.)

16. Dmitriyev V.M., Arays L.A., Shutenkov A.V. *Avtomatizatsiya modelirovaniya promyshlennykh robotov* [Automation of industrial robot modeling]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1995. 300 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Дмитриев Вячеслав Михайлович, д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; dmitriewvm@gmail.com.

Гембух Лев Алексеевич, аспирант кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия; lev.gembuh@mail.ru.

Information about the authors

Vyacheslav M. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Computer Systems in Management and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; dmitriewvm@gmail.com.

Lev A. Gembuh, Postgraduate Student of the Department of Computer Systems in Management and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia; lev.gembuh@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.03.2022

The article was submitted 17.03.2022

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ КОМПАНИИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Н.А. Андриянов, naandriyanov@fa.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-7697>

М.Р. Атаходжаева, atakhodzhaeva01@gmail.com

Е.И. Бородин, eiborodin2021@edu.fa.ru

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия

Аннотация. Цель исследования: разработка методов моделирования данных для разработки рекомендательных алгоритмов с использованием дважды стохастических авторегрессионных моделей случайных процессов и проверка их адекватности путем применения алгоритмов машинного обучения для кластеризации пользователей в имитируемом наборе данных и прогнозирования вероятностей интереса. **Методы исследования.** В статье рассмотрены методы, используемые при построении рекомендательных систем. При этом рассмотрена задача моделирования поведения пользователей с помощью дважды стохастической модели. Данная модель предложена для генерации искусственных данных. Дважды стохастическая модель позволяет генерировать нестационарные процессы, таким образом, создает пользователей с разными вероятностными свойствами в разных группах объектов интереса. После этого искусственно созданные пользователи (и их активность) кластеризуются на основе модифицированного алгоритма K-средних. Основная модификация заключается в необходимости автоматической предварительной оценки числа кластеров, а не его выбора человеком. Далее моделируется поведение представителей каждой группы пользователей для новых событий. На основе сгенерированной информации и обучающих данных решается задача прогнозирования и ранжирования предлагаемых услуг. При этом на первом этапе использования регрессионных моделей достаточно для отнесения пользователя к группе и формирования предложений данному пользователю. **Результаты исследования.** На обучающих данных в 2 кластерах были достигнуты высокие индексы детерминации, что говорит примерно о 90 % объясненной дисперсии при использовании предложенной дважды стохастической модели. Особое внимание уделено работе современных рекомендательных систем на примере системы «Диско» от Яндекс. Кроме того, выполнена предобработка и предварительный анализ данных реального сектора, а именно: исследуются данные телекоммуникационной компании. С целью выдачи релевантных предложений по услугам связи разработана тестовая рекомендательная система. **Заключение.** Таким образом, к основным результатам работы относится математическая модель, симулирующая реакцию пользователей на различные услуги, а также модель логистической регрессии, используемая для прогнозирования вероятности заинтересованности пользователя новой услугой. На основе прогнозируемых вероятностей не составляет труда ранжирование новых предложений. Аprobация на синтезированных данных показала высокую эффективность модели.

Ключевые слова: рекомендательные системы, математическое моделирование, дважды стохастическая модель, логистическая регрессия, машинное обучение

Для цитирования: Андриянов Н.А., Атаходжаева М.Р., Бородин Е.И. Математическое моделирование рекомендательной системы и обработка данных телекоммуникационной компании с помощью моделей машинного обучения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 17–28. DOI: 10.14529/ctcr220202

MATHEMATICAL MODELING OF RECOMMENDER SYSTEM AND DATA PROCESSING OF A TELECOMMUNICATIONS COMPANY USING MACHINE LEARNING MODELS

N.A. Andriyanov, naandriyanov@fa.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0735-7697>

M.R. Atakhodzhaeva, atakhodzhaeva01@gmail.com

E.I. Borodin, eiborodin2021@edu.fa.ru

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study is to develop data modeling methods for projecting recommender algorithms using doubly stochastic autoregressive models of random processes and checking their adequacy by applying machine learning algorithms to cluster users in a simulated data set and predict probabilities of interest. **Research methods.** The article discusses the methods used in the construction of recommender systems. At the same time, the problem of modeling user behavior using a doubly stochastic model is considered. This model is proposed for generating artificial data. The doubly stochastic model allows generating non-stationary processes, thus creating users with different probabilistic properties in different groups of objects of interest. After that, artificially created users (and their activity) are clustered based on a modified K-means algorithm. The main modification is the need for automatic pre-estimation of the number of clusters, and not its choice by a person. Next, the behavior of representatives of each user group for new events is modeled. Based on the generated information and training data, the problem of predicting and ranking the services offered is solved. At the same time, at the first stage, the use of regression models is sufficient to assign users to a group and form offers for this user. **Results of the study.** On the training data in 2 clusters, high determination indices were achieved, which indicates approximately 90% of the explained variance when using the proposed doubly stochastic model. Particular attention is paid to the work of modern recommender systems on the example of the Disco system developed by Yandex. In addition, pre-processing and preliminary analysis of data from the real sector was performed, namely, the data of a telecommunications company are being studied. For the purpose of issuing relevant proposals for communication services, a test recommender system has been developed. **Conclusion.** Thus, the main results of the work include a mathematical model that simulates the reaction of users to various services, as well as a logistic regression model used to predict the probability of a user's interest in a new service. Based on predicted probabilities, it is not difficult to rank new proposals. Approbation on the synthesized data showed the high efficiency of the model.

Keywords: recommender systems, mathematical modeling, doubly stochastic model, logistic regression, machine learning

For citation: Andriyanov N.A., Atakhodzhaeva M.R., Borodin E.I. Mathematical modeling of recommender system and data processing of a telecommunications company using machine learning models. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):17–28. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220202

Введение

Рынок рекомендательных систем в Российской Федерации (РФ) безостановочно растет. Рынок искусственного интеллекта (ИИ) в целом в РФ в 2018 г. составил 189 млрд руб., а к 2024 г. предсказывают, что он увеличится до 907 млрд руб. по данным CNews [1]. Данный показатель включает в себя выручку компаний в сфере искусственного интеллекта, выручку прочих ИТ-компаний, которые разрабатывают продукты благодаря ИИ, и прирост выручки компаний из различных отраслей экономики, который был получен благодаря данной технологии.

По мнению специалистов Сбербанк, в ближайшее время востребованность рекомендательных систем и интеллектуальных систем поддержки принятия решений будет высокой в рыночном, инфраструктурном, социальном секторах, а также в секторах государственного управления и безопасности. В табл. 1 представлена оценка технологий Сбербанком [2].

Таблица 1

Востребованность технологий

Table 1

Demand for technologies

Суб-СЦТ	Рыночные сектора	Инфраструктурные сектора	Социальная сфера	Госуправление и безопасность
Компьютерное зрение	Высокая	Высокая	Средняя	Средняя
Обработка естественного языка	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Распознавание и синтез речи	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя
Рекомендательные системы и интеллектуальные системы поддержки принятия решений	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Перспективные методы развития технологий ИИ	Средняя	Низкая	Низкая	Низкая
Нейростимуляция и нейросенсинг	Средняя	Низкая	Высокая	Низкая
Нейропротезирование и нейроинтерфейсы	Высокая	Низкая	Высокая	Средняя

Однако в компьютерном зрении и обработке естественного языка существует множество данных, и их сбор зачастую не составляет особого труда. В то же время для разработки рекомендательных систем требуются специфические наборы данных, получение которых, как правило, весьма проблематично. В первую очередь, это связано с тем, что сбор таких данных доступен в крупных компаниях с множеством пользователей и услуг.

Существует три основных подхода, при комбинации которых формируется пул предложений для пользователя. Рассмотрим их на примере системы «Диско» от Яндекс.

Первый связан с анализом контента и основан на выявлении связей определенного объекта с производителем, брендом, страной распространения, целевой группой, группой товаров или на выявлении иных характеристик [3]. Приводится допущение, что заинтересованность в каком-либо жанре, виде продукта или компании влияет на возможную приверженность к объектам из данных кластеров. Система «Диско» предлагает продукты, услуги или контент тех брендов, типов или форм, к которым ранее уже обращался данный пользователь. Такой подход применим к тем потребителям, которые уже имеют свой трек в системе.

Второй подход основан на анализе пользователей (в Яндексе – из Крипты), сгруппированных по возрасту, полу, местоположению или роду занятий [4]. В данной ситуации делается допущение, что схожие пользователи будут интересоваться одинаковыми объектами в сервисах. Следовательно, «Диско» предлагает клиенту то, что уже было употреблено пользователями со схожими параметрами. Метод распространен не только среди устоявшихся пользователей сервиса, но и применим для так называемого холодного старта: новые клиенты еще не оставили информацию о своих предпочтениях в сервисе. Поэтому рекомендательная система генерирует предложения для новых пользователей даже с учетом того, что они еще не известны сервису.

Последний метод связан с персональными оценками пользователей потребляемого контента, товаров или услуг [5]. Оценкой может служить лайк, факт наличия комментария или время просмотра ролика. «Диско» формирует представление о будущей реакции пользователей на контент еще до его просмотра. Такой подход учитывает не только связь пользователей между собой и связи объектов по характеристикам, но и позволяет выделить нетривиальные закономерности между разрозненными группами на основе оценок потребителей.

Известны также и гибридные алгоритмы [6]. Таким образом, все указанные подходы опираются на реальные данные. Недостатком является необходимость накопления данных для разработки качественных алгоритмов и проверки их адекватности. С другой стороны, такие системы и их ошибки не являются критическими. При этом, по сути, задача предложения рекомендации пользователю сводится к задаче ранжирования. Последняя же задача может быть сведена к про-

гнозированию вероятности интереса к продукту. В связи с этим возникает задача моделирования действий пользователей на основе некоторого вероятностного распределения. Однако важно оставить корреляционные связи между вероятностями, поскольку шумовые независимые данные не могут адекватно описывать поведение пользователей. Другими словами, мы с большой вероятностью ожидаем от пользователя похожих действий для похожих продуктов и услуг.

Для моделирования вероятностей интереса к продукту можно использовать авторегрессионные модели [7–9]. К сожалению, их недостатком является достаточно высокая «колючесть» генерируемых данных и, как правило, небольшой интервал корреляции. Еще одним классом моделей прогнозирования вероятности являются модели с кратными корнями характеристических уравнений [10, 11]. Такие модели обеспечивают более гладкие изменения в генерируемых процессах, однако не могут адекватно спрогнозировать изменение свойств в таких данных. С целью генерации неоднородных и нестационарных массивов были предложены дважды стохастические модели [12–14]. Такие модели также хорошо себя зарекомендовали в задачах аугментации данных, в том числе многомерных [15]. Однако такие модели могут генерировать данные в произвольном диапазоне. С одной стороны, можно ввести пороговые ограничения, но тогда будет отбрасываться важная информация, характеризующая разницу между генерируемыми числами за порогами. В таком случае можно использовать модель функции softmax [16] для перевода в интервал вероятностей – (0; 1).

Далее рассмотрим используемую модель, сгенерируем обучающие и тестовые данные и предложим варианты прогнозирования рекомендаций. В конце статьи будут представлены результаты предварительной обработки для реальных данных телекоммуникационной компании.

1. Моделирование активности пользователей

Пусть имеется $N = 20$ пользователей и $M = 100$ различных услуг. При этом услуги принадлежат 5 категориям, описываемым интервалами от 1 до 20, от 21 до 40 и т. д. Таким образом, требуется коррелированное поведение пользователя внутри каждой категории и неоднородность при смене категорий.

Для заполнения матрицы случайными числами, имитирующими активность пользователей, воспользуемся дважды стохастической моделью вида

$$A_{ik} = A_{i-1k}\rho_k + \sigma_{Ak}\sqrt{1-\rho_k^2}\xi_i, \quad i=1, \dots, M, \quad k=1, \dots, M/20, \quad \hat{A}_{ik} = A_{ik} + m_{Ak}, \quad (1)$$

где \hat{A} – вектор реакций пользователя на услуги; ρ_k – корреляция в k -й категории; σ_{Ak} – стандартное отклонение реакции в k -й категории; ξ_i – случайная нормальная добавка с нулевым средним и единичной дисперсией; m_{Ak} – средняя реакция пользователя в k -й категории.

Следует отметить, что выражение (1) описывает поведение одного пользователя, а система таких выражений будет описывать действие N пользователей.

Генерация такой модели для произвольно выбранных пользователей представлена на рис. 1. Для различных категорий параметры модели были заданы, как

$$\sigma_A = [1; 2; 3; 5; 0,5], \quad r_A = [0,9; 0,65; 0,92; 0,99; 0,8], \quad m_A = [0; -1; 1; -1; 2].$$

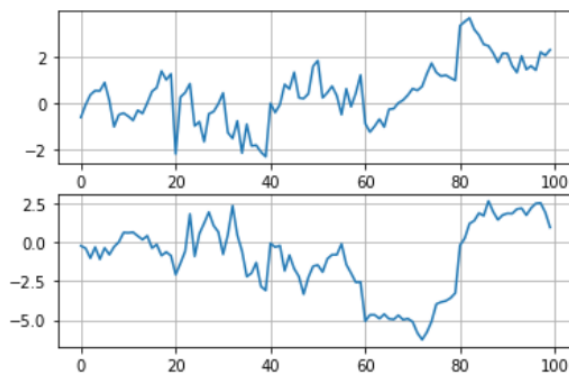


Рис. 1. Реализация дважды стохастической модели для имитации активности пользователей
Fig. 1. Implementation of a doubly stochastic model to simulate user activity

Анализ представленного рис. 1 показывает, что по форме реализаций можно сделать вывод, что сгенерированы похожие вероятности реакции пользователей для большинства категорий. Однако для услуг, например, 4-й категории значения получились сильно отличающимися. Это свидетельствует об адекватности моделирования поведения, поскольку добавляет индивидуальности пользователям.

На втором этапе для перехода к вероятностям необходимо сделать преобразование вида

$$p_i = \frac{1}{1 + \exp(-A_i - bn_i)}, \quad (2)$$

где b – произвольный коэффициент, а n_i – независимые случайные величины с нормальным законом распределения, нулевым средним и единичной дисперсией. Наличие данного слагаемого позволяет контролировать уровень «случайности поведения» при преобразовании полученных значений дважды стохастических моделей в значения вероятности. В показателе экспоненты присутствует смесь информационного сигнала с шумом, имеющим определенный вес.

На рис. 2 представлены вероятности, соответствующие реализациям из рис. 1. Реализации получены в условиях отсутствия шума, т. е. при $b = 0$.

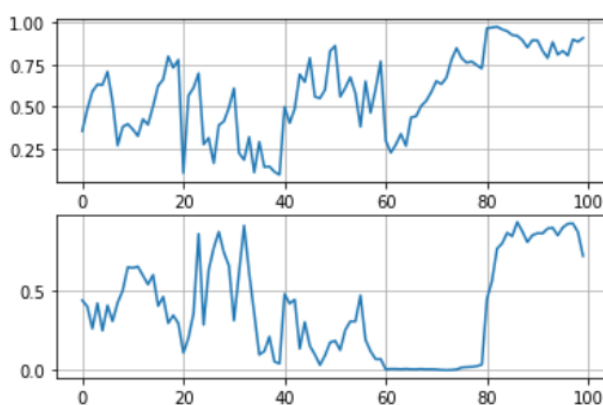


Рис. 2. Вероятности активности пользователя ($b = 0$)
Fig. 2. Probabilities of user activity ($b = 0$)

На рис. 3 представлены вероятности, соответствующие реализациям из рис. 1, при $b = 1$.

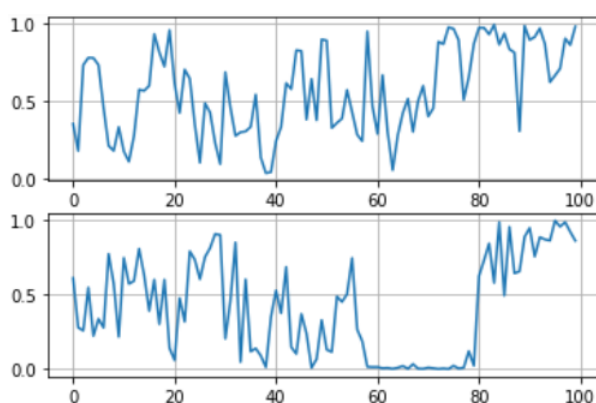


Рис. 3. Вероятности активности пользователя ($b = 1$)
Fig. 3. User activity probabilities ($b = 1$)

Видим, что реализации на рис. 3 имеют уже большую дисперсию и изменяются резко. Варьируя параметры модели, можно моделировать различные данные для заполнения матрицы обучающих систем. При этом саму покупку услуги можно моделировать, используя данную вероятность либо просто выбирая порог. Например, для вероятностей больше 0,7 на пересечении

пользователя и услуги ставится «покупка». Это позволит перейти к бинарному представлению данных.

Далее рассмотрим идею обучения модели для прогнозирования реакции на новые услуги.

2. Обучение и ранжирование новых данных

Для начала выполним кластеризацию пользователей для случая $b = 0$. Модификация алгоритма К-средних [17] подразумевает наличие предварительной стадии, на которой определяется оптимальное число кластеров.

На рис. 4 показаны результаты применения метода локтя, на рис. 5 – метода силуэта [18].

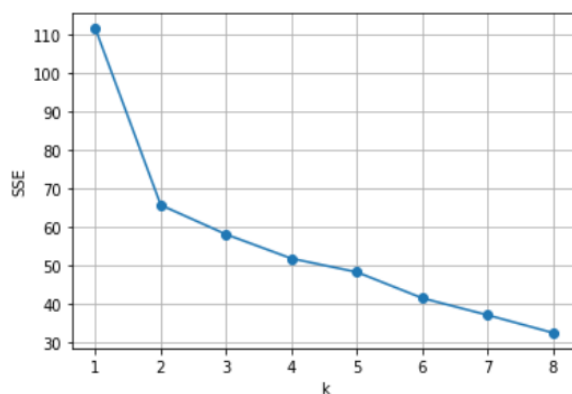


Рис. 4. Метод локтя
Fig. 4. Elbow Method

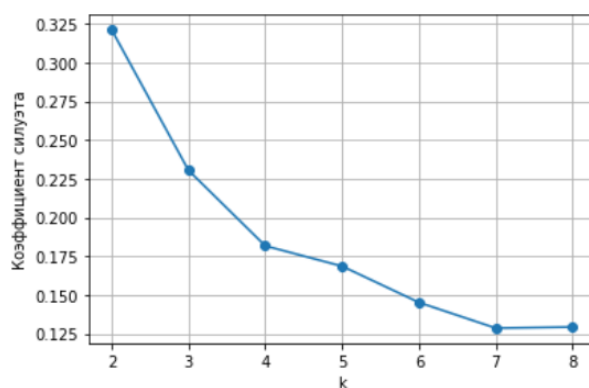


Рис. 5. Метод силуэта
Fig. 5. Silhouette method

Таким образом, наиболее предпочтительно разделение пользователей на 2 кластера. Разделение происходит в пропорции 9 на 11.

Рис. 6 демонстрирует разделение на кластеры по 1-й и 20-й услугам.

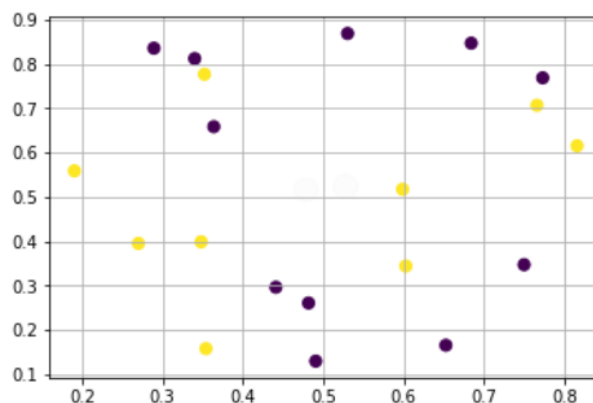


Рис. 6. Пример кластеризации в пространстве 2 признаков
Fig. 6. An example of clustering in the space of 2 features

Далее для обучения можно выбрать по 3–4 представителя каждого кластера. Сгенерировать их поведение для 5 новых услуг аналогично выражениям (1) и (2). Для прогнозов других пользователей в кластере можно построить модель логистической множественной регрессии на основе обучающего набора данных. Затем в соответствии с полученной моделью генерируется вероятность интереса к новой услуге, а сами услуги ранжируются по вероятности. Предлагаются те, которые заинтересуют пользователя с наибольшей вероятностью. Отметим, что для сгенерированных обучающих данных индексы детерминации в первом и втором кластерах составили $R_1^2 = 0,91$ и $R_2^2 = 0,86$ соответственно при $b = 0$. В табл. 2 рассмотрены оценки индексов детерминации при различных значениях b .

Таблица 2
Зависимость предсказательной способности модели
от коэффициента случайности действий пользователя

Table 2

Dependence of the predictive ability of the model
on the coefficient of randomness of user actions

b	0	1	2
R_1^2	0,91	0,73	0,52
R_2^2	0,86	0,71	0,54

Анализ данных табл. 2 показывает, что при увеличении «шума» при действиях пользователя качество модели падает.

Далее рассмотрим предобработку данных в рекомендательной системе телекоммуникационной компании.

3. Предобработка данных телекоммуникационной компании

В данном разделе выполняется предварительная обработка данных для разработки рекомендательной системы услуг для абонентов Tele2.

Первый шаг – выяснить, насколько активный пользователь похож на других пользователей. В данном случае был датасет с важной информацией об абоненте, а именно где он находится, какой у него тариф и каково среднее значение arpu (average revenue per user – «средний доход на пользователя»)

Формат исходных данных представлен на рис. 7.

```
[6] df.head()
```

	ID	TP_NAME	BSEGMENT	CORE_LIVE_SUBS	ARPU	BRANCH_NAME	MACROREGION_NAME	MINUTIES	MB	SMS	SERVICE_NAME
0	11111	Мой онлайн+	B2C	1	419.166583	Омск	Сибирь	20.0	7300.085539	0	Безлимит на ВКонтакте
1	11112	Мой разговор	B2C	1	275.000000	Волгоград	Юг	95.0	12071.448762	0	Скидка 100% на мой помощник
2	11113	Мой онлайн+	B2C	1	266.666673	Оренбург	Урал	29.0	2028.019118	0	Семейство Up-Sale
3	11114	Везде онлайн	B2C	1	416.666583	Курск	Черноземье	84.0	30398.311928	0	Безлимит на ВКонтакте
4	11115	Мой онлайн+	B2C	1	454.166677	Ульяновск	Волга	24.0	60.057621	0	Безлимит на Viber

Рис. 7. Структура исходного датасета
Fig. 7. The structure of the original dataset

Для начала нужно подготовить датасет. Выберем все возможные уникальные тарифы (рис. 8).

```
df.TP_NAME.unique()
```

```
array(['Мой онлайн+', 'Мой разговор', 'Везде онлайн', '1500 мин_30 Гб',  
      'Мой онлайн', 'Новогодний', 'Прозрачные границы М', 'Мой Бизнес S',  
      '200 мин_3 Гб', '200 мин_2 Гб', '250 мин_3 Гб', '500 мин_15 Гб',  
      'Безлимит', '350 мин_5 Гб', 'Лайт', '350 мин_15 Гб',  
      '500 мин_20 Гб', 'Социальный', '600 мин_20 Гб', '500 мин_5 Гб',  
      '400 мин_5 Гб', '700 мин_30 Гб', '500 мин_25 Гб', '300 мин_12 Гб',  
      '400 мин_25 Гб', '500 мин_40 Гб', 'Компаньон М', 'Супер онлайн+',  
      '350 мин_12 Гб', '0 мин_2 Гб', '700 мин_5 Гб', '1000 мин_10 Гб',  
      'Интернет для вещей', 'Федеральный', '200 мин_7 Гб'], dtype=object)
```

Рис. 8. Уникальные тарифы
Fig. 8. Unique tariff plans

Как можно увидеть на рис. 8, есть множество действующих тарифов. Было решено сгруппировать их в 3 группы: Старый тариф B2C, Новый тариф B2C и Тариф B2B.

Анализ данных после преобразования показывает, что преобладают новые тарифы B2C (рис. 9).

```
df.pivot_table('ID', 'TP_NAME', 'MACROREGION_NAME', 'count').plot(kind='bar', stacked=True)
```

```
<matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x7f63100e26d0>
```

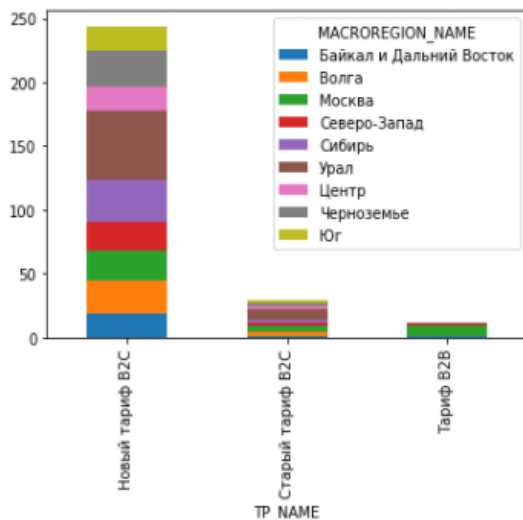


Рис. 9. Распределение тарифов
Fig. 9. Distribution of tariff plans

Посмотрим на распределение ARPU (рис. 10).

```
[44] sns.scatterplot(data=df.ARPUs)
```

```
<matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x7f630ffbadd0>
```

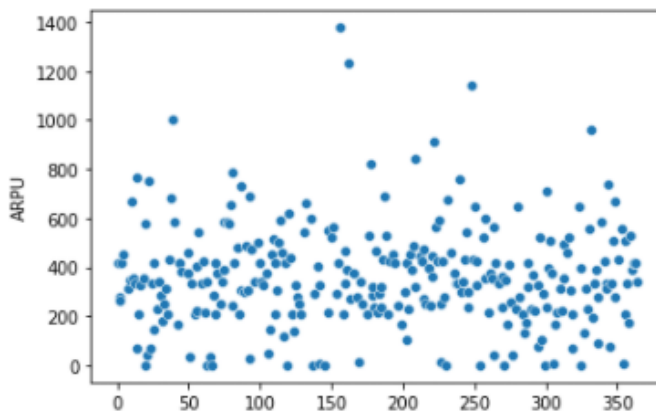


Рис. 10. Распределение значений внутри данных ARPU
(по оси X – все уникальные строки исходной таблицы)
Fig. 10. Distribution of values within ARPU data
(along the X-axis – all unique rows of the source table)

Разделим ARPU также на 3 группы: low, middle и high. Результаты представлены на рис. 11.

Практический опыт показывает, что основными параметрами для построения моделей будут являться макрорегион, тариф и ARPU. Все пользователи были сгруппированы по этим параметрам.

Итоговый набор предобработанных данных (первые 5 строк) с добавлением столбца group (объединение ключевых параметров) представлен на рис. 12.

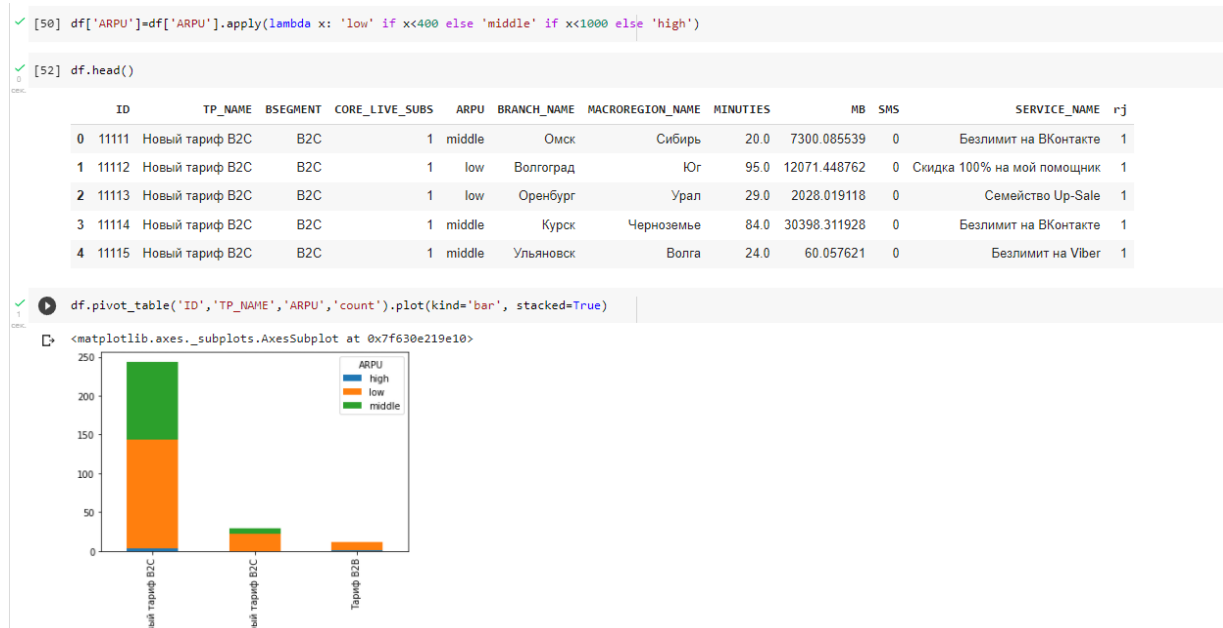


Рис. 11. Распределение по тарифам и ARPU
Fig. 11. Distribution by tariff plans and ARPU

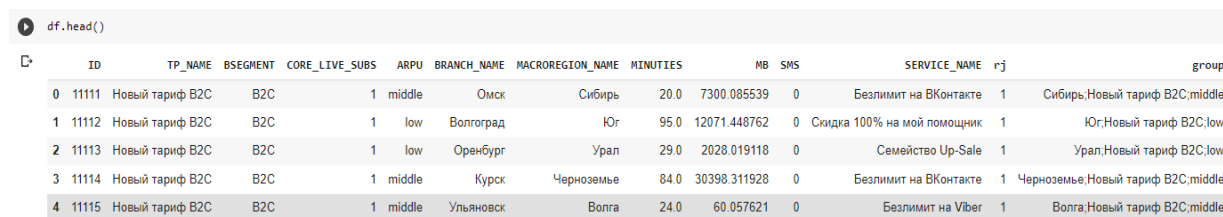


Рис. 12. Распределение по тарифам и ARPU
Fig. 12. Distribution by tariff plans and ARPU

Таким образом, абоненты Tele2 были сгруппированы по их схожим параметрам. В будущем планируется разработка рекомендательной системы на основе полученных данных.

Заключение

В статье отмечены 2 важных этапа для разработки рекомендательных систем. Первый этап связан с отсутствием данных и большого количества технологий для разработки и апробирования алгоритмов рекомендательных систем. В этом случае предложены дважды стохастические модели, позволяющие имитировать действия пользователей. На этапе преобразования предложено использовать дополнительную случайную составляющую. Однако чем больше её вес, тем хуже получается модель предсказания. На искусственных данных в отсутствие дополнительного шума в модели получены индексы детерминации порядка 90 %. Этого удалось добиться за счёт предварительной кластеризации пользователей. Второй этап связан с подготовкой данных для рекомендательных систем, когда такие данные имеются. В статье рассмотрены операции, которые позволили структурировать данные телекоммуникационной компании Tele2 по тарифным планам. В будущем планируется апробация предложенной модели на реальных данных и разработка рекомендательной системы по данным Tele2.

Список литературы

1. Будущее искусственного интеллекта в России: как технологии превратятся в решения. URL: news.ru/articles/2019-10-02_budushchee_iskusstvennogo_intellekta (дата обращения: 02.03.2022).
2. Сбербанк заработает на искусственном интеллекте 450 миллиардов рублей. URL: www.vedomosti.ru/technology/articles/2020/02/19/823464-sberbank-zarabotaet (дата обращения: 06.03.2022).

3. Авхадеев Б.Р., Воронова Л.И., Охапкина Е.П. Разработка рекомендательной системы на основе данных из профиля социальной сети «ВКонтакте» // Вестник НВГУ. 2014. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-rekomendatelnoy-sistemy-na-osnove-dannyh-iz-profilya-sotsialnoy-seti-vkontakte> (дата обращения: 08.03.2022).
4. Кластеризация профилей пользователей в рекомендательных системах поддержки жизнеобеспечения на основе реальных неявных данных / С.А. Филиппов, В.Н. Захаров, С.А. Ступников, Д.Ю. Ковалев // Труды XVIII Международной конференции DAMDID/RCDL'2016 «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных». 2016. С. 98–103.
5. Isinkaye F.O., Folajimi Y.O., Ojokoh B.A. Recommendation systems: Principles, methods and evaluation // Egyptian Informatics Journal. 2015. Vol. 16 (3). P. 261–273.
6. Нефедова Ю.С. Архитектура гибридной рекомендательной системы GEFEST (Generation–Expansion–Filtering–Sorting–Truncation) // Системы и средства информатики. 2012. Т. 22 (2). С. 176–196.
7. Ullrich T. On the Autoregressive Time Series Model Using Real and Complex Analysis // Forecasting. 2021. Vol. 3. P. 716–728. DOI: 10.3390/forecast3040044
8. Neural autoregressive distribution estimation / B. Uria, M.-A. Côté, K. Gregor et al. // JMLR. 2016. Vol. 17 (1). P. 7184–7220.
9. Модели систем квазипериодических процессов на основе цилиндрических и круговых изображений / В.Р. Крашенинников, Ю.Е. Кувайскова, О.Е. Маленова, А.Ю. Субботин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 1. С. 103–110. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-103-110
10. Андриянов Н.А., Васильев К.К. Свойства авторегрессий с кратными корнями характеристических уравнений // Вестник УлГТУ. 2019. № 1 (85). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-avtoregressiy-s-kratnymi-kornyami-harakteristicheskikh-uravneniy> (дата обращения: 08.03.2022).
11. Васильев К.К., Попов О.В. Авторегрессионные модели случайных полей с кратными корнями // Труды 4-й конференции «РОАИ: новые информационные технологии». 1998. Т. 4 (1). С. 258–260.
12. Krasheninnikov V.R., Subbotin A.Yu. Doubly stochastic model of a quasi-periodic process as an image on a cylinder // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Advanced Information Technologies”. 2018. P. 1017–1021.
13. Васильев К.К., Дементьев В.Е., Андриянов Н.А. Оценивание параметров дважды стохастических случайных полей // Радиотехника. 2014. № 7. С. 103–106.
14. Vasil'ev K.K., Dement'ev V.E., Andriyanov N.A. Doubly stochastic models of images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25 (1). P. 105–110. DOI: 10.1134/S1054661815010204
15. Demytyev V.E., Andriyanov N.A., Vasilyev K.K. Use of Images Augmentation and Implementation of Doubly Stochastic Models for Improving Accuracy of Recognition Algorithms Based on Convolutional Neural Networks // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166000
16. Alzen J.L., Langdon L.S., Otero V.K. A logistic regression investigation of the relationship between the Learning Assistant model and failure rates in introductory STEM courses // IJ STEM. 2018. Vol. 5. P. 56–63. DOI: 10.1186/s40594-018-0152-1
17. Coates A., Ng A.Y. Learning Feature Representations with K-means. Stanford University Press. 2012. 318 p.
18. Севастьянова М.Д., Желябин Д.В., Андриянов Н.А. Применение прикладных методов обработки данных в задаче кластеризации многомерных данных в сфере образования // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: сб. науч. тр. 2021. С. 172–177.

References

1. The Future of Artificial Intelligence in Russia: how technologies turn into solutions. Available at: https://cnews.ru/articles/2019-10-02_budushchee_iskusstvennogo_intellekta (accessed 02.03.2022). (In Russ.)
2. Sberbank will earn 450 billion rubles on artificial intelligence. Available at: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2020/02/19/823464-sberbank-zarabotaet> (accessed 06.03.2022) (In Russ.)

3. Avkhadeev B.R., Voronova L.I., Okhapkina E.P. [Development of a recommendation system based on data from the profile of the social network “VKontakte”]. *Bulletin of Nizhnevartovsk state university*. 2014, no. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-rekomendatelnoy-sistemy-na-osnove-dannyh-iz-profilya-sotsialnoy-seti-vkontakte> (accessed 03.08.2022). (In Russ.)

4. Philippov S.A., Zaharov V.N., Stupnikov S.A., Kovalev D.Yu. Clustering of user profiles based on real implicit data in e-commerce recommender systems. In: *Trudy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii DAMDID/RCDL'2016 “Analitika i upravleniye dannymi v oblastiakh s intensivnym ispol'zovaniyem dannykh”* [Proceedings of the XVIII International Conference DAMDID/RCDL'2016 “Analytics and data management in data-intensive areas”]; 2016. P. 98–103. (In Russ.)

5. Isinkaye F.O., Folajimi Y.O., Ojokoh B.A. Recommendation systems: Principles, methods and evaluation. *Egyptian Informatics Journal*. 2015;16(3):261–273.

6. Nefedova Yu.S. The architecture of hybrid recommender system GEFEST (Generation–Expansion–Filtering–Sorting–Truncation). *Systems and Means of Informatics*. 2012;22(2):176–196. (In Russ.)

7. Ullrich T. On the Autoregressive Time Series Model Using Real and Complex Analysis. *Forecasting*. 2021;3:716–728. DOI: 10.3390/forecast3040044

8. Uria B., Côté M.-A., Gregor K., Murray I., Larochelle H. Neural auto-regressive distribution estimation. *JMLR*. 2016;17(1):7184–7220.

9. Krasheninnikov V.R., Kuvayskova Yu.E., Malenova O.E., Subbotin A.Yu. Models of systems of quasiperiodic processes based on cylindrical and circular images. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2021;23(1):103–110. (In Russ.) DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-103-110

10. Andriyanov N.A., Vasiliev K.K. The forces in the lever mechanism of the gripper by contact of the slave link with the solid. *Vestnik UIGTU*. 2019;1(85). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-avtoregressiy-s-kratnymi-kornyami-harakteristicheskikh-uravneniy> (accessed 03.08.2022). (In Russ.)

11. Vasiliev K.K., Popov O.V. [Autoregressive models of random fields with multiple roots]. In: *Trudy 4-y konferentsii “ROAI: novyye informatsionnyye tekhnologii”* [Proceedings of the 4th conference “ROAI: new information technologies”]. 1998;4(1):258–260. (In Russ.)

12. Krasheninnikov V.R., Subbotin A.Yu. Doubly stochastic model of a quasi-periodic process as an image on a cylinder. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Advanced Information Technologies”*; 2018. P. 1017–1021.

13. Vasiliev K.K., Dementiev V.E., Andriyanov N.A. [Estimating the parameters of doubly stochastic random fields]. *Radiotekhnika*. 2014;(7):103–106. (In Russ.)

14. Vasil'ev K.K., Dement'ev V.E., Andriyanov N.A. Doubly stochastic models of images. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2015;25(1):105–110. DOI: 10.1134/S1054661815010204

15. Dementyev V.E., Andriyanov N.A., Vasilyev K.K. Use of Images Augmentation and Implementation of Doubly Stochastic Models for Improving Accuracy of Recognition Algorithms Based on Convolutional Neural Networks. In: *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*; 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166000

16. Alzen J.L., Langdon L.S., Otero V.K. A logistic regression investigation of the relationship between the Learning Assistant model and failure rates in introductory STEM courses. *IJ STEM*. 2018;5:56–63. DOI: 10.1186/s40594-018-0152-1

17. Coates A. and Ng A.Y. *Learning Feature Representations with K-means*. Stanford University Press; 2012. 318 p.

18. Sevast'yanova M.D., Zhelyabin D.V., Andriyanov N.A. [Application of applied data processing methods in the problem of clustering multidimensional data in the field of education]. In: *Sovremennyye problemy proyektirovaniya, proizvodstva i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem: sb. nauch. tr.* [Modern problems of design, production and operation of radio engineering systems: collection of scientific papers]; 2021. P. 172–177.

Информация об авторах

Андрянов Никита Андреевич, канд. техн. наук, доцент Департамента анализа данных и машинного обучения, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия; naandriyanov@fa.ru.

Атаходжаева Мадина-Бону Рустамовна, магистрант Департамента анализа данных и машинного обучения, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия; atakhodzhaeva01@gmail.com.

Бородин Евгений Игоревич, аспирант Департамента анализа данных и машинного обучения, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия; eiborodin2021@edu.fa.ru.

Information about the authors

Nikita A. Andriyanov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; naandriyanov@fa.ru.

Madina-Bonu R. Atakhodzhaeva, Master's student of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; atakhodzhaeva01@gmail.com.

Evgeny I. Borodin, Postgraduate Student of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; eiborodin2021@edu.fa.ru.

Статья поступила в редакцию 14.03.2022

The article was submitted 14.03.2022

METHODOLOGY FOR SOLVING PROBLEMS OF CLASSIFICATION OF APPEALS/REQUESTS OF CITIZENS TO THE “HOTLINE” OF THE PRESIDENT OF THE RUSSIAN FEDERATION

E.V. Bunova, bunovaev@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0997-8000>
V.S. Serova, vladislava.serova.98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9045-1048>
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The use of neural networks for the classification of text data is an important area of digital transformation of socio-economic systems. The article is devoted to the description of the methodology for classifying citizens' appeals. The proposed technique involves the use of a convolutional neural network. The stages of processing citizens' appeals in the amount of 7000 appeals are described. In order to reduce the dimension of the problem, methods of filtering and removing stop words were applied. The resulting data set allows you to choose the best classifier in terms of accuracy, specificity, sensitivity. Training and test samples were used, as well as cross-validation. The article shows the effectiveness of using this method to distribute requests on 15 topics of citizens' appeals to the “hotline” of the President of the Russian Federation. Automating the classification of received appeals by topic allows them to be processed quickly for further study by the relevant departments. **The purpose of the study** is automation of the distribution of citizens' appeals to the President's hotline by category based on the use of modern machine learning methods. **Materials and methods.** The development of software that automates the process of distributing citizens into categories is carried out using a convolutional neural network written in the Python programming language. **Results.** With the help of the prepared data set, the pre-trained model of NL BERT and sciBERT was trained by the deep learning method. The model shows an accuracy of 86% in the estimates of quality metrics. **Conclusion.** A pre-trained model was trained using a convolutional neural model using a prepared data set. Even if the forecast does not match the real category, the model gives a minor error, correctly determines the category of the appeal. The results obtained can be recommended for practical application by authors of scientific publications, scientific institutions, editors and reviewers of publishing houses.

Keywords: text processing, machine learning, convolutional neural networks, categorization of text, LSTM, CNN, deep learning, text analysis

For citation: Bunova E.V., Serova V.S. Methodology for solving problems of classification of appeals/requests of citizens to the “hotline” of the President of the Russian Federation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):29–40. DOI: 10.14529/ctcr220203

Научная статья
УДК 004.85
DOI: 10.14529/ctcr220203

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЩЕНИЙ/ЗАПРОСОВ ГРАЖДАН НА «ГОРЯЧУЮ ЛИНИЮ» ПРЕЗИДЕНТА РФ

Е.В. Бунова, bunovaev@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0997-8000>
В.С. Серова, vladislava.serova.98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9045-1048>
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Применение нейронных сетей для классификации текстовых данных является важной сферой цифровой трансформации социально-экономических систем. Статья посвящена описанию методики классификации обращений граждан. Предлагаемая методика включает использование сверточной нейронной сети. Описаны этапы обработки обращений граждан в количестве 7000 обращений.

С целью сокращения размерности задачи применены методы фильтрации, удаления стоп-слов. Полученный набор данных позволяет выбрать лучший классификатор по показателям точности, специфичности, чувствительности. Используются обучающая и тестовая выборки, а также кросс-валидация. В статье показана эффективность использования данного метода для распределения запросов по 15 темам обращений граждан на «горячую линию» Президента РФ. Автоматизация классификации поступивших обращений по темам позволяет быстро их обработать для дальнейшей проработки соответствующих ведомств. **Целью исследования** является автоматизация распределения обращений граждан на горячую линию Президента по категориям на основе использования современных методов машинного обучения. **Материалы и методы.** Разработка программного обеспечения, автоматизирующего процесс распределения граждан по категориям, осуществляется с использованием сверточных нейронных сетей, написанных на языке программирования Python. **Результаты.** С помощью подготовленного набора данных предварительно обученная модель NL BERT и sciBERT была обучена методом глубокого обучения. Модель показывает точность 86 % в оценках показателей качества. **Заключение.** В ходе исследования с помощью подготовленного набора данных была обучена методом использования сверточной нейронной предобученная модель. Даже при несовпадении прогноза с реальной категорией модель дает незначительную ошибку, правильно определяет категорию обращения. Полученные результаты могут быть рекомендованы для практического применения авторами научных публикаций, научными учреждениями, редакторами и рецензентами издательств.

Ключевые слова: обработка текста, машинное обучение, сверточные нейронные сети, категоризация текста, LSTM, CNN, глубокое обучение, анализ текста

Для цитирования: Bunova E.V., Serova V.S. Methodology for solving problems of classification of appeals/requests of citizens to the “hotline” of the President of the Russian Federation // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 29–40. DOI: 10.14529/ctcr220203

Introduction

Currently, a lot of attention from the federal authorities and the leadership of the Russian Federation is paid to improving the “quality of life” of the population. In his Messages to the Federal Assembly, Russian President Vladimir Putin has repeatedly stated the need to improve the standard of living, ensure a decent, long life for Russians and improve its quality as the goal of the socio-economic development of the country and the implementation of National projects [1, 2]. The targets for improving the quality of life of Russians were formulated in Presidential Decree No. 204 of May 7, 2018 “On National goals and strategic objectives for the development of the Russian Federation for the period up to 2024” [3]. On July 13, 2020, at a meeting of the Council for Strategic Development and National Projects, Russian President Vladimir Putin said: “... we will discuss the key directions of the country's development, our further actions, and their main, unifying task is to improve the quality of life of citizens. I want to emphasize once again: a person should be at the center of all our decisions, plans, and programs” [4].

An important event held by the President of Russia V.V. Putin is the annual “hotline”, to which every citizen can send an appeal/request for solving urgent problems for him. So, for example, only in the Chelyabinsk region for a few days, about 4 thousand requests from citizens are received by the “hotline” of the President of the Russian Federation.

It is impossible to process these requests quickly using manual methods, and some appeals/requests from citizens require a quick response. Therefore, an urgent task is to develop a software application to automate the classification of incoming requests by topic and send these requests to the relevant structures that are authorized to solve the problems described by citizens.

This article describes the solution to the problem of classifying appeals /requests of citizens by topics, namely: COVID, Highways, Alimony, Banks and loans; Landscaping; Veterinary medicine; Water supply, Issues of remuneration and employment, Issues of pensions and retirement experience, Gas supply, Citizenship, Courtyards and common areas, Housing, Healthcare of the Russian Federation, Healthcare and medical care in the Chelyabinsk region.

These topics are the most popular, the number of requests/queries on these topics is about 70% of the total number of requests.

Currently, the following methods are most often used to classify text data by topic:

1. Define the document topic manually. The method is accurate, but usually has such a disadvantage as the inability to process large volumes in a sufficient amount of time, and there is also subjectivity in data processing. Manual classification is very limited in the ability to quickly process large arrays of texts, characteristic of many applications of automatic text classification methods. Such methods are widely used by modern Internet systems: news aggregators, such as the Yandex service. News or Google News to solve the problem of thematic classification of documents and news stories, email services, for example, Yandex.Mail, gmail, or Mail.ru use algorithms detect spam filter mail, search engines (Yandex, Google, Mail.ru, Yahoo and others) resolve the challenge of ensuring diversity of search results, etc. [5].

2. Determining the topic of the document automatically using the developed rules based on regular expressions. The method allows you to process large amounts of data, but requires efforts to develop and maintain the rules up to date. In addition, before defining the rules, a specialist is obliged to familiarize himself in depth with various data samples of all topics on which a large amount of time can be spent. The disadvantage of the described method is its high sensitivity to errors that may occur accidentally or systematically both during the digitization of the text and during its formation. It is the person who is the main factor of non-determinism when placing bibliographic information in texts [6].

3. Determining the topic of the document automatically using machine learning. When using this approach, the dependency of the theme on the sample is set automatically. Manual markup of the training sample is required beforehand, but this is often a simpler task than finding the rules for belonging to the topics of all samples. This approach is currently the most promising.

The direction of using machine learning is currently widely used. For example, machine learning is used in law enforcement agencies when employees receive tactical recommendations [7]. Artificial intelligence is already being introduced into medical institutions. For example, the processing of patient data, preliminary diagnosis and even the selection of individual treatment is implemented on the basis of information about a person's illness.

Implemented machine learning algorithms make predictions or make decisions not on the basis of strictly static program commands, but on the basis of a training sample, with the help of which the parameters of the model are adjusted. Various branches of mathematics are used for the process of setting up (fitting) a model based on data sampling: mathematical statistics, optimization methods, numerical methods, probability theory, linear algebra, mathematical analysis, discrete mathematics, graph theory, various techniques for working with digital data, etc. The result of the learning algorithm is a function that approximates (restores) an unknown dependence in the processed data.

When talking about machine learning, they often mean artificial neural networks (hereinafter – INS) and deep learning, which have become popular, which are machine learning models presented in Fig. 1, i.e. special cases of pattern recognition methods, discriminant analysis, clustering methods, etc.

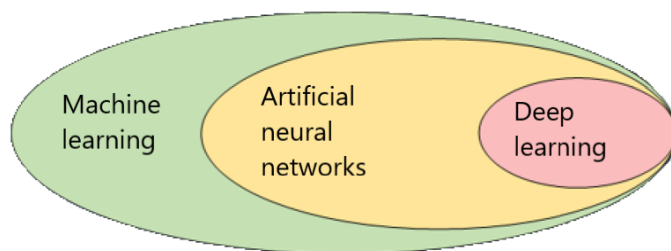


Fig. 1. Machine learning models

One of the machine learning models is INS. Currently, there is a revival of INS under the new brand “Deep Learning” (Deep Learning). So, in the article [8], with the help of deep learning, stroke risk factors are extracted from medical texts. Based on the results of the experiments, conclusions were drawn about the effectiveness of the developed methods and the text characteristics used to solve the problem.

A similar approach was used in the article [9] for clustering the corpus of documents in Russian. The results of applying the algorithms are demonstrated in the work on real data and show the high accuracy of the chosen method.

INS are hierarchical classifiers that are able to independently identify features in the original signal. A common indicator of the INS is the number of hidden layers. Some modern networks have hundreds or even thousands of hidden layers. There are a large number of INS architectures. Let's list the most popular of them.

Networks without feedbacks or direct signal propagation networks in which the signal passes from the outputs of the neurons of the i -th layer to the inputs of the neurons of the $(i+1)$ -th layer and does not return to the previous layers:

- perceptrons (single-layer, multi-layer with cross-links, etc.), except perceptrons with feedbacks;
- Bayesian neural network;
- extreme learning machine;
- in fact, any INS that is a directed acyclic (without cycles) graph.

The article [10] reflects the disadvantages and advantages of these networks. The advantages of networks without feedbacks are the simplicity of their implementation and guaranteed receipt of a response after passing data through layers.

The disadvantage of this type of network is the minimization of the size of the network – neurons repeatedly participate in data processing.

Convolutional Neural Networks (SNN, Connews), a distinctive feature of which is the convolution operation:

- AlexNet;
- LeNet-5;
- convolutional networks with region allocation (Region Based CNNs, R-CNN);
- deploying neural networks (deconvolutional networks, DN, DeConvNet) or reverse graphic networks, convolutional networks on the contrary.

In the article [11], the process of determining the subject of texts is automated using a convolutional neural network of deep learning.

The methods and tools used in the construction of a neural network for semantic classification of text are described in the article by authors V.I. Voronov and E.V. Martynenko [12].

The authors Y.V. Kotenko, S.A. Petrenko [13] described an approach to assessing the reliability of information posted on a social network. The reliability of information is considered from the point of view of its truth. It is proposed to evaluate the reliability of the information provided in the social network entry using classification algorithms. It is proposed to use convolutional neural networks to analyze the texts of records. The article also describes an algorithm for constructing and using a tool for assessing reliability, as well as possible options for its application.

Generative adversarial networks (hereinafter referred to as GAN), which consist of two competing INS: a generative model that generates samples, and a discriminative model that tries to distinguish correct (“genuine”) samples from incorrect ones. GAN is quite difficult to train, because the task is not just to train two networks, but also to maintain a balance, an equilibrium between them. If one of the networks (generator or discriminator) becomes much better than the other, then the GAN will not converge (learn).

The author U.D. Muratova [14] considered the development tools necessary for the implementation of an information system based on the analysis of text perception.

The disadvantage of GAN is the long process of learning the model [15].

Recurrent Neural Networks (SNN) or networks with memory. They contain neurons that can store information about their previous states during operation, such neurons receive information not only from the previous layer, but also from themselves as a result of the previous passage. Recurrent networks are the neural network embodiment of Markov chains. There are many architectures of recurrent INS:

- network with long-term and short-term memory (Long Short Term Memory, LSTM);
- fully recurrent network;
- recursive network;
- Hopfield neural network, a type of fully connected INS;
- Boltzmann machine and limited Boltzmann machine;
- Hamming neural network;

- Bidirectional associative memory (BAM) or Kosko neural network;
- bidirectional recurrent neural networks (bidirectional recurrent neural networks);
- Elman and Jordan networks;
- echo-networks and impulse (spike) neural networks;
- unstable state machines (liquid state machines, LSM);
- neural history compressor;
- recurrent networks of the second order;
- controlled recurrent neurons (Gated Recurrent Units, GRU);
- neural Turing machines (Neural Turing machines, NTM), etc.

In this article [16], recurrent neural networks are used in natural language text processing tasks.

The main disadvantage of these networks [17] is the lack of stability, and in cases when it is achieved, the network becomes equivalent to a single-layer neural network, which is why it is unable to solve linearly inseparable problems. As a result, the capacity of such networks is extremely small.

Convolutional neural networks have proven themselves well in the tasks of object recognition and machine vision. This has led to further research into the way they are applied, one of which is the task of classifying the text.

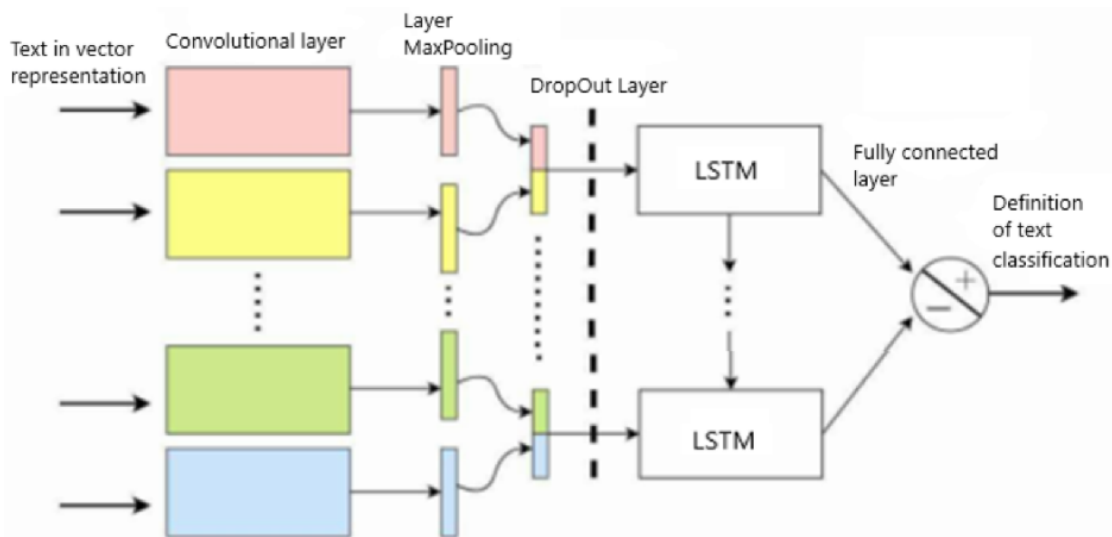


Fig. 2. Architecture of the designed neural network

To understand the architecture of the designed neural network, shown in Fig. 2, let's consider each layer separately:

- A convolutional layer is a layer that consists of a feature map, each map has its own core. The number of feature maps is determined by the requirements for the task, if you take a large number of maps, the accuracy of the model will increase, but the computational complexity will increase. The core is a filter or window that “slides” over the entire area of the previous map and finds certain signs.

- A subdiscretizing layer is a layer that performs a dimensionality reduction of the input feature map. The convolution layer has already identified some features, then for subsequent processing such a detailed feature map is no longer needed, and it is compacted to a less detailed one. In addition, filtering out unnecessary details helps to avoid retraining.

- A fully connected layer is a layer in which each neuron is connected to all the neurons on the previous layer, and each connection has its own weighting factor. In the Keras library, this layer has the name “Dense”.

- Dropout layer is a way to combat retraining in neural networks. This layer excludes a certain percentage (for example, 20%) of random neurons (located in both hidden and visible layers) at different iterations during neural network training. This technique significantly increases the learning rate, the quality of training on training data, and also improves the quality of model predictions on new test

data. In the architecture being developed, which is based on a convolutional neural network, cores of different sizes will be used, which are designed for parallel processing of the n-gram of text, respectively. After processing by convolution layers, feature maps arrive at the subdiscretization layers, which extract the most significant n-grams from the text. After that, it is combined into a common feature vector. Then the resulting vector is fed into a hidden fully connected layer. At the last step, the resulting feature map is fed to the output layer of a neural network with a sigmoidal activation function. The number of consecutive convolutional layers, the size of the cores of the convolutional layer and the subdiscretization is determined experimentally. Kernels of sizes 1, 2, 3, 4 and 5 are designed to process one word, bigrams, trigrams, 4-grams and 5-grams, respectively.

Let's consider a methodology for solving problems of classifying citizens' appeals/requests by topic, developed on the basis of a convolutional neural network.

The methodology for classifying citizens' appeals/requests by topic consists of the following stages:

Stage 1. Preliminary preparation of the data set.

When developing the classification model, data on appeals/requests of citizens to the "hotline" of the President of the Russian Federation living in the Chelyabinsk region were used. The number of requests/requests is about 7 thousand records.

Preparation of a set of this includes:

1. Clearing text data from unnecessary characters.
2. Converting text to lowercase.
3. Perform tokenization, normalization and filtering of text data.

Tokenization involves dividing the text into words in accordance with regular expressions, the specified template for which allows you to remove punctuation marks from the text. We will set the maximum number of tokens to be taken into account during processing, as well as the relative frequencies of token use that occur in the analyzed text. This allows you to exclude rare, as well as very frequently used words that will lead to the exclusion or retraining of the program. Solving the problem of normalization (lemmatization) allows you to bring the words selected as a result of tokenization to a normal form. Only single terminals of the analyzed text will participate in further processing.

To filter the data, a dictionary of words was created, shown in Fig. 3, which do not affect the definition of the category of treatment and were automatically removed without loss of semantic content from further processing of text data. The size of this dictionary is 28% of the total amount of text data.

```
replace_vocab={"аннотация" : " ", "# словарь слов, которые не несут нагрузки  
<person>ович" : " ", <person>вна" : " ",  
"здравствуйте" : " ", "добрый день" : " ", "здравия желаю" : " ", "добрый вечер" : " ", "Доброго времени суток" : " ", "Здравств  
уважаемый" : " ", "ув" : " ", "с ув" : " ", "в в" : " ", "Уважаемый Президент РФ" : " ",  
<person><person>" : "<person>", <person><person><person>" : "<person>",  
"Сёмкина" : " ", "Азаркин" : " ", "ТУРБАЛ" : " ", "СЕМЬЯ НЕСВИТ" : " ", "Землянская" : " ", "Чикалова" : " ", "Л В" : " ",  
"Кустов" : " ", "Клён" : " ", "Будяк Надежда" : " ", "Монахов" : " ", "София" : " ", "Романов" : " ", "Вера" : " ",  
"Любовь" : " ", "Валов" : " ", "Тишунова" : " ", "Твердохлеб" : " ", "Слушач" : " ", "Серго" : " ", "Харюшина" : " ",  
"Мажитова" : " ", "Лодвикова" : " ", "Азаркин" : " ", "Логовчина" : " ", "Чикалова" : " ", "Монахов" : " ", "Трусов" : " ",  
"Лопин" : " ", "Червяковой Т Н" : " ", "Червяковой О Н" : " ", "Щегликов" : " ", "Щегликова В М" : " ", "Л П" : " ", "Шумск  
Галайда" : " ", "Сагитова" : " ", "В В Путин" : " ", "Торбин" : " ", "Мегрибан Гачай кызы" : " ", "Машина Надежда" : " ",  
"врач Марьина <person> <person>" : " ", "Злоказова" : " ", "Фанизовна" : " ",  
"Почта tveranastasia gmail com" : " ",  
"зовут меня" : " ", "меня зовут" : " ", "представляюсь" : " ",  
"года рождения" : " ", "дата рождения" : " ",  
"Вызов № тел моб тел" : " ",  
"Очень хочется чтобы вы прочитали мое обращение" : " ", "Очень надеюсь" : " ", "Скажите пожалуйста" : " ", "Спасибо" : " ",  
"Заранее спасибо" : " ", "Дело в том что" : " ", "просьба" : " ", "Прошу помочь в <person> проблеме" : " ",  
"Разве это справедливо <person> <person>ович вы же Президент Вы можете решить нашу проблему" : " ", "Это же абсурд" : " ",  
"Очень прошу Вас решить эту проблему" : " ", "Заранее большое спасибо" : " ", "Спасибо за внимание" : " ", "прошу" : " ",  
"Прошу разобраться" : " ", "обращаюсь к вам с просьбой о помощи" : " ", "просьба" : " ", "Обратите внимание" : " ", "благод  
"Я понимаю что у Вас много дел и Вы вряд ли будете заниматься этим сами но может поручите комунибудь разобраться с нашей пр
```

Fig. 3. A fragment of a dictionary of words that do not carry semantic words

Stage 2. Model training.

To conduct the training of the model, a dictionary of keywords was created to distribute citizens' appeals into 15 categories, which are the most in demand. The number of requests/queries on these topics is about 70% of the total number of requests.

A fragment of the dictionary is shown in Fig. 4.

```
In [234]: def text_update_key(s):
vocab=['дороги', 'трамваи', 'рельсы', 'асфальт', 'тросы', 'безопасность', 'пешеходы', 'мост', 'освещение', 'отсыпка', 'грейде',
'светофор', 'придорожный', 'сервис', 'шум', 'реагенты', 'парковка', 'подъездной', 'путь', 'яма', 'общественный', 'транс',
'выхлопы', 'многодетная', 'семья', 'инвалид', 'ветеран', 'волонтеры', 'алименты', 'алиментщик', 'родительские',
'права', 'судебные', 'приставы', 'вкладчики', 'ипотека', 'мошенничество', 'накопления', 'каникулы', 'кредит',
'налог', 'вклад', 'девальвация', 'Сбербанк', 'обязательства', 'списание', 'пенсионные', 'взносы', 'комиссия',
'рефинансирование', 'заработная', 'плата', 'пирамида', 'долг', 'проценты', 'счет', 'сберегательная', 'книжка', 'банк',
'компенсация', 'потребительский', 'кооператив', 'карта', 'коллекторы', 'банкрот', 'наличные', 'индексация',
'благодарность', 'глава', 'города', 'губернатор', 'благоустройство', 'околошкольная', 'территория', 'детская', 'площад',
'преобразование', 'снег', 'мусор', 'деревья', 'памятник', 'чистить', 'поиск', 'работы', 'интернет',
'собак', 'пляж', 'городской', 'парк', 'аттракционы', 'радиочастотная', 'электромагнитная', 'антенна', 'зловоние', 'пит',
'вода', 'дворец', 'спорта', 'детский', 'садик', 'поликлиники', 'придомовая', 'территория', 'облагораживание', 'очистные',
'сооружения', 'очистка', 'реки', 'канализации', 'стоянки', 'автомобилей', 'тротуар', 'межевание', 'двора', 'незаконные',
'лесной', 'массив', 'приют', 'выгул', 'пчелы', 'вода', 'трубы', 'водопровод', 'ЖКХ', 'водоснабжение',
'водоотведение', 'трудоустройство', 'инвалиды', 'работодатели', 'работа', 'индексирование', 'инфляция',
'пенсия', 'инвалидность', 'оплата', 'МРОТ', 'пособия', 'сокращение', 'РВП', 'вахтовый', 'метод', 'центр',
'занятости', 'бюджетники', 'неофициально', 'сокращение', 'социальная', 'польза', 'оклад', 'прожиточный', 'минимум',
'трудоу', 'стаж', 'должность', 'изобретательство', 'производство', 'цены', 'средний', 'доход',
```

Fig. 4. A fragment of the keyword dictionary

Next, we will apply the `apply()` function of reducing all words to lowercase, the `text_update_key()` function to the entire array of text data and the `onlygoodsymbols()` function using the `apply` function, which is used in cases when it is necessary to apply any function to all rows or columns of the matrix (or arrays of larger dimension). The code of these functions is shown in Fig. 5.

```
X= X.apply(get_lower)|
X= X.apply(text_update_key)
X= X.apply(onlygoodsymbols)
```

Fig. 5. Application of the apply function

Fig. 6 shows the result of this function.

```
: print(X.head())
0   лет города асфальт суд суд
6                               ремонт
7           лет лет газ жилье
8                               лет
9           лес детский
Name: Текст обращения, dtype: object
```

Fig. 6. A fragment of the processed data

We use the `train_test_split` module, shown in Fig. 7, of the Scikit-learn library, which is useful for separating datasets, and to avoid problems with retraining, we divide the data set:

```
from sklearn.model_selection import train_test_split
x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.1, stratify=y, random_state=42)
```

Fig. 7. Using the train_test_split module

Fig. 8 represents the output of the first line from `x_train`.

```
In [244]: x_train[0]
Out[244]: 'лет города асфальт суд суд'
```

Fig. 8. Output of the first line from `x_train`

To create a Sequential model, we import the libraries of optimizers Adam, RMSProp, SGD. First of all, the optimizer is a method of achieving the best results, helping to accelerate learning. In other words, it is an algorithm used to slightly change parameters such as weights and learning rate so that the model

works correctly and quickly. It uses a first-order moment estimation and a second-order gradient moment estimation to dynamically adjust the learning rate of each parameter. The main advantage of Adam is that after correcting the bias, each iteration of the learning rate has a certain range, which makes the parameters relatively stable, also among the advantages of the optimizer can be distinguished: simple implementation, computational efficiency and small memory requirements. The RMSProp algorithm calculates only the corresponding average value, so this can alleviate the problem of the algorithm's rapid learning rate decrease. The stochastic Gradient descent (SGD) algorithm reads part of the data and immediately calculates the gradient of the cost function to update the parameters.

We also import the callbacks class, shown in Fig. 9. Callback is a set of functions used at certain points during the training procedure. Callback functions are used to get information about the internal state of the model during training. You need to pass a list of callbacks (named with the callbacks argument) to the method.fit() Sequential or Model classes. Suitable callback methods will be called at each stage of training.

```
from tensorflow.keras.optimizers import Adam, RMSprop, SGD
from tensorflow.keras.callbacks import ModelCheckpoint, EarlyStopping, ReduceLROnPlateau
```

Fig. 9. Importing optimizers and a class of callbacks.

Next, a Sequential model was created, which is a linear stack of layers that we will add using the .add() method, where Dense(1024), Dense(512), Dense(32) is a fully connected layer with 1024, 512 and 32 hidden neurons, respectively. Theoretically, the number of hidden layers can be arbitrarily large. Then we specify the training configuration (optimizer, loss function, metrics). It is necessary to choose the optimal size of the number of training facilities (batcha). The model is trained in this way: split the data into “packets” of batch_size size and sequentially iterate the entire dataset with a given number of “epochs”. It should be taken into account that with large batch_size sizes, there may not be enough memory on the video card, with too small sizes, training will be unstable.

The creation of a model and layers for it, as well as training with the optimizer RMSProp is shown in Fig. 10.

```
: model = Sequential()

model.add(Dense(1024,activation='relu'))
model.add(Dropout(.3))
model.add()
model.add(Dense(512,activation='relu'))
model.add(Dropout(.3))
model.add(Dense(32,activation='relu'))
model.add(Dropout(.3))
model.add(Dense(y.shape[1], activation='softmax'))

model.compile(optimizer=RMSprop(momentum=.9,learning_rate=.0001), loss='categorical_crossentropy', metrics=['acc'])
# print(model.summary())
history = model.fit(x_train, y_train, epochs=200, batch_size=512, validation_split=0.2,callbacks = [early_stop, reduce_lr],verbose
```

Fig. 10. Creating and training a model

The process of learning the model, shown in Fig. 11, is taking place.

```
Epoch 1/200
6/6 [=====] - 1s 51ms/step - loss: 2.0754 - acc: 0.1394 - val_loss: 2.0387 - val_acc: 0.2079 - lr: 1.0000e-04
Epoch 2/200
6/6 [=====] - 0s 14ms/step - loss: 2.0207 - acc: 0.2047 - val_loss: 1.9600 - val_acc: 0.2944 - lr: 1.0000e-04
Epoch 3/200
6/6 [=====] - 0s 16ms/step - loss: 1.9340 - acc: 0.2905 - val_loss: 1.8378 - val_acc: 0.3566 - lr: 1.0000e-04
```

Fig. 11. Model learning process

Fig. 12 shows the accuracy metrics of the model training.

```
# print(np.argmax(model.predict(x_test),axis=-1),np.argmax(y_test,axis=-1))
print(model.evaluate(x_test,y_test))

12/12 [=====] - 0s 4ms/step - loss: 1.0722 - acc: 0.8612
[1.0721559524536133, 0.8612021923065186]
```

Fig. 12. Model learning accuracy

In deep learning, loss is a value that a neural network tries to minimize: this is the distance between the true value and the predictions. To minimize this distance, the neural network learns by adjusting weights and offsets in such a way as to reduce losses, and the acc shows the percentage of instances that are correctly classified.

Thus, the evaluation of the quality of the model on the test sample is 86%.

The result of training the model. With a batch size of 512, the model under study needed 200 iterations (batches) for one training epoch.

Testing a trained model. Let's demonstrate how the model works on test data. To do this, we will create a separate csv file, which will contain 20% of the entire sample. The code for reading the file path is shown in Fig. 13.

```
obrashenie=pd.read_excel('/content/Test.xlsx')
obrashenie=obrashenie['Обращение']
```

Fig. 13. Reading the path to the test file

Let's output a list of requests. This list is shown in Fig. 14.

```
obr
0      ннотация дравствуйте формил кредит в овкомба...
1      ннотация отрудники полиции женщины не могут...
2      ннотация очему в детском саду у воспитателей ...
3      ннотация ромадные тарифы на холодное водоснаб...
4      ннотация плата труда медицинских работников ...
...
1448   с моей семьей проживаю в г оркино елябинской...
Name: Текст обращения, Length: 1453, dtype: object
```

Fig. 14. Output of requests in the test file

The result of training the model is shown in Fig. 15.

```
print(np.argmax(pred,axis=-1))
for i in np.argmax(pred,axis=-1):
    print(ly[i])

[4 5 1 ... 4 4 4]
Льготы и соц. помощь
Многоквартирные дома
Вопросы пенсий и пенсионного стажа
Многоквартирные дома
Образование
COVID
Льготы и соц. помощь
Вопросы пенсий и пенсионного стажа
Жилье
Жилье
Природа, Экология
Жилье
Образование
Природа, Экология
Вопросы пенсий и пенсионного стажа
Льготы и соц. помощь
```

Fig. 15. The result of model training

Conclusions

With the help of a prepared data set, a pre-trained model of NL BERT and sciBERT was trained by the deep learning method. The model shows an accuracy of 86% in the estimates of quality metrics.

The results obtained can be recommended for practical application by authors of scientific publications, scientific institutions, editors and reviewers of publishing houses.

References

1. *Poslaniye Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu 15 yanvarya 2020 goda* [The President's Message to the Federal Assembly on January 15, 2020]. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/62582> (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
2. *Poslaniye Prezidenta Federal'nomu Sobraniyu 20 fevralya 2019 goda* [The President's Message to the Federal Assembly on February 20, 2019]. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/59863> (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
3. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 07.05.2018 g. N 204 "O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda"*. *Vstupil v silu s 7 maya 2018 goda* [Decree of the President of the Russian Federation No. 204 dated 07.05.2018 "On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024". Entered into force on May 7, 2018]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
4. *Zasedaniye Soveta po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nym proyektam 13 iyulya 2020 goda* [Meeting of the Council for Strategic Development and National Projects on July 13, 2020]. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/63635> (accessed 20.12.2021). (In Russ.)
5. Shagraev A.G. *Modifikatsiya, razrabotka i realizatsiya metodov klassifikatsii novostnykh tekstov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Modification, development and implementation of methods of classification of news texts. Abstract of Cand. diss.]. Moscow; 2014. 19 p. (In Russ.)
6. Sokolova T.A. An extraction of the elements from bibliography based on automatically generated regular expressions. *Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems: Materials of the All-Russian conference with international participation*. Moscow; 2019. P. 313–316. (In Russ.)
7. Ushakov O.V. [Application of automated information systems with machine learning integration in law enforcement agencies]. *Problemy pravovoy i tekhnicheskoy zashchity informatsii*. 2018;(6):142–147. (In Russ.)
8. Donitova V.V., Kireev D.A., Titova E.V., Akimova A.A. Natural language processing models for extraction of stroke risk factors from electronic health records. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Institute of system analysis of the Russian academy of sciences*. 2021;71(4):93–101. (In Russ.) DOI: 10.14357/20790279210410
9. Kolmogortsev S.V., Sarayev P.V. [Bibliography extraction from texts by regular expressions]. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh*. 2017;(20):82–88. (In Russ.)
10. Gorbachevskaya E.N. Classification of neural networks. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva*. 2012;2(19):128–134. (In Russ.)
11. Katenko Yu.V. Application of machine learning methods for text information analysis. *Okhrana, bezopasnost', svyaz'*. 2019;3(4):90–94. (In Russ.)
12. Voronov V., Martinenko E. Research of parallel structures of neural networks for use in the tasks on the Russian text semantic classification considering limited computing resources (on the example of operational reports used in the RF MIA). *Economics and Quality of Communication Systems*. 2018;3(9):52–60. (In Russ.)
13. Katenko Yu.V., Petrenko S.A. [The concept of control of the reliability of information in the professional social network using convolutional neural networks]. In: *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. Vol. 1*. St. Petersburg; 2019. P. 140–143. (In Russ.)
14. Muratova U.D. [Studying neural networks for chatbots]. In: *Proceedings of the IX Congress of Young Scientists*. St. Petersburg; 2021. P. 92–95. (In Russ.)

15. Sukhan' A.A. Applying generative adversarial network to the problem of trend determination. *Moskovskiy ekonomicheskyy zhurnal*. 2019;(6):180–191. (In Russ.) DOI: 10.24411/2413-046X-2019-16031
16. Budyly'skiy D.V. [Application of recurrent neural networks in processing natural language texts]. *Voprosy nauki*. 2015;6:8–12. (In Russ.)
17. Danchenko V.V. Overview of funds development of an information system based on analysis of text perception. *Informatika i prikladnaya matematika*. 2020;(26):31–34. (In Russ.)

Список литературы

1. Послание Президента Федеральному Собранию 15 января 2020 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/62582> (дата обращения: 20.12.2021).
2. Послание Президента Федеральному Собранию 20 февраля 2019 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/59863> (дата обращения: 20.12.2021).
3. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». Вступил в силу с 7 мая 2018 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 20.12.2021).
4. Заседание Совета по стратегическому развитию и национальным проектам 13 июля 2020 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/63635> (дата обращения: 20.12.2021).
5. Шаграев А.Г. Модификация, разработка и реализация методов классификации новостных текстов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 19 с.
6. Соколова Т.А. Извлечение элементов библиографии на основе автоматически порождаемых регулярных выражений // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологических систем: материалы Всерос. конф. с междунар. участием. М., 2019. С. 313–316.
7. Ушаков О.В. Применение автоматизированных информационных систем с интеграцией машинного обучения в деятельности правоохранительных органов // Проблемы правовой и технической защиты информации. 2018. № 6. С. 142–147.
8. Методы обработки естественного языка для извлечения факторов риска инсульта из медицинских текстов / В.В. Донитова, Д.А. Киреев, Е.В. Титова, А.А. Акимова // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2021. Т. 71, № 4. С. 93–101. DOI: 10.14357/20790279210410
9. Колмогорцев С.В., Сараев П.В. Извлечение библиографии из текстов регулярными выражениями // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. № 20. С. 82–88.
10. Горбачевская Е.Н. Классификация нейронных сетей // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2012. № 2 (19). С. 128–134.
11. Катенко Ю.В. Применение методов машинного обучения для анализа текстовой информации // Охрана, безопасность, связь. 2019. Т. 3, № 4 (4). С. 90–94.
12. Воронов В.И., Мартыненко Э.В. Исследование параллельных структур нейронных сетей для использования в задачах по семантической классификации текста на русском языке в условиях ограничения вычислительных ресурсов (на примере оперативных сводок в системе МВД России) // Экономика и качество систем связи. 2018. № 3 (9). С. 52–60.
13. Катенко Ю.В., Петренко С.А. Концепция контроля достоверности информации в профессиональной социальной сети с применением сверточной нейронной сети // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. СПб., 2019. Т. 1. С. 140–143.
14. Муратова У.Д. Изучение нейронных сетей для чат-ботов // Материалы IX Конгресса молодых ученых. СПб., 2021. С. 92–95.
15. Сухань А.А. Генеративно-состязательные нейронные сети в задачах определения трендов // Московский экономический журнал. 2019. № 6. С. 180–191. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-16031
16. Бudyльский Д.В. Применение рекуррентных нейронных сетей в задачах обработки текстов на естественном языке // Вопросы науки. 2015. Т. 6. С. 8–12.

17. Данченко В.В. Обзор средств разработки информационной системы, основанной на анализе восприятия текста // Информатика и прикладная математика. 2020. № 26. С. 31–34.

Information about the authors

Elena V. Bunova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Applied Mathematics and Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bunovaev@susu.ru.

Vlada S. Serova, Master's student of the Department of Applied Mathematics and Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vladislava.serova.98@gmail.com.

Информация об авторах

Бунова Елена Вячеславовна, канд. техн. наук, доц. кафедры прикладной математики и программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bunovaev@susu.ru.

Серова Влада Сергеевна, магистрант кафедры прикладной математики и программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vladislava.serova.98@gmail.com.

The article was submitted 13.03.2022

Статья поступила в редакцию 13.03.2022

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья
УДК 681.5
DOI: 10.14529/ctcr220204

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПЕРВОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРОВ С ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ СОЧЛЕНЕНИЯМИ

А.И. Телегин, teleginai@susu.ru

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

Аннотация. Решается проблема сложности вывода и громоздкого аналитического вида уравнений математических моделей управляемых систем тел с явно выраженными структурными, кинематическими, статическими и динамическими параметрами. В первую очередь это относится к уравнениям динамики, на которых основаны системы управления. Наш практический опыт и теоретические результаты указывают на то, что пути решения этой проблемы нужно искать в двух направлениях. Во-первых, в направлении классификации систем тел и использования особенностей представителей рассматриваемых классов систем тел в части упрощения формализмов вывода их уравнений динамики, а также уменьшения числа математических операций в аналитическом представлении уравнений динамики. Во-вторых, в направлении выбора параметров состояния тел, в которых записываются аналитические скалярно-координатные виды уравнений динамики. В этой связи следует заметить, что подавляющее большинство (более 90 %) промышленных роботов, а также роботов специального назначения имеют структуру одной открытой ветви, в которой тела образуют друг с другом вращательные кинематические пары пятого класса (вращательные сочленения). Если в таких системах полюса тел выбирать на осях их относительного вращения, то межполюсные расстояния будут постоянными, что значительно упрощает решение указанной проблемы. По поводу выбора параметров состояния, явно входящих в уравнения динамики, следует заметить, что квазискорости, т. е. проекции абсолютных угловых скоростей тел на оси их связанных систем координат, являются наиболее подходящими для этих целей. Дело в том, что в уравнениях кинематики, замыкающих уравнения динамики до полного набора уравнений для решения той или иной задачи, всегда можно выразить квазискорости через любые другие параметры, например, относительные углы поворота тел и их производные по времени, направляющие косинусы и их производные, кватернионы и т. д. Если проекции абсолютных угловых скоростей тел на их оси измеряются, например, гироскопами на телах и решается первая задача динамики, то формулы решения содержат минимальное число операций сложения и умножения. Таким образом, **целью исследования** является разработка простого метода вывода аналитического вида уравнений динамики манипуляторов с вращательными сочленениями в квазискоростях, в которых явно выражены геометрические, кинематические, статические и инерционные параметры тел. Используемые **методы исследования** (векторная и аналитическая механика систем тел, векторная алгебра, системный анализ и методы тождественных преобразований) позволили свести вывод уравнений динамики манипуляторов к формальным действиям их выписывания без выполнения сложных математических операций дифференцирования, возведения в степень, вычисления векторных операций и т. д. **Результаты** исследования содержат доказательство общего векторного вида уравнений динамики манипуляторов в квазискоростях с явно выраженными межполюсными расстояниями и параметрами распределения масс тел. Для выписывания моментов движущих сил в сочленениях получены скалярно-координатные формулы и их простой частный вид для случая параллельности осей вращения соседних сочленений. Как частный случай получены формулы выписывания уравнений динамики манипуляторов на плоскости. Для них процесс выписывания уравнений динамики сводится к конкретизации числа тел, их геометрических и инерционных параметров. **Заключение.** Эффективность изложенных методов и полученных формул продемонстрирована на примерах выписывания уравнений динамики тела с одной закрепленной точкой, гироскопа в кардановом подвесе и ангулярного манипулятора с тремя и шестью степенями свободы в пространстве. Эти результаты позволяют нам ожидать, что число пользователей предлагаемых методов будет расти. Положительный опыт использования этих методов в учебном процессе в дисциплине

линах «Основы механики систем тел», «Электромеханические системы» и «Мехатроника» оправдывает наши ожидания.

Ключевые слова: шарнирный манипулятор, уравнения динамики, квазискорости, выписывание формул, направляющие косинусы, верификация уравнений

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта 20-41-740019.

Для цитирования: Телегин А.И. Аналитическое решение первой задачи динамики манипуляторов с вращательными сочленениями // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 41–57. DOI: 10.14529/ctcr220204

Original article
DOI: 10.14529/ctcr220204

ANALYTICAL SOLUTION OF THE FIRST PROBLEM OF DYNAMICS OF MANIPULATORS WITH ROTATIONAL JOINTS

A.I. Telegin, teleginai@susu.ru

South Ural State University, Miass, Russia

Abstract. The problem of complexity of derivation and the cumbersome analytical form of equations of mathematical models of controlled body systems with explicit structural, kinematic, static and dynamic parameters is solved. First of all, this applies to the equations of dynamics on which the control systems are based. Our practical experience and theoretical results indicate that solutions to this problem should be sought in two directions. Firstly, in the direction of classifying body systems and using peculiarities of the representatives of the considered classes of body systems in terms of simplifying formalisms for deriving their equations of dynamics, as well as reducing the number of mathematical operations in the analytical representation of the equations of dynamics. Second, and in the direction of choosing the parameters of the state of bodies in which the analytical scalar-coordinate types of the equations of dynamics are written down. In this connection, it should be noted that the vast majority (more than 90 %) of industrial robots, as well as special-purpose robots, have a single open branch structure in which the bodies form rotational kinematic pairs of the fifth class (rotational articulations) with each other. If in such systems the poles of the bodies are chosen on the axes of their relative rotation, the interpole distances will be constant, which greatly simplifies the solution of the above problem. Regarding the choice of state parameters explicitly included in the equations of dynamics, it should be noted that quasi-velocities, i.e. projections of absolute angular velocities of bodies on the axes of their coupled coordinate systems, are the most suitable for these purposes. The point is that in the equations of kinematics, which close the equations of dynamics to a complete set of equations for solving a problem, one can always express quasi-velocities through any other parameters, for example, relative angles of rotation of bodies and their time derivatives, guiding cosines and their derivatives, quaternions, etc. If projections of absolute angular velocities of bodies on their axes are measured, for example, by gyroscopes on bodies, and the first problem of dynamics is solved, the solution formulas contain a minimum number of addition and multiplication operations. Thus, the **goal of the study** is to develop a simple method for deriving the analytical form of the equations of dynamics of manipulators with rotational joints in quasi-velocity, in which geometric, kinematic, static and inertial parameters of bodies are explicitly expressed. The used **research methods** (vector and analytical mechanics of body systems, vector algebra, system analysis and methods of identity transformations) made it possible to reduce the derivation of the equations of dynamics of manipulators to formal actions of writing them out without performing complex mathematical operations of differentiation, magnification, calculation of vector operations, etc. **The results** of the study contain a proof of the general vector form of the equations of dynamics of manipulators in quasi-velocity with explicitly expressed interpole distances and parameters of mass distribution of bodies. Scalar-coordinate formulas and their simple special formulas for the case of parallel rotation axes of neighboring joints are derived for writing out the moments of driving forces in joints. As a special case, the formulas for writing out the equations of dynamics of manipulators on the plane were obtained. For them, the process of writing out the equations of dynamics is reduced to the specification of the number of bodies, their geometric and inertial parameters. **Conclusion.** The effectiveness of the outlined methods and the obtained formulas have been demonstrated by examples of deriving the equations of dynamics of a body with a single fixed point, a gyroscope in a gimbal, and an angular manipulator with three and six degrees of freedom in space. These results allow us to expect that the number of users of the pro-

posed methods will grow. The positive experience of using these methods in the educational process in the disciplines “Fundamentals of Mechanics of Body Systems”, “Electromechanical Systems” and “Mechanics” justifies our expectations.

Keywords: articulated arm, equations of dynamics, quasi-velocities, writing out the formulas, guiding cosines, equations verification

Acknowledgments: The study was financially supported by the RFBR and the Chelyabinsk Region within the framework of the scientific project 20-41-740019.

For citation: Telegin A.I. Analytical solution of the first problem of dynamics of manipulators with rotational joints. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):41–57. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220204

Введение

Основной проблемой практического использования уравнений динамики (УД) манипуляторов является их громоздкость. За последние пять лет мы не встречали отечественные и зарубежные научные публикации, в которых так или иначе ставится задача выписывания аналитического вида УД манипуляторов со многими степенями подвижности и явно выраженными геометрическими, кинематическими, статическими и инерционными параметрами тел. Много статей посвящено численному решению задач динамики манипуляторов на ЭВМ в пошагово-алгоритмическом режиме, т. е. без представления УД в явном аналитическом виде. Использование систем аналитических вычислений для выписывания УД манипуляторов по классическим формализмам (Лагранжа, Аппеля, Ньютона – Эйлера и т. д.) не решает проблему их громоздкости. Например, в статье [1] отмечается, что УД ангулярного манипулятора с шестью степенями свободы, выведенные по формализму Лагранжа и записанные в символьном виде, занимают сорок машинописных страниц. Мы считаем, что это следствие неэффективности классических формализмов вывода УД манипуляторов.

Постановка задачи: разработать простой метод вывода аналитического вида УД манипуляторов с вращательными сочленениями и явно выраженными параметрами тел. Свести вывод УД к формальным действиям их выписывания без выполнения сложных математических операций и продемонстрировать этот формализм на примерах выписывания УД манипуляторов с тремя и шестью степенями свободы в пространстве.

1. УД манипулятора в квазискоростях

Присвоим неподвижному телу манипулятора (стойке, станине) нулевой номер и свяжем с ним правую систему координат $Oxyz$, где x – орт оси абсцисс, направленной горизонтально вправо, y – орт оси ординат, направленной вертикально вверх. Подвижные тела занумеруем числами $1, 2, \dots, N$, где N – количество подвижных тел. Введем следующие обозначения:

m_{oi} – масса и обозначение i -го тела;

m_i – масса и обозначение i -й подсистемы, т. е. тела m_{oi} и всех следующих за ним тел;

O_i – полюс тела m_{oi} , т. е. фиксированная точка тела m_{oi} ;

C_{ai} – центр масс (ЦМ) тела m_{oi} , дополненного массой m_{i+1} в точке O_{i+1} ;

L_i – расстояние от точки O_i до точки O_{i+1} ;

e_i – орт, указывающий направление из точки O_i в точку O_{i+1} ;

a_i – орт, указывающий направление из точки O_i в точку C_{ai} ;

$R_{i+1} = O_i O_{i+1} = L_i e_i$, $p_i = L_i m_{i+1}$, $m_{N+1} = 0$, $p_N = 0$, $b_i = m_i |O_i C_{ai}|$;

$O_i x_i y_i z_i$ – правая связанная с телом m_{oi} система координат (ССК(i)), где x_i, y_i, z_i – орты ее осей;

$\omega_i^x, \omega_i^y, \omega_i^z$ – проекции вектора ω_i абсолютной угловой скорости тела m_{oi} на оси ССК(i);

K_{oi} – кинетический момент тела m_{oi} относительно точки O_i ;

I_i^x, I_i^y, I_i^z – осевые моменты инерции тела m_{oi} в ССК(i);

$I_i^{xy}, I_i^{xz}, I_i^{yz}$ – центробежные моменты инерции тела m_{oi} в ССК(i);

M_i – главный момент относительно точки O_i сил, действующих на тело m_{oi} со стороны тела m_{oi-1} .

Для уменьшения громоздкости записей будем использовать:

- греческие буквы $\xi, \eta, \zeta, \nu, \mu$, принимающие значения на множестве латинских букв $\{x, y, z\}$;
- латинскую букву u , принимающую значение на множестве латинских букв $\{e, a\}$;
- знаки суммирования по буквам $\xi, \eta, \zeta, \nu, \mu$;
- символ $\in_{\xi\eta\zeta}$ Леви-Чивиты, где $\xi, \eta, \zeta \in \{x, y, z\}$ и $\in_{xyz} = \in_{yzx} = \in_{zxy} = 1$ или $\in_{\xi\eta\zeta} = 0$, если среди символов $\xi\eta\zeta$ есть повторяющиеся, иначе $\in_{\xi\eta\zeta} = -1$ [2].

Эта система обозначений позволяет записывать следующие выражения:

$$\boldsymbol{\omega}_i = \omega_i^x \mathbf{x}_i + \omega_i^y \mathbf{y}_i + \omega_i^z \mathbf{z}_i = \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i - \text{разложение вектора } \boldsymbol{\omega}_i \text{ по ортам ССК}(i);$$

$\mathbf{u}_i = \sum_{\eta} u_{\eta i} \boldsymbol{\eta}_i$ – разложение орта \mathbf{a}_i или \mathbf{e}_i по ортам ССК(i), где $u \in \{e, a\}$, $u_{\eta i} = \mathbf{u}_i \cdot \boldsymbol{\eta}_i$ – постоянные направляющие косинусы (НК) орта \mathbf{u}_i в ССК(i);

$\boldsymbol{\zeta}_j = \sum_{\eta} \zeta_{ji}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_i$ – разложение орта $\boldsymbol{\zeta}_j$ ССК(j) по ортам ССК(i), где $\zeta_{ji}^{\eta} = \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_i$ – НК орта ССК(j) в ССК(i);

$$\boldsymbol{\xi}_i \times \boldsymbol{\eta}_i = \in_{\xi\eta\nu} \boldsymbol{\nu}_i; \quad \boldsymbol{\xi}_i \times \boldsymbol{\zeta}_j = \boldsymbol{\xi}_i \times \sum_{\eta} \zeta_{ji}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_i = \sum_{\eta} \in_{\xi\eta\nu} \zeta_{ji}^{\eta} \boldsymbol{\nu}_i.$$

1.1. Формула вычисления момента силы в сочленении

Для манипулятора справедлива формула

$$\mathbf{M}_j = \mathbf{m}_j \times \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + \sum_{i=j}^N [\dot{\mathbf{K}}_{0i} + L_i(p_i \mathbf{e}_i + \mathbf{m}_{i+1}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + b_i \mathbf{R}_{ji} \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai}] + \mathbf{G}_j. \quad (1.1)$$

где $\mathbf{m}_j = \sum_{k=j}^N b_k \mathbf{a}_k$, $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{ui} = \sum_{\xi} \dot{\omega}_{ui}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i$, $u \in \{e, a\}$, $\mathbf{K}_{0i} = \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \mathbf{I}_i^{\xi}$, $\mathbf{R}_{ji} = \sum_{k=j}^{i-1} L_k \mathbf{e}_k$,
 $\mathbf{I}_i^x = I_i^x \mathbf{x}_i - I_i^{xy} \mathbf{y}_i - I_i^{xz} \mathbf{z}_i$, $\mathbf{I}_i^y = -I_i^{xy} \mathbf{x}_i + I_i^y \mathbf{y}_i - I_i^{yz} \mathbf{z}_i$, $\mathbf{I}_i^z = -I_i^{xz} \mathbf{x}_i - I_i^{yz} \mathbf{y}_i + I_i^z \mathbf{z}_i$,
 $\dot{\omega}_{ui}^x = u_{zi} \dot{\omega}_i^y - u_{yi} \dot{\omega}_i^z + (u_{yi} \omega_i^y + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^x - u_{xi} (\omega_i^{y2} + \omega_i^{z2})$, $\mathbf{G}_j = g \mathbf{m}_j \times \mathbf{y}$,
 $\dot{\omega}_{ui}^y = u_{xi} \dot{\omega}_i^z - u_{zi} \dot{\omega}_i^x + (u_{xi} \omega_i^x + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^y - u_{yi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{z2})$,
 $\dot{\omega}_{ui}^z = u_{yi} \dot{\omega}_i^x - u_{xi} \dot{\omega}_i^y + (u_{xi} \omega_i^x + u_{yi} \omega_i^y) \omega_i^z - u_{zi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{y2})$, $u_{\xi i} = \mathbf{u}_i \cdot \boldsymbol{\xi}_i$.

Доказательство формулы (1.1). В статье [3] выведена формула

$$\mathbf{M}_j = \mathbf{m}_j \times \ddot{\mathbf{r}}_j + \sum_{i=j}^N \mathbf{K}_{0i} + \sum_{i=j+1}^N [(m_i \mathbf{R}_i + \mathbf{m}_i) \times \ddot{\mathbf{R}}_i + \mathbf{R}_i \times \ddot{\mathbf{m}}_i] + \mathbf{G}_j, \quad (1.2)$$

где $\mathbf{m}_j = \sum_{i=j}^N (m_{oi} \mathbf{O}_i \mathbf{C}_i + m_{i+1} \mathbf{R}_{i+1})$, $\mathbf{R}_{N+1} = 0$, $\mathbf{G}_j = g \mathbf{m}_j \times \mathbf{y}$, $\mathbf{r}_j = \mathbf{O} \mathbf{O}_j$, \mathbf{C}_i – ЦМ тела m_{oi} .

Учитывая условие статического равновесия $m_{oi} \mathbf{O}_i \mathbf{C}_i + m_{i+1} \mathbf{R}_{i+1} = b_i \mathbf{a}_i$, получим

$$\mathbf{m}_j = \sum_{i=j}^N b_i \mathbf{a}_i.$$

Используя формулу Пуассона $\dot{\mathbf{e}}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{e}_i$, обозначение $\boldsymbol{\omega}_{ei} = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{e}_i$ и равенство $\boldsymbol{\omega}_0 = 0$, получим

$$\dot{\mathbf{r}}_j = \sum_{i=1}^j \dot{\mathbf{R}}_i = \sum_{i=0}^{j-1} \dot{\mathbf{R}}_{i+1} = \sum_{i=0}^{j-1} L_i \dot{\mathbf{e}}_i = \sum_{i=0}^{j-1} L_i \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{e}_i = \sum_{i=1}^{j-1} L_i \boldsymbol{\omega}_{ei}.$$

Следовательно, $\mathbf{m}_j \times \dot{\mathbf{r}}_j = \mathbf{m}_j \times \sum_{i=1}^{j-1} L_i \boldsymbol{\omega}_{ei}$, т. е. первая сумма (по номерам тел, несущих тело m_{oj}) в формуле (1.1) принимает искомый вид.

В ССК(i) с учетом введенных обозначений получим

$$\mathbf{K}_{0i} = \begin{pmatrix} I_i^x & -I_i^{xy} & -I_i^{xz} \\ -I_i^{xy} & I_i^y & -I_i^{yz} \\ -I_i^{xz} & -I_i^{yz} & I_i^z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_i^x \\ \omega_i^y \\ \omega_i^z \end{pmatrix} = \\ = (I_i^x \omega_i^x - I_i^{xy} \omega_i^y - I_i^{xz} \omega_i^z) \mathbf{x}_i + (-I_i^{xy} \omega_i^x + I_i^y \omega_i^y - I_i^{yz} \omega_i^z) \mathbf{y}_i + (-I_i^{xz} \omega_i^x - I_i^{yz} \omega_i^y + I_i^z \omega_i^z) \mathbf{z}_i = \\ = \sum_{\xi} I_i^{\xi} \omega_i^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i - (I_i^{xy} \mathbf{y}_i + I_i^{xz} \mathbf{z}_i) \omega_i^x - (I_i^{xy} \mathbf{x}_i + I_i^{yz} \mathbf{z}_i) \omega_i^y - (I_i^{xz} \mathbf{x}_i + I_i^{yz} \mathbf{y}_i) \omega_i^z.$$

Если в последнем выражении раскрыть сумму по $\xi \in \{x, y, z\}$ и привести подобные при проекциях ω_i^x , ω_i^y , ω_i^z , то с учетом принятых обозначений векторов \mathbf{I}_i^{ξ} получим искомый вид вектора $\mathbf{K}_{0i} = \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \mathbf{I}_i^{\xi}$.

С учетом равенств $\mathbf{R}_{i+1} = L_i \mathbf{e}_i$, $\dot{\mathbf{e}}_i = \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{e}_i = \boldsymbol{\omega}_{ei}$, $\ddot{\mathbf{R}}_{i+1} = L_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei}$, $p_i = L_i m_{i+1}$ получим $(m_{i+1} \mathbf{R}_{i+1} + \mathbf{m}_{i+1}) \times \ddot{\mathbf{R}}_{i+1} = (m_{i+1} L_i^2 \mathbf{e}_i + L_i \mathbf{m}_{i+1}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} = L_i (p_i \mathbf{e}_i + \mathbf{m}_{i+1}) \times \boldsymbol{\omega}_{ei}$.

Следовательно,

$$\sum_{i=j+1}^N (m_i \mathbf{R}_i + \mathbf{m}_i) \times \ddot{\mathbf{R}}_i = \sum_{i=j}^N (m_{i+1} \mathbf{R}_{i+1} + \mathbf{m}_{i+1}) \times \ddot{\mathbf{R}}_{i+1} = \\ = \sum_{i=j}^N L_i (p_i \mathbf{e}_i + \mathbf{m}_{i+1}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei}. \quad (1.3)$$

Учитывая обозначение $\omega_{ai} = \omega_i \times a_i$ равенства

$$\dot{a}_i = \omega_i \times a_i = \omega_{ai}, \ddot{a}_i = \dot{\omega}_{ai}, \dot{m}_j = \sum_{i=j}^N b_i \ddot{a}_i, R_{jk} = O_j O_k = \sum_{i=j}^{k-1} L_i e_i, R_{jj} = 0$$

и формулу изменения порядка суммирования $\sum_{i=j}^N L_i \sum_{k=i+1}^N b_k = \sum_{k=j+1}^N \sum_{i=j}^{k-1} L_i b_k$, получим

$$\begin{aligned} \sum_{i=j+1}^N R_i \times \dot{m}_i &= \sum_{i=j}^N R_{i+1} \times \dot{m}_{i+1} = \sum_{i=j}^N L_i e_i \times \sum_{k=i+1}^N b_k \dot{\omega}_{ak} = \\ &= \sum_{k=j+1}^N b_k \sum_{i=j}^{k-1} L_i e_i \times \dot{\omega}_{ak} = \sum_{k=j+1}^N b_k R_{jk} \times \dot{\omega}_{ak} = \\ &= \sum_{i=j+1}^N b_i R_{ji} \times \dot{\omega}_{ai} = \sum_{i=j}^N b_i R_{ji} \times \dot{\omega}_{ai}. \end{aligned}$$

Отсюда с учетом формул (1.2), (1.3) получим искомый вид второй суммы (по номерам тел, несомых телом m_{oj}) в формуле (1.1).

Выразим через квазискорости и квазиускорения формулу вычисления вектора $\dot{\omega}_{ui}$, где $u \in \{e, a\}$ и орты e_i, a_i, u_i неподвижны в теле m_{oi} . Используя обозначения $\xi_{ei} = \xi_i \times e_i, \xi_{ai} = \xi_i \times a_i, \xi_{ui} = \xi_i \times u_i, \omega_{ui} = \omega_i \times u_i$ и разложение $\omega_i = \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \xi_i$, получим

$$\dot{\omega}_{ui} = (\omega_i \times u_i)' = (\sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \xi_i \times u_i)' = \sum_{\xi} (\omega_i^{\xi} \xi_{ui})' = \sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} \xi_{ui} + \omega_i^{\xi} \dot{\xi}_{ui}).$$

Для векторного произведения орт ССК(i) будем использовать представление $\xi_i \times \eta_i = \epsilon_{\xi\eta\zeta} \zeta_i$, где $\epsilon_{\xi\eta\zeta}$ – символ Леви-Чивиты и $\xi, \eta \in \{x, y, z\}$. Если известны множители, т. е. значения символов ξ и η , то результат векторного произведения $\xi_i \times \eta_i$ выписывается однозначно. Например, если $\xi = x, \eta = y$, то $\xi_i \times \eta_i = x_i \times y_i = \epsilon_{xyz} \zeta_i = \epsilon_{xyz} z_i = z_i$ или если $\xi = \eta = y$, то $y_i \times y_i = 0$, так как $\epsilon_{yyz} = 0$, и т. д. [2].

Используя разложение $u_i = \sum_{\eta} u_{\eta i} \eta_i$ орта u_i по ортам ССК(i), где $u_{\eta i} = u_i \cdot \eta_i = \text{const}$, получим $\xi_{ui} = \xi_i \times u_i = \xi_i \times \sum_{\eta} u_{\eta i} \eta_i = \sum_{\eta} \epsilon_{\xi\eta\zeta} u_{\eta i} \zeta_i = u_i^{\xi\zeta} \zeta_i$ где $u_i^{\xi\zeta} = \sum_{\eta} \epsilon_{\xi\eta\zeta} u_{\eta i} = \text{const}$. Следовательно, $\dot{\omega}_{ui} = \sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} u_i^{\xi\zeta} \zeta_i + \omega_i^{\xi} \dot{\xi}_{ui})$. Для вектора $\dot{\xi}_{ui}$ получим

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{ui} &= (\xi_i \times u_i)' = \sum_{\eta} u_{\eta i} (\xi_i \times \eta_i)' = \sum_{\eta} u_{\eta i} (\epsilon_{\xi\eta\zeta} \zeta_i)' = \sum_{\eta} \epsilon_{\xi\eta\zeta} u_{\eta i} \dot{\zeta}_i = u_i^{\xi\zeta} \dot{\zeta}_i = \\ &= u_i^{\xi\zeta} \omega_i \times \zeta_i = u_i^{\xi\zeta} \sum_{\nu} \omega_i^{\nu} \nu_i \times \zeta_i = u_i^{\xi\zeta} \sum_{\nu} \epsilon_{\nu\zeta\mu} \omega_i^{\nu} \mu_i. \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \dot{\xi}_{ui} &= \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} u_i^{\xi\zeta} \sum_{\nu} \epsilon_{\nu\zeta\mu} \omega_i^{\nu} \mu_i = \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \sum_{\nu} \omega_i^{\nu} u_i^{\xi\zeta} \epsilon_{\nu\zeta\mu} \mu_i = \\ &= \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \sum_{\nu} \omega_i^{\nu} \sum_{\eta} \epsilon_{\xi\eta\zeta} u_{\eta i} \epsilon_{\nu\zeta\mu} \mu_i. \end{aligned}$$

Теперь в правой части последнего выражения развернем все три суммы по ξ, ν и η . Тогда, учитывая значения символов Леви-Чивиты, получим

$$\begin{aligned} \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \dot{\xi}_{ui} &= \omega_i^x [\omega_i^x (0 + \epsilon_{xyz} u_{yi} \epsilon_{xzy} y_i + \epsilon_{xzy} u_{zi} \epsilon_{xyz} z_i) + \omega_i^y (0 + \epsilon_{xyz} u_{yi} \epsilon_{yzx} x_i + 0) + \\ &+ \omega_i^z (0 + 0 + \epsilon_{xzy} u_{zi} \epsilon_{zyx} x_i)] + \omega_i^y [\omega_i^x (\epsilon_{yxz} u_{xi} \epsilon_{xzy} y_i + 0 + 0) + \omega_i^y (\epsilon_{yxz} u_{xi} \epsilon_{yzx} x_i + \\ &+ 0 + \epsilon_{yzx} u_{zi} \epsilon_{yxz} z_i) + \omega_i^z (0 + 0 + \epsilon_{yzx} u_{zi} \epsilon_{zxy} y_i)] + \omega_i^z [\omega_i^x (\epsilon_{zxy} u_{xi} \epsilon_{xyz} z_i + 0 + 0) + \\ &+ \omega_i^y (0 + \epsilon_{zyx} u_{yi} \epsilon_{yxz} z_i + 0) + \omega_i^z (\epsilon_{zxy} u_{xi} \epsilon_{zyx} x_i + \epsilon_{zyx} u_{yi} \epsilon_{zxy} y_i) + 0] = \\ &= \omega_i^x [\omega_i^x (-u_{yi} y_i - u_{zi} z_i) + \omega_i^y u_{yi} x_i + \omega_i^z u_{zi} x_i] + \omega_i^y [\omega_i^x u_{xi} y_i + \omega_i^y (-u_{xi} x_i - u_{zi} z_i) + \\ &+ u_{zi} y_i] + \omega_i^z [\omega_i^x u_{xi} z_i + \omega_i^y u_{yi} z_i + \omega_i^z (-u_{xi} x_i - u_{yi} y_i)]. \end{aligned}$$

Из последнего выражения после приведения подобных при x_i, y_i, z_i получим

$$\begin{aligned} \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \dot{\xi}_{ui} &= [(u_{yi} \omega_i^y + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^x - u_{xi} (\omega_i^{y2} + \omega_i^{z2})] x_i + \\ &+ [(u_{xi} \omega_i^x + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^y - u_{yi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{z2})] y_i + [(u_{xi} \omega_i^x + u_{yi} \omega_i^y) \omega_i^z - u_{zi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{y2})] z_i. \end{aligned}$$

Аналогично

$$\begin{aligned} \sum_{\xi} \dot{\omega}_i^{\xi} u_i^{\xi\zeta} \zeta_i &= \sum_{\xi} \dot{\omega}_i^{\xi} \sum_{\eta} \epsilon_{\xi\eta\zeta} u_{\eta i} \zeta_i = \dot{\omega}_i^x (\epsilon_{xyz} u_{yi} z_i + \epsilon_{xzy} u_{zi} y_i) + \\ &+ \dot{\omega}_i^y (\epsilon_{yxz} u_{xi} z_i + \epsilon_{yzx} u_{zi} x_i) + \dot{\omega}_i^z (\epsilon_{zxy} u_{xi} y_i + \epsilon_{zyx} u_{yi} x_i) = \\ &= (u_{zi} \dot{\omega}_i^y - u_{yi} \dot{\omega}_i^z) x_i + (u_{xi} \dot{\omega}_i^z - u_{zi} \dot{\omega}_i^x) y_i + (u_{yi} \dot{\omega}_i^x - u_{xi} \dot{\omega}_i^y) z_i. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{ui} &= \sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} \xi_{ui} + \omega_i^{\xi} \dot{\xi}_{ui}) = [u_{zi} \dot{\omega}_i^y - u_{yi} \dot{\omega}_i^z + (u_{yi} \omega_i^y + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^x - u_{xi} (\omega_i^{y2} + \omega_i^{z2})] x_i + \\ &+ [u_{xi} \dot{\omega}_i^z - u_{zi} \dot{\omega}_i^x + (u_{xi} \omega_i^x + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^y - u_{yi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{z2})] y_i + \\ &+ [u_{yi} \dot{\omega}_i^x - u_{xi} \dot{\omega}_i^y + (u_{xi} \omega_i^x + u_{yi} \omega_i^y) \omega_i^z - u_{zi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{y2})] z_i. \end{aligned}$$

С учетом введенных обозначений окончательно получим $\dot{\omega}_{ui} = \hat{\Omega}_{ui}^x x_i + \hat{\Omega}_{ui}^y y_i + \hat{\Omega}_{ui}^z z_i$, что и требовалось доказать.

1.2. Случаи упрощения формулы (1.1)

Для некоторых классов манипуляторов формула (1.1) принимает наиболее простой вид. Например, если у подсистемы m_j полюса всех тел общие, т. е. совпадают, то $L_i = 0$ для все $i \geq j$ и как показано в п. 2.3 статьи [3]:

$$\dot{K}_{0i} = \sum_{\xi} (\omega_i^{\xi} I_i^{\xi})'_t = \sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} I_i^{\xi} + \omega_i^{\xi 2} I_{\xi i}) + \omega_i^x \omega_i^y I_i^{xy} + \omega_i^x \omega_i^z I_i^{xz} + \omega_i^y \omega_i^z I_i^{yz}, \quad (1.4)$$

где $I_{xi} = I_i^{xz} y_i - I_i^{xy} z_i$, $I_{yi} = I_i^{xy} z_i - I_i^{yz} x_i$, $I_{zi} = I_i^{yz} x_i - I_i^{xz} y_i$, $I_i^{xy} = -I_i^{xz} x_i + I_i^{yz} y_i + (I_i^y - I_i^x) z_i$, $I_i^{xz} = I_i^{xy} x_i + (I_i^x - I_i^z) y_i - I_i^{yz} z_i$, $I_i^{yz} = (I_i^z - I_i^y) x_i - I_i^{xy} y_i + I_i^{xz} z_i$. Если при этом ССК(i) для всех i является главной ССК (ГСК(i)), то

$$I_i^{xy} = I_i^{xz} = I_i^{yz} = 0, I_{\xi i} = 0, I_i^{\xi} = I_i^{\xi} \xi_i, I_i^{xy} = I_i^c z_i, I_i^{xz} = I_i^b y_i, I_i^{yz} = I_i^a x_i,$$

где $I_i^a = I_i^z - I_i^y$, $I_i^b = I_i^x - I_i^z$, $I_i^c = I_i^y - I_i^x$, I_i^x, I_i^y, I_i^z – моменты инерции тела m_{oi} относительно главных осей $O_i x_i, O_i y_i, O_i z_i$, соответственно, и формула (1.4) примет вид

$$\dot{K}_{0i} = \sum_{\xi} I_i^{\xi} (\omega_i^{\xi} \xi_i)'_t = (I_i^x \dot{\omega}_i^x + I_i^a \omega_i^y \omega_i^z) x_i + (I_i^y \dot{\omega}_i^y + I_i^b \omega_i^x \omega_i^z) y_i + (I_i^z \dot{\omega}_i^z + I_i^c \omega_i^x \omega_i^y) z_i. \quad (1.5)$$

Если $N = 1$, то имеет место тело с неподвижной точкой. Для него из уравнения (1.1) с учетом параметров $j = N = 1, L_1 = 0, p_1 = 0$ получим $M_1 = \sum_{\xi} (\omega_1^{\xi} I_1^{\xi})'_t + G_1$, где $G_1 = g b_1 a_1 \times y$. Направим оси ССК(1) вдоль главных осей тела в точке O_1 . Тогда, используя формулу (1.5), выпишем

$$M_1 = \sum_{\xi} I_1^{\xi} (\omega_1^{\xi} \xi_1)'_t + G_1 = (I_1^x \dot{\omega}_1^x + I_1^a \omega_1^y \omega_1^z) x_1 + (I_1^y \dot{\omega}_1^y + I_1^b \omega_1^x \omega_1^z) y_1 + (I_1^z \dot{\omega}_1^z + I_1^c \omega_1^x \omega_1^y) z_1 + G_1.$$

Отсюда, используя общепринятые обозначения

$$A = I_1^x, B = I_1^y, C = I_1^z, p = \omega_1^x, q = \omega_1^y, r = \omega_1^z, x = x_1, y = y_1, z = z_1,$$

получим

$$M_1 = [A\dot{p} + (C - B)qr]x + [B\dot{q} + (A - C)pr]y + [C\dot{r} + (B - A)pq]z + G_1,$$

что совпадает с известным видом УД тела с одной закрепленной точкой в поле сил тяжести.

Обозначим через q_j – орт оси вращения тела m_{oj} относительно тела m_{oj-1} вокруг оси $O_j q_j$. Если ССК(i) = ГСК(i) для всех i , то из (1.5) получим

$$\dot{K}_j = q_j \cdot \sum_{i=j}^N \dot{K}_{0i} = \sum_{i=j}^N \sum_{\xi} \xi_{ij}^q E_i^{\xi}, \quad (1.6)$$

где $E_i^x = I_i^x \dot{\omega}_i^x + I_i^a \omega_i^y \omega_i^z$, $E_i^y = I_i^y \dot{\omega}_i^y + I_i^b \omega_i^x \omega_i^z$, $E_i^z = I_i^z \dot{\omega}_i^z + I_i^c \omega_i^x \omega_i^y$, $\xi_{ij}^q = \xi_i \cdot q_j$. Если при этом полюса всех тел совпадают, то с учетом (1.6) из формулы (1.1) получим

$$M_j = q_j \cdot M_j = \sum_{i=j}^N \sum_{\xi} \xi_{ij}^q E_i^{\xi} + G_j, \quad (1.7)$$

где $G_j = q_j \cdot G_j$.

В качестве примера использования формулы (1.7) выпишем УД гироскопа в кардановом подвесе, состоящего из трех твердых тел ($N = 3$) – ротора и двух рамок, шарнирно соединенных между собой. Ротор – это гироскоп, который вращается вокруг своей оси симметрии, установленной в подшипниках, закрепленных на внутренней рамке. Она вращается вокруг оси, неподвижной на внешней рамке, которая вращается вокруг оси, закрепленной в неподвижных подшипниках. Все три тела имеют общую неподвижную точку, называемую точкой подвеса гироскопа. Оси вращения рамок подвеса ортогональны. Оси вращения ротора и внутренней рамки тоже ортогональны. Система находится в поле сил тяжести. ЦМ внешней рамки находится на неподвижной оси ее вращения. ЦМ ротора и внутренней рамки совпадают с точкой подвеса гироскопа [4].

Для рассматриваемого гироскопа орты осей вращения тел выражаются через орты осей ССК тел по формулам $q_1 = x_1, q_2 = y_2, q_3 = z_3$.

Здесь и далее для поиска выражений НК осей ССК используются табл. 1 и 2 из статьи [3], а также методика выписывания НК по рекуррентным формулам, изложенным в статье [5]. Эти НК можно вывести самостоятельно на основе описания исследуемой системы тел или ее кинематической схемы.

По формуле (1.7) для $i = j = 3$ с учетом равенств $x_{33}^q = x_{33}^z = y_{33}^q = 0, z_{33}^q = 1$ выпишем

$$M_3 = E_3^z = I_3^z \dot{\omega}_3^z + I_3^c \omega_3^x \omega_3^y.$$

По формуле (1.7) для $j = 2$ с учетом равенств $q_2 = y_2, x_{22}^y = z_{22}^y = 0, y_{22}^y = 1$ выпишем $M_2 = E_2^y + \sum_{\xi} \xi_{32}^y E_3^{\xi}$. Так как $q_3 = z_3$, из 3-го блока табл. 1 имеем $x_{32}^y = s_3, y_{32}^y = c_3, z_{32}^y = 0$.

Здесь и далее $s_i = \sin(q_i)$, $c_i = \cos(q_i)$, q_i – угол поворота тела m_{oi} относительно тела m_{oi-1} . Следовательно,

$$M_2 = E_2^y + s_3 E_3^x + c_3 E_3^y = I_2^y \dot{\omega}_2^y + I_2^b \omega_2^z \omega_2^x + s_3 (I_3^x \dot{\omega}_3^x + I_3^c \omega_3^y \omega_3^z) + c_3 (I_3^y \dot{\omega}_3^y + I_3^b \omega_3^z \omega_3^x).$$

По формуле (1.7) для $j = 1$ с учетом равенств $\mathbf{q}_1 = \mathbf{x}_1$, $x_{11}^x = 1$, $y_{11}^x = z_{11}^x = 0$ выпишем $M_1 = E_1^x + \sum_{\xi} \xi_{21}^x E_2^{\xi} + \sum_{\xi} \xi_{31}^x E_3^{\xi}$. Так как $\mathbf{q}_2 = \mathbf{y}_2$, из 2-го блока табл. 1 имеем $x_{21}^x = c_2$, $y_{21}^x = 0$, $z_{21}^x = s_2$. Разложим орты \mathbf{x}_3 , \mathbf{y}_3 , \mathbf{z}_3 по ортам ССК(2), где коэффициенты при ортах \mathbf{x}_2 , \mathbf{y}_2 , \mathbf{z}_2 определим из 3-го блока табл. 2. Тогда получим

$$\mathbf{x}_3 = x_{x3} \mathbf{x}_2 + x_{y3} \mathbf{y}_2 + x_{z3} \mathbf{z}_2 = c_3 \mathbf{x}_2 + s_3 \mathbf{y}_2,$$

$$\mathbf{y}_3 = y_{x3} \mathbf{x}_2 + y_{y3} \mathbf{y}_2 + y_{z3} \mathbf{z}_2 = -s_3 \mathbf{x}_2 + c_3 \mathbf{y}_2, \quad \mathbf{z}_3 = z_{x3} \mathbf{x}_2 + z_{y3} \mathbf{y}_2 + z_{z3} \mathbf{z}_2 = \mathbf{z}_2.$$

Теперь с учетом НК из 2-го блока табл. 1 получим

$$x_{31}^x = \mathbf{x}_3 \cdot \mathbf{x}_1 = (c_3 \mathbf{x}_2 + s_3 \mathbf{y}_2) \cdot \mathbf{x}_1 = c_3 x_{21}^x + s_3 y_{21}^x = c_3 c_2,$$

$$y_{31}^x = \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{x}_1 = (-s_3 \mathbf{x}_2 + c_3 \mathbf{y}_2) \cdot \mathbf{x}_1 = -s_3 x_{21}^x + c_3 y_{21}^x = -s_3 c_2,$$

$$z_{31}^x = \mathbf{z}_3 \cdot \mathbf{x}_1 = \mathbf{z}_2 \cdot \mathbf{x}_1 = s_2.$$

Следовательно, с учетом очевидного равенства $\omega_1^y = \omega_1^z = 0$ получим

$$M_1 = E_1^x + c_2 E_2^x + s_2 E_2^z + x_{31}^x E_3^x + y_{31}^x E_3^y + s_2 E_3^z.$$

Таким образом, УД рассматриваемого гироскопа имеют вид

$$\begin{cases} I_1^x \dot{\omega}_1^x + I_1^a \omega_1^y \omega_1^z + c_2 (I_2^x \dot{\omega}_2^x + I_2^a \omega_2^y \omega_2^z) + s_2 (I_2^y \dot{\omega}_2^y + I_2^c \omega_2^z \omega_2^x) + \\ + x_{31}^x (I_3^x \dot{\omega}_3^x + I_3^a \omega_3^y \omega_3^z) + y_{31}^x (I_3^y \dot{\omega}_3^y + I_3^b \omega_3^z \omega_3^x) + s_2 (I_3^z \dot{\omega}_3^z + I_3^c \omega_3^x \omega_3^y) = M_1, \\ I_2^y \dot{\omega}_2^y + I_2^b \omega_2^z \omega_2^x + s_3 (I_3^x \dot{\omega}_3^x + I_3^c \omega_3^y \omega_3^z) + c_3 (I_3^y \dot{\omega}_3^y + I_3^b \omega_3^z \omega_3^x) = M_2, \\ I_3^z \dot{\omega}_3^z + I_3^c \omega_3^x \omega_3^y = M_3. \end{cases}$$

К этим уравнениям необходимо добавить формулы вычисления НК x_{31}^x , y_{31}^x и уравнения кинематики, т. е. формулы вычисления квазискоростей и ускорений, которые можно выписать по методикам, изложенным в статье [3].

1.3. Моменты движущих сил манипулятора

Справедлива формула

$$M_j = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} (d_j^{\eta} \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\Omega}_{ij}^{e\zeta} + \sum_{i=j}^{N-1} L_i \dot{\Omega}_{ij}^{\eta\zeta}) + \dot{K}_j + G_j, \quad (1.8)$$

где $d_j^{\eta} = \sum_{k=j}^N b_k a_{kj}^{\eta}$, $\dot{\Omega}_{ij}^{u\zeta} = \sum_{\xi} \xi_{ij}^{\zeta} \dot{\Omega}_{ui}^{\xi}$, $u \in \{e, a\}$, $\dot{\Omega}_{ij}^{\eta\zeta} = d_{ij}^{\eta} \dot{\Omega}_{ij}^{e\zeta} + e_{ij}^{\eta} \dot{\Omega}_{ij}^{\zeta}$, $\dot{\Omega}_{ij}^{\zeta} = \sum_{k=i+1}^N b_k \dot{\Omega}_{kj}^{a\zeta}$,

$$d_{ij}^{\eta} = p_i e_{ij}^{\eta} + \sum_{k=i+1}^N b_k a_{kj}^{\eta}, \quad p_i = L_i m_{i+1}, \quad a_{kj}^{\eta} = \mathbf{a}_k \cdot \boldsymbol{\eta}_j,$$

$$\dot{K}_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N \dot{\mathbf{K}}_{0i}, \quad G_j = g \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} d_j^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \mathbf{y}.$$

Доказательство формулы (1.8). Используя формулу (1.1), получим

$$M_j = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{M}_j = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{m}_j \times \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + \\ + \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N [\mathbf{K}_{0i} + L_i (p_i \mathbf{e}_i + \mathbf{m}_{i+1}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + b_i \mathbf{R}_{ji} \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai}] + \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{G}_j,$$

где $\mathbf{m}_j = \sum_{k=j}^N b_k \mathbf{a}_k$, $\mathbf{R}_{ji} = \sum_{k=j}^{i-1} L_k \mathbf{e}_k$, т. е. $M_j = A_j + B_j + C_j + D_j + \dot{K}_j + G_j$, где

$$A_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{k=j}^N b_k \mathbf{a}_k \times \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei}, \quad \dot{K}_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N \mathbf{K}_{0i}, \quad B_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N L_i p_i \mathbf{e}_i \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei},$$

$$C_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N L_i \sum_{k=i+1}^N b_k \mathbf{a}_k \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei}, \quad D_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N b_i \sum_{k=j}^{i-1} L_k \mathbf{e}_k \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai}, \quad G_j = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{G}_j.$$

Для G_j с учетом разложения $\mathbf{a}_k = \sum_{\eta} a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j$, где $a_{kj}^{\eta} = \mathbf{a}_k \cdot \boldsymbol{\eta}_j$, и представления $\mathbf{q}_j \times \mathbf{a}_k = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j$ получим

$$G_j = g \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{m}_j \times \mathbf{y} = g \mathbf{q}_j \times \sum_{k=j}^N b_k \mathbf{a}_k \cdot \mathbf{y} = g \sum_{k=j}^N b_k \mathbf{q}_j \times \sum_{\eta} a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j \cdot \mathbf{y} = \\ = g \sum_{k=j}^N b_k \sum_{\eta} a_{kj}^{\eta} \in_{q\eta\zeta} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \mathbf{y} = g \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \sum_{k=j}^N b_k a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j^y = g \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} d_j^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j^y,$$

где $d_j^{\eta} = \sum_{k=j}^N b_k a_{kj}^{\eta}$, $\boldsymbol{\zeta}_j^y = \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \mathbf{y}$.

Для A_j с учетом равенств $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} = \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i$, $\boldsymbol{\zeta}_{ji}^{\xi} = \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_i$, $\dot{\Omega}_{ij}^{e\zeta} = \sum_{\xi} \xi_{ij}^{\zeta} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi}$ получим

$$A_j = \sum_{i=1}^{j-1} L_i \sum_{k=j}^N b_k \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i = \sum_{i=1}^{j-1} L_i \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \sum_{k=j}^N b_k \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_{ji}^{\xi} = \\ = \sum_{i=1}^{j-1} L_i \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} d_j^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_{ji}^{\xi} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} d_j^{\eta} \sum_{i=1}^{j-1} L_i \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \boldsymbol{\zeta}_{ji}^{\xi} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} d_j^{\eta} \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\Omega}_{ij}^{e\zeta}.$$

Для B_j с учетом равенств $e_i = \sum_{\eta} e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j$, $e_{ij}^{\eta} = e_i \cdot \boldsymbol{\eta}_j$, $\mathbf{q}_j \times \boldsymbol{\eta}_j = \in_{q\eta\zeta} \boldsymbol{\zeta}_j$ получим

$$B_j = \sum_{i=j}^N L_i p_i \mathbf{q}_j \times \sum_{\eta} e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} = \sum_{i=j}^N L_i p_i \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} =$$

$$= \sum_{i=j}^N L_i p_i \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \sum_{i=j}^N L_i p_i \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} =$$

$$= \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \sum_{i=j}^N L_i \sum_{\xi} p_i e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi}.$$

Аналогично для C_j получим

$$C_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N L_i \sum_{k=i+1}^N b_k \mathbf{a}_k \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} = \sum_{i=j}^N L_i \sum_{k=i+1}^N b_k \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i =$$

$$= \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \sum_{i=j}^N L_i \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \sum_{k=i+1}^N b_k a_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \sum_{i=j}^N L_i \sum_{\xi} C_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi},$$

$$C_{ij}^{\eta} = \sum_{k=i+1}^N b_k a_{kj}^{\eta}.$$

Для D_j получим

$$D_j = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N b_i \sum_{k=j}^{i-1} L_k \mathbf{e}_k \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} = \sum_{i=j}^N b_i \sum_{k=j}^{i-1} L_k \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{kj}^{\eta} \sum_{\xi} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} \dot{\Omega}_{ai}^{\xi}.$$

Используем следующую формулу изменения порядка суммирования

$$\sum_{i=j}^N b_i \sum_{k=j}^{i-1} L_k = \sum_{k=j}^{N-1} L_k \sum_{i=k+1}^N b_i.$$

Тогда получим $D_j = \sum_{k=j}^{N-1} L_k \sum_{i=k+1}^N b_i \sum_{\xi} \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{kj}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} \dot{\Omega}_{ai}^{\xi}$. Поменяем местами индексы суммирования k и i . Тогда получим

$$D_j = \sum_{i=j}^N L_i \sum_{k=i+1}^N b_k \sum_{\xi} \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_k^{\zeta} \dot{\Omega}_{ak}^{\xi} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \sum_{i=j}^N L_i \sum_{\xi} e_{ij}^{\eta} \sum_{k=i+1}^N b_k \boldsymbol{\xi}_k^{\zeta} \dot{\Omega}_{ak}^{\xi}.$$

Таким образом,

$$M_j = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \left[d_j^{\eta} \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\Omega}_{ij}^{e\zeta} + \sum_{i=j}^N L_i \sum_{\xi} \left(p_i e_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} + C_{ij}^{\eta} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} + e_{ij}^{\eta} \sum_{k=i+1}^N b_k \boldsymbol{\xi}_k^{\zeta} \dot{\Omega}_{ak}^{\xi} \right) \right] +$$

$$+ \dot{K}_j + G_j = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} \left[d_j^{\eta} \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\Omega}_{ij}^{e\zeta} + \sum_{i=j}^N L_i \left((p_i e_{ij}^{\eta} + C_{ij}^{\eta}) \sum_{\xi} \boldsymbol{\xi}_i^{\zeta} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + e_{ij}^{\eta} \sum_{k=i+1}^N b_k \sum_{\xi} \boldsymbol{\xi}_k^{\zeta} \dot{\Omega}_{ak}^{\xi} \right) \right] + \dot{K}_j + G_j.$$

Отсюда, используя обозначения $\dot{\Omega}_{kj}^{a\zeta} = \sum_{\xi} \boldsymbol{\xi}_k^{\zeta} \dot{\Omega}_{ak}^{\xi}$, $\dot{\Omega}_{ij}^{\zeta} = \sum_{k=i+1}^N b_k \dot{\Omega}_{kj}^{a\zeta}$, $\dot{\Omega}_{ij}^{\eta\zeta} = d_{ij}^{\eta} \dot{\Omega}_{ij}^{e\zeta} + e_{ij}^{\eta} \dot{\Omega}_{ij}^{\zeta}$ и равенства $p_N = 0$, $C_N^{\eta} = 0$, получим искомую формулу (1.8).

1.4. Рекуррентная формула вычисления моментов сил в сочленениях

Формулу (1.1) можно представить в следующем рекуррентном виде:

$$\mathbf{M}_j = \mathbf{M}_{j+1} + \dot{\mathbf{K}}_{0j} + \mathbf{a}_j \times \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + L_j p_j \mathbf{e}_j \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} + \mathbf{e}_j \times \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} + g b_j \mathbf{a}_j \times \mathbf{y}, \quad (1.9)$$

где $j = N, N-1, \dots, 1$; $\mathbf{M}_N = \dot{\mathbf{K}}_{0N} + \mathbf{a}_N \times \sum_{i=1}^{N-1} L_{iN} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + g b_N \mathbf{a}_N \times \mathbf{y}$; $L_{ij} = L_i b_j$.

Доказательство формулы (1.9). Используя очевидные равенства

$$\mathbf{m}_j = \sum_{k=j}^N b_k \mathbf{a}_k = b_j \mathbf{a}_j + \mathbf{m}_{j+1}, \quad \mathbf{R}_{ji} = \mathbf{O}_j \mathbf{O}_i = \mathbf{O}_j \mathbf{O}_{j+1} + \mathbf{O}_{j+1} \mathbf{O}_i = \mathbf{R}_{j+1} + \mathbf{R}_{j+1,i},$$

$$\mathbf{G}_j = g \mathbf{m}_j \times \mathbf{y} = g (b_j \mathbf{a}_j + \mathbf{m}_{j+1}) \times \mathbf{y} = g b_j \mathbf{a}_j \times \mathbf{y} + \mathbf{G}_{j+1},$$

из формулы (1.1) получим

$$\mathbf{M}_j = (b_j \mathbf{a}_j + \mathbf{m}_{j+1}) \times \left(\sum_{i=1}^j L_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} - L_j \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} \right) + \dot{\mathbf{K}}_{0j} + L_j (p_j \mathbf{e}_j + \mathbf{m}_{j+1}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} +$$

$$+ \sum_{i=j+1}^N [\dot{\mathbf{K}}_{0i} + L_i (p_i \mathbf{e}_i + \mathbf{m}_{i+1}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + b_i (\mathbf{R}_{j+1} + \mathbf{R}_{j+1,i}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai}] + g b_j \mathbf{a}_j \times \mathbf{y} + \mathbf{G}_{j+1}.$$

Выделим в последнем выражении слагаемые из формулы вычисления \mathbf{M}_{j+1} . Тогда получим

$$\mathbf{M}_j = \mathbf{M}_{j+1} + b_j \mathbf{a}_j \times \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} - L_j \mathbf{m}_{j+1} \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} + \dot{\mathbf{K}}_{0j} +$$

$$+ L_j (p_j \mathbf{e}_j + \mathbf{m}_{j+1}) \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} + \mathbf{R}_{j+1} \times \sum_{i=j+1}^N b_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} + g b_j \mathbf{a}_j \times \mathbf{y} =$$

$$= \mathbf{M}_{j+1} + b_j \mathbf{a}_j \times \sum_{i=1}^{j-1} L_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + \dot{\mathbf{K}}_{0j} + L_j p_j \mathbf{e}_j \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} + L_j \mathbf{e}_j \times \sum_{i=j+1}^N b_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} + g b_j \mathbf{a}_j \times \mathbf{y}.$$

Отсюда следует искомое представление (1.9), из которого для $j = N$ с учетом равенств $\mathbf{M}_{N+1} = 0$, $p_N = 0$ получим формулу вычисления \mathbf{M}_N . Формула (1.9) доказана.

Проекция M_{qj} момента силы \mathbf{M}_j на ось $O_j \mathbf{q}_j$, где $q \in \{x, y, z\}$, выражается через квазискорости и квазиускорения по формуле

$$M_{qj} = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{M}_{j+1} + \mathbf{q}_j \cdot \dot{\mathbf{K}}_{0j} + \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} [\sum_{\xi} \left(q_{eji}^{\xi} \dot{\omega}_i^{\xi} - Q_{\xi ji}^e \omega_i^{\xi 2} \right) +$$

$$+ q_{eji}^{xy} \omega_i^x \omega_i^y + q_{eji}^{xz} \omega_i^x \omega_i^z + q_{eji}^{yz} \omega_i^y \omega_i^z] + L_j p_j \sum_{\xi} \in_{q\xi\zeta} e_{\xi j}^{\eta} \dot{\Omega}_{ej}^{\zeta} +$$

$$+ \sum_{i=j+1}^N L_{ji} [\sum_{\xi} \left(q_{aji}^{\xi} \dot{\omega}_i^{\xi} - Q_{\xi ji}^a \omega_i^{\xi 2} \right) + q_{aji}^{xy} \omega_i^x \omega_i^y + q_{aji}^{xz} \omega_i^x \omega_i^z + q_{aji}^{yz} \omega_i^y \omega_i^z] + G_{qj}, \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned}
& \text{где } j = N, N-1, \dots, 1; \mathbf{M}_{N+1} = \mathbf{0}; G_{qj} = gb_j \sum_{\xi} \in_{q\xi\zeta} a_{\xi j} \zeta_j^y; \\
& q_{uji}^x = u_{yi} q_{ji}^{uz} - u_{zi} q_{ji}^{uy}, q_{uji}^y = u_{zi} q_{ji}^{ux} - u_{xi} q_{ji}^{uz}, q_{uji}^z = u_{xi} q_{ji}^{uy} - u_{yi} q_{ji}^{ux}, e_{\xi j} = \mathbf{e}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j, \\
& Q_{xji}^u = u_{yi} q_{ji}^{uy} + u_{zi} q_{ji}^{uz}, Q_{yji}^u = u_{xi} q_{ji}^{ux} + u_{zi} q_{ji}^{uz}, Q_{zji}^u = u_{xi} q_{ji}^{ux} + u_{yi} q_{ji}^{uy}, a_{\xi j} = \mathbf{a}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j, \\
& q_{uji}^{xy} = u_{yi} q_{ji}^{ux} + u_{xi} q_{ji}^{uy}, q_{uji}^{xz} = u_{xi} q_{ji}^{uz} + u_{zi} q_{ji}^{ux}, q_{uji}^{yz} = u_{yi} q_{ji}^{uz} + u_{zi} q_{ji}^{uy}, \zeta_j^y = \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \mathbf{y}, \\
& q_{ji}^{u\xi} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} u_{\eta j}^- \zeta_{ji}^{\xi},
\end{aligned}$$

где $u \in \{e, a\}$ если $u = e$, то $u^- = a$, если $u = a$, то $u^- = e$; $\zeta_{ji}^{\xi} = \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_i$.

Доказательство формулы (1.10). Из формулы (1.9) получим

$$\begin{aligned}
M_{qj} = & \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{M}_{j+1} + \mathbf{q}_j \cdot \dot{\mathbf{K}}_j + \mathbf{q}_j \times \mathbf{a}_j \cdot \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} + \mathbf{q}_j \times \mathbf{e}_j \cdot \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} + \\
& + L_j p_j \mathbf{q}_j \times \mathbf{e}_j \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} + gb_j \mathbf{q}_j \times \mathbf{a}_j \cdot \mathbf{y}.
\end{aligned} \tag{1.11}$$

С учетом разложения $\mathbf{u}_j = \sum_{\eta} u_{\eta j} \boldsymbol{\eta}_j$, где $u_{\eta j} = \mathbf{u}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_j - \text{const}$, $u \in \{e, a\}$ получим

$$\mathbf{q}_j \times \mathbf{u}_j = \mathbf{q}_j \times \sum_{\eta} u_{\eta j} \boldsymbol{\eta}_j = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} u_{\eta j} \boldsymbol{\zeta}_j.$$

Используя обозначения $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{ui} = \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ui}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i$, $\zeta_{ji}^{\xi} = \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_i$, получим

$$\mathbf{q}_j \times \mathbf{a}_j \cdot \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} a_{\eta j} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i = \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} a_{\eta j} \zeta_{ji}^{\xi},$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{q}_j \times \mathbf{e}_j \cdot \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} &= \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{\eta j} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ai}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i = \\
&= \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ai}^{\xi} \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{\eta j} \zeta_{ji}^{\xi}.
\end{aligned}$$

Введем обозначение $q_{ji}^{u\xi} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} u_{\eta j}^- \zeta_{ji}^{\xi}$. Здесь если в обозначении $q_{ji}^{u\xi}$ символ $u = a$, то множитель в правой части $u_{\eta j}^- = e_{\eta j}$. Иначе если в левой части $u = e$, то в правой части $u_{\eta j}^- = a_{\eta j}$. Теперь получим

$$\mathbf{q}_j \times \mathbf{a}_j \cdot \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} = \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \sum_{\xi} q_{ji}^{e\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} \mathbf{q}_j \times \mathbf{e}_j \cdot \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} = \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \sum_{\xi} q_{ji}^{a\xi} \dot{\Omega}_{ai}^{\xi}.$$

Раскроем сумму по $\xi \in \{x, y, z\}$ в выражении $\sum_{\xi} q_{ji}^{u\xi} \dot{\Omega}_{ui}^{\xi}$. Тогда, с учетом формул вычисления $\dot{\Omega}_{ui}^x, \dot{\Omega}_{ui}^y, \dot{\Omega}_{ui}^z$, получим

$$\begin{aligned}
\sum_{\xi} q_{ji}^{u\xi} \dot{\Omega}_{ui}^{\xi} &= q_{ji}^{ux} [u_{zi} \dot{\omega}_i^y - u_{yi} \dot{\omega}_i^z + (u_{yi} \omega_i^y + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^x - u_{xi} (\omega_i^{y2} + \omega_i^{z2})] + \\
&+ q_{ji}^{uy} [u_{xi} \dot{\omega}_i^z - u_{zi} \dot{\omega}_i^x + (u_{xi} \omega_i^x + u_{zi} \omega_i^z) \omega_i^y - u_{yi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{z2})] + \\
&+ q_{ji}^{uz} [u_{yi} \dot{\omega}_i^x - u_{xi} \dot{\omega}_i^y + (u_{xi} \omega_i^x + u_{yi} \omega_i^y) \omega_i^z - u_{zi} (\omega_i^{x2} + \omega_i^{y2})].
\end{aligned}$$

Приведем подобные при квазиускорениях, квадратах квазискоростей и произведениях разномименных квазискоростей. Тогда получим

$$\begin{aligned}
\sum_{\xi} q_{ji}^{u\xi} \dot{\Omega}_{ui}^{\xi} &= (u_{yi} q_{ji}^{uz} - u_{zi} q_{ji}^{uy}) \dot{\omega}_i^x + (u_{zi} q_{ji}^{ux} - u_{xi} q_{ji}^{uz}) \dot{\omega}_i^y + (u_{xi} q_{ji}^{uy} - u_{yi} q_{ji}^{ux}) \dot{\omega}_i^z - \\
&- (u_{yi} q_{ji}^{uy} + u_{zi} q_{ji}^{uz}) \omega_i^{x2} - (u_{xi} q_{ji}^{ux} + u_{zi} q_{ji}^{uz}) \omega_i^{y2} - (u_{xi} q_{ji}^{ux} + u_{yi} q_{ji}^{uy}) \omega_i^{z2} + \\
&+ (u_{yi} q_{ji}^{ux} + u_{xi} q_{ji}^{uy}) \omega_i^x \omega_i^y + (u_{xi} q_{ji}^{uz} + u_{zi} q_{ji}^{ux}) \omega_i^x \omega_i^z + (u_{yi} q_{ji}^{uz} + u_{zi} q_{ji}^{uy}) \omega_i^y \omega_i^z.
\end{aligned}$$

Следовательно, с учетом введенных обозначений $q_{uji}^{\xi}, q_{\xi ji}^u, q_{uji}^{xy}, q_{uji}^{xz}, q_{uji}^{yz}$ получим

$$\begin{aligned}
\mathbf{q}_j \times \mathbf{a}_j \cdot \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ei} &= \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} (q_{eji}^x \dot{\omega}_i^x + q_{eji}^y \dot{\omega}_i^y + q_{eji}^z \dot{\omega}_i^z - q_{xji}^e \omega_i^{x2} - \\
&- q_{yji}^e \omega_i^{y2} - q_{zji}^e \omega_i^{z2} + q_{eji}^{xy} \omega_i^x \omega_i^y + q_{eji}^{xz} \omega_i^x \omega_i^z + q_{eji}^{yz} \omega_i^y \omega_i^z),
\end{aligned} \tag{1.12}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{q}_j \times \mathbf{e}_j \cdot \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ai} &= \sum_{i=j+1}^N L_{ji} (q_{aji}^x \dot{\omega}_i^x + q_{aji}^y \dot{\omega}_i^y + q_{aji}^z \dot{\omega}_i^z - q_{xji}^a \omega_i^{x2} - \\
&- q_{yji}^a \omega_i^{y2} - q_{zji}^a \omega_i^{z2} + q_{aji}^{xy} \omega_i^x \omega_i^y + q_{aji}^{xz} \omega_i^x \omega_i^z + q_{aji}^{yz} \omega_i^y \omega_i^z).
\end{aligned} \tag{1.13}$$

Выразим формулу $\mathbf{q}_j \times \mathbf{e}_j \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej}$ через квазискорости и ускорения. Получим

$$\mathbf{q}_j \times \mathbf{e}_j \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_{ej} = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{\eta j} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ej}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_j = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{\eta j} \sum_{\xi} \dot{\Omega}_{ej}^{\xi} \boldsymbol{\zeta}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j = \sum_{\eta} \in_{q\eta\zeta} e_{\eta j} \dot{\Omega}_{ej}^{\xi}.$$

Теперь, подставив формулы (1.12), (1.13) и последнее выражение в (1.11), получим искомую формулу (1.10), которую можно записать в виде

$$\begin{aligned}
M_{qj} = & \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{M}_{j+1} + \mathbf{q}_j \cdot \dot{\mathbf{K}}_{0j} + \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} \sum_{\xi} q_{ji}^{e\xi} \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} + L_j p_j \sum_{\xi} \in_{q\xi\zeta} e_{\xi j} \dot{\Omega}_{ej}^{\xi} + \\
& + \sum_{i=j+1}^N L_{ji} \sum_{\xi} q_{ji}^{a\xi} \dot{\Omega}_{ai}^{\xi} + G_{qj}.
\end{aligned} \tag{1.14}$$

2. Примеры выписывания УД манипуляторов

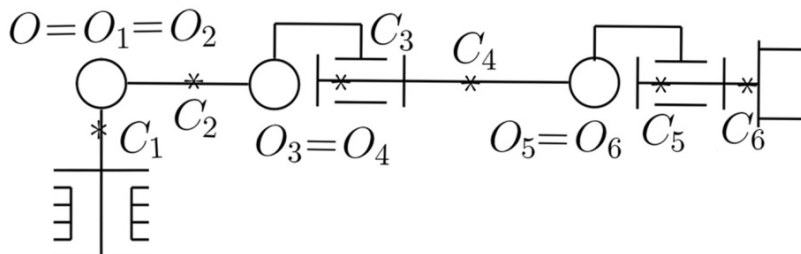
Рассмотрим ангулярные манипуляторы.

2.1. Выписывание УД ангулярного манипулятора на рисунке

Из схемы манипулятора на рисунке видно

$$\mathbf{q}_1 = \mathbf{y}_1 = \mathbf{y}, \mathbf{q}_2 = \mathbf{z}_1, \mathbf{q}_3 = \mathbf{z}_2 = \mathbf{z}_1, \mathbf{q}_4 = \mathbf{x}_4 = \mathbf{x}_3, \mathbf{q}_5 = \mathbf{z}_5 = \mathbf{z}_4, \mathbf{q}_6 = \mathbf{x}_6 = \mathbf{x}_5,$$

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i, i = 2, 3, \dots, 6, L_1 = L_3 = L_5 = 0, p_1 = p_3 = p_5 = 0.$$



Манипулятор с ангулярной системой координат
Manipulator with angular CS

По формуле (1.8) для $j = 6$, $\mathbf{q}_6 = \mathbf{x}_6$ выпишем $M_6 = \sum_{\eta} \epsilon_{x\eta\zeta} d_6^\eta (L_2 \dot{\Omega}_{26}^{e\zeta} + L_4 \dot{\Omega}_{46}^{e\zeta}) + \dot{K}_6 + G_6$, где $d_6^y = b_6 a_{66}^y = 0$, $d_6^z = b_6 a_{66}^z = 0$, $G_6 = g \sum_{\eta} \epsilon_{x\eta\zeta} d_6^\eta \zeta_6^y = 0$, т. е. $M_6 = \dot{K}_6$. Для сокращения записей будем считать, что $\text{ССК}(i) = \text{ГСК}(i)$ и $I_i^y = I_i^z$ для всех i . Тогда $I_i^a = 0$, $I_i^c = I_i^b$ и \dot{K}_j можно выписать по формуле (1.6), где

$$E_i^x = I_i^x \dot{\omega}_i^x, E_i^y = I_i^z \dot{\omega}_i^y + I_i^b \omega_i^z \omega_i^x, E_i^z = I_i^z \dot{\omega}_i^z - I_i^b \omega_i^x \omega_i^y, I_i^b = I_i^x - I_i^z, \xi_{ij}^q = \xi_i \cdot \mathbf{q}_j.$$

По формуле (1.6) с учетом равенств $x_{66}^x = 1, y_{66}^x = z_{66}^x = 0$ выпишем $\dot{K}_6 = I_6^x \dot{\omega}_6^x$. Следовательно, $M_6 = I_6^x \dot{\omega}_6^x$.

По формуле (1.8) для $j = 5$, $\mathbf{q}_5 = \mathbf{z}_5$ выпишем

$$M_5 = \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta\zeta} d_5^\eta (L_2 \dot{\Omega}_{25}^{e\zeta} + L_4 \dot{\Omega}_{45}^{e\zeta}) + \dot{K}_5 + G_5,$$

где $d_5^x = b_5 a_{55}^x + b_6 a_{65}^x = b_5 + b_6$, $d_5^y = 0$, $G_5 = g \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta\zeta} d_5^\eta \zeta_5^y = g \epsilon_{zxy} d_5^x y_5^y = g d_5^x y_5^y$.

$$\dot{\Omega}_{25}^{ey} = \sum_{\xi} \xi_{25}^y \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = \sum_{\xi} y_{52}^{\xi} \dot{\Omega}_{x2}^{\xi}, \dot{\Omega}_{45}^{ey} = \sum_{\xi} \xi_{45}^y \dot{\Omega}_{e4}^{\xi} = -s_5 \dot{\Omega}_{x4}^x + c_5 \dot{\Omega}_{x4}^y.$$

Теперь по формуле (1.6) с учетом равенств $x_{55}^x = y_{55}^x = 0, z_{55}^x = 1, x_{65}^x = 0, y_{65}^x = s_6, z_{65}^x = c_6$ выпишем

$$\dot{K}_5 = \sum_{i=5}^6 \sum_{\xi} \xi_{i5}^q E_i^{\xi} = \sum_{\xi} (\xi_{55}^z E_5^{\xi} + \xi_{65}^z E_6^{\xi}) = E_5^z + s_6 E_6^y + c_6 E_6^z.$$

Следовательно,

$$M_5 = d_5^x (L_2 \dot{\Omega}_{25}^{ey} + L_4 \dot{\Omega}_{45}^{ey}) + \dot{K}_5 + G_5 = d_5^x [L_2 (y_{52}^x \dot{\Omega}_{x2}^x + y_{52}^y \dot{\Omega}_{x2}^y + y_{52}^z \dot{\Omega}_{x2}^z) + L_4 (-s_5 \dot{\Omega}_{x4}^x + c_5 \dot{\Omega}_{x4}^y)] + \dot{K}_5 + g d_5^x y_5^y.$$

где $\dot{\Omega}_{x2}^x = x_{z2} \dot{\omega}_2^y - x_{y2} \dot{\omega}_2^z + (x_{y2} \omega_2^y + x_{z2} \omega_2^z) \omega_2^x - x_{x2} (\omega_2^{y2} + \omega_2^{z2}) = -\omega_2^{y2} - \omega_2^{z2}$,

$$\dot{\Omega}_{x2}^y = x_{x2} \dot{\omega}_2^z - x_{z2} \dot{\omega}_2^x + (x_{x2} \omega_2^x + x_{z2} \omega_2^z) \omega_2^y - x_{y2} (\omega_2^{x2} + \omega_2^{z2}) = \dot{\omega}_2^z + \omega_2^x \omega_2^y,$$

$$\dot{\Omega}_{x2}^z = x_{y2} \dot{\omega}_2^x - x_{x2} \dot{\omega}_2^y + (x_{x2} \omega_2^x + x_{y2} \omega_2^y) \omega_2^z - x_{z2} (\omega_2^{x2} + \omega_2^{y2}) = -\dot{\omega}_2^y + \omega_2^x \omega_2^z,$$

$$\dot{\Omega}_{x4}^x = -\omega_4^{y2} - \omega_4^{z2}, \dot{\Omega}_{x4}^y = \dot{\omega}_4^z + \omega_4^x \omega_4^y.$$

По формуле (1.8) для $j = 4$, $\mathbf{q}_4 = \mathbf{x}_5$ выпишем

$$M_4 = \sum_{\eta} \epsilon_{x\eta\zeta} (d_4^\eta L_2 \dot{\Omega}_{24}^{e\zeta} + L_4 \dot{\Omega}_{44}^{\eta\zeta}) + \dot{K}_4 + G_4,$$

где $d_4^y = b_4 a_{44}^y + b_5 a_{54}^y + b_6 a_{64}^y = (b_5 + b_6) a_{54}^y = d_5^x s_5$, $d_4^z = b_4 a_{44}^z + b_5 a_{54}^z + b_6 a_{64}^z = 0$,

$$G_4 = g \sum_{\eta} \epsilon_{x\eta\zeta} d_4^\eta \zeta_4^y = g \epsilon_{xyz} d_4^y z_4^y = g d_4^y z_4^y = -g d_4^y c_{23} s_4, c_{23} = \cos(q_2 + q_3),$$

$$\dot{K}_4 = \sum_{i=4}^6 \sum_{\xi} \xi_{i4}^x E_i^{\xi} = \sum_{\xi} (\xi_{44}^x E_4^{\xi} + \xi_{54}^x E_5^{\xi} + \xi_{64}^x E_6^{\xi}) =$$

$$= E_4^x + c_5 E_5^x - s_5 E_5^y + c_5 E_6^y + y_{64}^x E_6^y + z_{64}^x E_6^z, y_{64}^x = -s_5 c_6, z_{64}^x = s_5 s_6.$$

Следовательно, $M_4 = d_4^y L_2 \dot{\Omega}_{24}^{ez} + L_4 (\dot{\Omega}_{44}^{yz} - \dot{\Omega}_{44}^{zy}) + \dot{K}_4 + G_4$, где

$$\dot{\Omega}_{24}^{ez} = \sum_{\xi} \xi_{24}^z \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = \sum_{\xi} z_{42}^{\xi} \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = z_{42}^x \dot{\Omega}_{e2}^x + z_{42}^y \dot{\Omega}_{e2}^y + c_4 \dot{\Omega}_{e2}^z = s_3 s_4 \dot{\Omega}_{e2}^x - c_3 s_4 \dot{\Omega}_{e2}^y + c_4 \dot{\Omega}_{e2}^z,$$

$$\dot{\Omega}_{44}^{yz} - \dot{\Omega}_{44}^{zy} = d_{44}^y \dot{\Omega}_{44}^{ez} + e_{44}^y \dot{\Omega}_{44}^{z4} - d_{44}^z \dot{\Omega}_{44}^{ey} - e_{44}^z \dot{\Omega}_{44}^{y4} = d_4^y \sum_{\xi} \xi_{44}^z \dot{\Omega}_{ei}^{\xi} = d_4^y \dot{\Omega}_{e4}^z,$$

так как $d_{44}^y = p_4 e_{44}^y + b_5 a_{54}^y + b_6 a_{64}^y = d_4^y$, $e_{44}^y = 0$, $d_{44}^z = 0$, $e_{44}^z = 0$. Теперь

$$M_4 = d_4^y [L_2 (s_3 s_4 \dot{\Omega}_{e2}^x - c_3 s_4 \dot{\Omega}_{e2}^y + c_4 \dot{\Omega}_{e2}^z) + L_4 \dot{\Omega}_{e4}^z] + \dot{K}_4 + G_4,$$

где $\dot{\Omega}_{e2}^x = \dot{\Omega}_{x2}^x$, $\dot{\Omega}_{e2}^y = \dot{\Omega}_{x2}^y$, $\dot{\Omega}_{e2}^z = \dot{\Omega}_{x2}^z$,

$$\dot{\Omega}_{e4}^z = x_{y4} \dot{\omega}_4^x - x_{x4} \dot{\omega}_4^y + (x_{x4} \omega_4^x + x_{y4} \omega_4^y) \omega_4^z - x_{z4} (\omega_4^{x2} + \omega_4^{y2}) = -\dot{\omega}_4^y + \omega_4^x \omega_4^z.$$

Далее аналогично по формуле (1.8) для $j = 3$, $\mathbf{q}_3 = \mathbf{z}_3$ выпишем:

$$M_3 = \sum_{\eta} \in_{z\eta\zeta} (d_3^{\eta} L_2 \dot{\Omega}_{23}^{e\zeta} + L_4 \dot{\Omega}_{43}^{\eta\zeta}) + \dot{K}_3 + G_3, \quad y_{31}^y = c_{23}, \quad x_{31}^y = s_{23}, \quad s_{23} = \sin(q_2 + q_3),$$

$$G_3 = g \sum_{\eta} \in_{z\eta\zeta} d_3^{\eta} \zeta^y = g (\in_{zxy} d_3^x y_3^y + \in_{zyx} d_3^y x_3^y) = g (d_3^x y_{31}^y - d_3^y x_{31}^y) = g (d_3^x c_{23} - d_3^y s_{23}),$$

$$d_3^x = \sum_{k=3}^6 b_k a_{k3}^x = b_3 + b_4 + (b_5 + b_6) c_5 = b_3 + b_4 + d_5^x c_5, \quad b_3 = m_{o3} O_3 C_3,$$

$$d_3^y = \sum_{k=3}^6 b_k a_{k3}^y = (b_5 + b_6) a_{53}^y = d_5^y x_{53}^y = d_5^x c_4 s_5, \quad b_4 = m_{o4} O_4 C_4 + m_5 L_4,$$

$$x_{43}^z = 0, \quad y_{43}^z = s_4, \quad z_{43}^z = c_4, \quad x_{53}^z = s_4 s_5, \quad y_{53}^z = s_4 c_5, \quad z_{53}^z = c_4, \quad x_{63}^z = x_{53}^z,$$

$$y_6 = c_6 y_5 + s_6 z_5, \quad z_6 = c_6 z_5 - s_6 y_5, \quad y_{63}^z = c_6 y_{53}^z + s_6 z_{53}^z, \quad z_{63}^z = c_6 z_{53}^z - s_6 y_{53}^z,$$

$$\dot{K}_3 = \sum_{i=3}^6 \sum_{\xi} \xi_{i3}^z E_i^{\xi} = \sum_{\xi} (\xi_{33}^z E_3^{\xi} + s_4 E_4^{\xi} + c_4 E_5^{\xi} + \xi_{63}^z E_6^{\xi}) =$$

$$= E_3^z + y_{43}^z E_4^y + z_{43}^z E_4^z + \sum_{\xi} (\xi_{53}^z E_5^{\xi} + \xi_{63}^z E_6^{\xi}),$$

$$\dot{\Omega}_{23}^{ex} = \sum_{\xi} \xi_{23}^x \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = \sum_{\xi} x_{32}^x \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = x_{32}^x \dot{\Omega}_{e2}^x + x_{32}^y \dot{\Omega}_{e2}^y = c_3 \dot{\Omega}_{e2}^x + s_3 \dot{\Omega}_{e2}^y,$$

$$\dot{\Omega}_{23}^{ey} = \sum_{\xi} \xi_{23}^y \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = \sum_{\xi} y_{32}^y \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = y_{32}^x \dot{\Omega}_{e2}^x + y_{32}^y \dot{\Omega}_{e2}^y = -s_3 \dot{\Omega}_{e2}^x + c_3 \dot{\Omega}_{e2}^y, \quad e_{43}^x = x_{43}^x = 1,$$

$$e_{43}^y = 0, \quad d_{43}^x = p_4 e_{43}^x + b_5 a_{53}^x + b_6 a_{63}^x = p_4 + (b_5 + b_6) x_{54}^x = p_4 + d_5^x c_5, \quad d_{43}^y = d_5^y s_5,$$

$$\dot{\Omega}_{43}^{xy} - \dot{\Omega}_{43}^{yx} = d_{43}^x \dot{\Omega}_{43}^{ey} + e_{43}^x \dot{\Omega}_{43}^y - d_{43}^y \dot{\Omega}_{43}^{ex} - e_{43}^y \dot{\Omega}_{43}^x = (p_4 + d_5^x c_5) \dot{\Omega}_{43}^{ey} + \dot{\Omega}_{43}^y - d_5^y s_5 \dot{\Omega}_{43}^{ex},$$

$$\dot{\Omega}_{43}^{ex} = \sum_{\xi} \xi_{43}^x \dot{\Omega}_{e4}^{\xi} = x_{43}^x \dot{\Omega}_{e4}^x + y_{43}^x \dot{\Omega}_{e4}^y + z_{43}^x \dot{\Omega}_{e4}^z = \dot{\Omega}_{e4}^x,$$

$$\dot{\Omega}_{43}^{ey} = \sum_{\xi} \xi_{43}^y \dot{\Omega}_{e4}^{\xi} = x_{43}^y \dot{\Omega}_{e4}^x + y_{43}^y \dot{\Omega}_{e4}^y + z_{43}^y \dot{\Omega}_{e4}^z = c_4 \dot{\Omega}_{e4}^y - s_4 \dot{\Omega}_{e4}^z,$$

$$\dot{\Omega}_{43}^y = \sum_{k=5}^6 b_k \dot{\Omega}_{k3}^{ay} = b_5 \dot{\Omega}_{53}^{ay} + b_6 \dot{\Omega}_{63}^{ay} = b_5 \sum_{\xi} \xi_{53}^y \dot{\Omega}_{a5}^{\xi} + b_6 \sum_{\xi} \xi_{63}^y \dot{\Omega}_{a6}^{\xi},$$

$$\dot{\Omega}_{43}^{xy} - \dot{\Omega}_{43}^{yx} = (p_4 + d_5^x c_5) (c_4 \dot{\Omega}_{e4}^y - s_4 \dot{\Omega}_{e4}^z) + b_5 \sum_{\xi} \xi_{53}^y \dot{\Omega}_{a5}^{\xi} + b_6 \sum_{\xi} \xi_{63}^y \dot{\Omega}_{a6}^{\xi} - d_5^y s_5 \dot{\Omega}_{e4}^x.$$

Следовательно,

$$M_3 = L_2 [d_3^x (-s_3 \dot{\Omega}_{e2}^x + c_3 \dot{\Omega}_{e2}^y) - d_3^y (c_3 \dot{\Omega}_{e2}^x + s_3 \dot{\Omega}_{e2}^y)] + L_4 (\dot{\Omega}_{43}^{xy} - \dot{\Omega}_{43}^{yx}) + \dot{K}_3 + G_3 =$$

$$= L_2 [- (d_3^x s_3 + d_3^y c_3) \dot{\Omega}_{e2}^x + (d_3^x c_3 - d_3^y s_3) \dot{\Omega}_{e2}^y] + L_4 [(p_4 + d_5^x c_5) (c_4 \dot{\Omega}_{e4}^y - s_4 \dot{\Omega}_{e4}^z) +$$

$$+ b_5 \sum_{\xi} \xi_{53}^y \dot{\Omega}_{a5}^{\xi} + b_6 \sum_{\xi} \xi_{63}^y \dot{\Omega}_{a6}^{\xi} - d_5^y s_5 \dot{\Omega}_{e4}^x] + \dot{K}_3 + G_3.$$

Так как $\mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_3 = \mathbf{z}_2$, то движущий момент силы M_2 выпишем по формуле (1.10), т. е.

$$M_{q2} = M_2 = M_3 + \mathbf{z}_2 \cdot \dot{\mathbf{K}}_{02} + L_2 p_2 \sum_{\xi} \in_{z\xi\zeta} e_{\xi 2}^z \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} +$$

$$+ \sum_{i=3}^6 L_{2i} [\sum_{\xi} (q_{a2i}^{\xi} \dot{\omega}_i^{\xi} - Q_{\xi 2i}^a \omega_i^{\xi 2}) + q_{a2i}^{xy} \omega_i^x \omega_i^y + q_{a2i}^{xz} \omega_i^x \omega_i^z + q_{a2i}^{yz} \omega_i^y \omega_i^z] + G_{q2},$$

где $G_{q2} = g b_2 \sum_{\xi} \in_{z\xi\zeta} a_{\xi 2}^z \zeta^y = g b_2 (a_{x2} y_2^y - a_{y2} x_2^y) = g b_2 y_{21}^y = g b_2 c_2$,

$$\sum_{\xi} \in_{z\xi\zeta} e_{\xi 2}^z \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = \in_{zxy} e_{x2} \dot{\Omega}_{e2}^y = \dot{\Omega}_{x2}^y, \quad q_{a2i}^x = a_{yi} q_{2i}^{ax} - a_{zi} q_{2i}^{ay} = 0,$$

$$q_{a2i}^y = a_{zi} q_{2i}^{ax} - a_{xi} q_{2i}^{az} = -q_{2i}^{az},$$

$$q_{a2i}^z = q_{2i}^{ay}, \quad Q_{x2i}^a = 0, \quad Q_{y2i}^a = q_{2i}^{ax}, \quad Q_{z2i}^a = q_{2i}^{ax}, \quad q_{a2i}^{xy} = q_{2i}^{ay}, \quad q_{a2i}^{xz} = q_{2i}^{az}, \quad q_{a2i}^{yz} = 0.$$

Следовательно,

$$M_2 = M_3 + \mathbf{z}_2 \cdot \dot{\mathbf{K}}_{02} + L_2 p_2 \dot{\Omega}_{x2}^y +$$

$$+ \sum_{i=3}^6 L_{2i} (q_{2i}^{ay} \dot{\omega}_i^z - q_{2i}^{az} \dot{\omega}_i^y - q_{2i}^{ax} \omega_i^{y2} - q_{2i}^{ax} \omega_i^{z2} + q_{2i}^{ay} \omega_i^x \omega_i^y + q_{2i}^{az} \omega_i^x \omega_i^z) + G_{q2},$$

где по формуле (1.5) выпишем $\mathbf{z}_2 \cdot \dot{\mathbf{K}}_{02} = E_2^z$ и

$$q_{2i}^{ax} = \sum_{\eta} \in_{z\eta\zeta} e_{\eta 2}^z \zeta^x = \in_{zxy} e_{x2} y_{2i}^x + \in_{zyx} e_{y2} x_{2i}^x = y_{2i}^x = x_{i2}^y,$$

$$q_{2i}^{ay} = \sum_{\eta} \in_{z\eta\zeta} e_{\eta 2}^z \zeta^y = \in_{zxy} e_{x2} y_{2i}^y = y_{2i}^y = y_{i2}^y, \quad q_{2i}^{az} = \sum_{\eta} \in_{z\eta\zeta} e_{\eta 2}^z \zeta^z = y_{2i}^z = z_{i2}^y.$$

Таким образом,

$$M_2 = M_3 + E_2^z + L_2 p_2 \dot{\Omega}_{x2}^y +$$

$$+ \sum_{i=3}^6 L_{2i} [y_{i2}^y (\dot{\omega}_i^z + \omega_i^x \omega_i^y) - z_{i2}^y (\dot{\omega}_i^y - \omega_i^x \omega_i^z) - x_{i2}^y (\omega_i^{y2} + \omega_i^{z2})] + G_{q2},$$

где $x_{32}^y = s_3$, $y_{32}^y = c_3$, $z_{32}^y = 0$.

По формуле (1.8) для $j = 1$, $\mathbf{q}_1 = \mathbf{y}_1$ выпишем

$$\begin{aligned} M_1 &= \sum_{\eta} \epsilon_{y\eta\zeta} (L_2 \dot{\Omega}_{21}^{\eta\zeta} + L_4 \dot{\Omega}_{41}^{\eta\zeta}) + \dot{K}_1 + G_1, \\ G_1 &= g \sum_{\eta} \epsilon_{y\eta\zeta} d_1^{\eta} \zeta^y = g(\epsilon_{y\eta\zeta} d_1^x x_1^y + \epsilon_{y\eta\zeta} d_1^y z_1^y) = 0, \quad x_{11}^y = 0, \quad z_{11}^y = 0, \\ \dot{K}_1 &= \sum_{i=1}^6 \sum_{\xi} \xi_{i1}^y E_i^{\xi} = E_1^y + x_{21}^y E_2^x + y_{21}^y E_2^y + x_{31}^y E_3^x + y_{31}^y E_3^y + \sum_{\xi} (\xi_{41}^y E_4^{\xi} + \xi_{51}^y E_5^{\xi} + \xi_{61}^y E_6^{\xi}), \\ x_{21}^y &= s_2, \quad y_{21}^y = c_2, \quad x_{31}^y = s_{23}, \quad y_{31}^y = c_{23}, \quad e_{21}^z = 0, \quad e_{21}^x = c_2, \quad e_{43}^z = x_{33}^z = 0, \quad e_{43}^x = x_{33}^x = 1, \\ d_{21}^x &= p_2 e_{21}^x + \sum_{k=3}^6 b_k a_{k1}^x = p_2 c_2 + (b_3 + b_4) c_{23} + (b_5 + b_6) a_{51}^x, \\ d_{21}^z &= p_2 e_{21}^z + \sum_{k=3}^6 b_k a_{k1}^z = (b_5 + b_6) a_{51}^z = d_5^x a_{51}^z = d_5^x x_{53}^z, \\ d_{43}^x &= p_4 e_{43}^x + \sum_{k=5}^6 b_k a_{k3}^x = p_4 + b_5 a_{53}^x + b_6 a_{63}^x = p_4 + d_5^x x_{54}^x = p_4 + d_5^x c_5, \\ d_{41}^z &= p_4 e_{41}^z + \sum_{k=5}^6 b_k a_{k1}^z = b_5 a_{51}^z + b_6 a_{61}^z = d_5^x x_{51}^z = d_5^x x_{53}^z = d_{21}^z, \\ \dot{\Omega}_{21}^{zx} - \dot{\Omega}_{21}^{xz} &= d_{21}^z \dot{\Omega}_{21}^{ex} + e_{21}^z \dot{\Omega}_{21}^x - d_{21}^x \dot{\Omega}_{21}^{ez} - e_{21}^x \dot{\Omega}_{21}^z = d_5^x x_{53}^z \dot{\Omega}_{21}^{ex} - d_{21}^x \dot{\Omega}_{21}^{ez} - c_2 \dot{\Omega}_{21}^z, \\ \dot{\Omega}_{41}^{zx} - \dot{\Omega}_{41}^{xz} &= d_{41}^z \dot{\Omega}_{43}^{ex} + e_{43}^z \dot{\Omega}_{43}^x - d_{43}^x \dot{\Omega}_{43}^{ez} - e_{43}^x \dot{\Omega}_{43}^z = d_5^x x_{53}^z \dot{\Omega}_{43}^{ex} - d_{43}^x \dot{\Omega}_{43}^{ez} - \dot{\Omega}_{43}^z, \\ \dot{\Omega}_{21}^{ex} &= \sum_{\xi} \xi_{21}^x \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = c_2 \dot{\Omega}_{e2}^x - s_2 \dot{\Omega}_{e2}^y, \quad \dot{\Omega}_{21}^{ez} = \sum_{\xi} \xi_{21}^z \dot{\Omega}_{e2}^{\xi} = \dot{\Omega}_{e2}^z, \\ \dot{\Omega}_{21}^z &= \sum_{k=3}^6 b_k \dot{\Omega}_{k1}^{az} = \sum_{k=3}^6 b_k \sum_{\xi} \xi_{k1}^z \dot{\Omega}_{ak}^{\xi} = b_3 \dot{\Omega}_{a3}^z + b_4 (s_4 \dot{\Omega}_{a4}^y + c_4 \dot{\Omega}_{a4}^z) + \\ &+ \sum_{k=5}^6 b_k \sum_{\xi} \xi_{k3}^z \dot{\Omega}_{ak}^{\xi}, \\ \dot{\Omega}_{43}^{ex} &= \sum_{\xi} \xi_{43}^x \dot{\Omega}_{e4}^{\xi} = \dot{\Omega}_{e4}^x, \quad \dot{\Omega}_{43}^{ez} = \sum_{\xi} \xi_{43}^z \dot{\Omega}_{e4}^{\xi} = s_4 \dot{\Omega}_{e4}^y + c_4 \dot{\Omega}_{e4}^z, \\ \dot{\Omega}_{43}^z &= \sum_{k=5}^6 b_k \dot{\Omega}_{k3}^{az} = \sum_{k=5}^6 b_k \sum_{\xi} \xi_{k3}^z \dot{\Omega}_{ak}^{\xi}, \\ \dot{\Omega}_{21}^{zx} - \dot{\Omega}_{21}^{xz} &= d_5^x x_{53}^z (c_2 \dot{\Omega}_{e2}^x - s_2 \dot{\Omega}_{e2}^y) - d_{21}^x \dot{\Omega}_{e2}^z - \\ &- c_2 [b_3 \dot{\Omega}_{a3}^z + b_4 (s_4 \dot{\Omega}_{a4}^y + c_4 \dot{\Omega}_{a4}^z) + \sum_{k=5}^6 b_k \sum_{\xi} \xi_{k3}^z \dot{\Omega}_{ak}^{\xi}], \\ \dot{\Omega}_{41}^{zx} - \dot{\Omega}_{41}^{xz} &= d_5^x x_{53}^z \dot{\Omega}_{e4}^x - d_{43}^x (s_4 \dot{\Omega}_{e4}^y + c_4 \dot{\Omega}_{e4}^z) - \sum_{k=5}^6 b_k \sum_{\xi} \xi_{k3}^z \dot{\Omega}_{ak}^{\xi}, \end{aligned}$$

Таким образом, УД ангулярного манипулятора в квазискоростях имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & d_5^x x_{53}^z [L_2 (c_2 \dot{\Omega}_{x2}^x - s_2 \dot{\Omega}_{x2}^y) + L_4 \dot{\Omega}_{x4}^x] - L_2 (d_{21}^x \dot{\Omega}_{x2}^z + b_3 c_2 \dot{\Omega}_{x3}^z) - \\ & - (L_2 b_4 c_2 + L_4 d_{43}^x) (s_4 \dot{\Omega}_{x4}^y + c_4 \dot{\Omega}_{x4}^z) - (L_2 c_2 + L_4) \sum_{k=5}^6 b_k \sum_{\xi} \xi_{k3}^z \dot{\Omega}_{xk}^{\xi} + \\ & + E_1^y + s_2 E_2^x + c_2 E_2^y + s_{23} E_3^x + c_{23} E_3^y + \sum_{\xi} (\xi_{41}^y E_4^{\xi} + \xi_{51}^y E_5^{\xi} + \xi_{61}^y E_6^{\xi}) = M_1, \\ & E_2^z + L_2 p_2 \dot{\Omega}_{x2}^y + L_{23} (s_3 \dot{\Omega}_{x3}^x + c_3 \dot{\Omega}_{x3}^y) + \sum_{i=4}^6 L_{2i} (x_{i2}^y \dot{\Omega}_{xi}^x + y_{i2}^y \dot{\Omega}_{xi}^y + z_{i2}^z \dot{\Omega}_{xi}^z) + g b_2 c_2 = M_2 - M_3, \\ & L_2 [(d_3^x c_3 - d_3^y s_3) \dot{\Omega}_{x2}^y - (d_3^x s_3 + d_3^y c_3) \dot{\Omega}_{x2}^x] + L_4 [(p_4 + d_5^x c_5) (c_4 \dot{\Omega}_{x4}^y - s_4 \dot{\Omega}_{x4}^z) + b_5 \sum_{\xi} \xi_{53}^y \dot{\Omega}_{x5}^{\xi} + \\ & + b_6 \sum_{\xi} \xi_{63}^y \dot{\Omega}_{x6}^{\xi} - d_5^x s_5 \dot{\Omega}_{x4}^x] + E_3^z + s_4 E_4^y + c_4 E_4^z + \sum_{\xi} (\xi_{53}^z E_5^{\xi} + \xi_{63}^z E_6^{\xi}) + g (d_3^x c_{23} - d_3^y s_{23}) = M_3, \\ & d_4^y [L_2 (z_{42}^x \dot{\Omega}_{x2}^x + z_{42}^y \dot{\Omega}_{x2}^y + c_4 \dot{\Omega}_{x2}^z) + L_4 \dot{\Omega}_{x4}^z] + \\ & + E_4^x + c_5 E_5^x - s_5 E_5^y + c_5 E_6^x + y_{64}^x E_6^y + z_{64}^z E_6^z - g d_4^y c_{23} s_4 = M_4, \\ & d_5^x [L_2 (y_{52}^x \dot{\Omega}_{x2}^x + y_{52}^y \dot{\Omega}_{x2}^y + y_{52}^z \dot{\Omega}_{x2}^z) + L_4 (c_5 \dot{\Omega}_{x4}^y - s_5 \dot{\Omega}_{x4}^x)] + E_5^z + s_6 E_6^y + c_6 E_6^z + g d_5^x y_5^y = M_5, \\ & I_6^x \dot{\omega}_6^x = M_6, \end{aligned} \right.$$

где $E_i^x = I_i^x \dot{\omega}_i^x$, $E_i^y = I_i^z \dot{\omega}_i^y + I_i^p \omega_i^z \omega_i^x$, $E_i^z = I_i^z \dot{\omega}_i^z - I_i^p \omega_i^x \omega_i^y$,
 $\dot{\Omega}_{xi}^x = -\omega_i^{y2} - \omega_i^{z2}$, $\dot{\Omega}_{xi}^y = \dot{\omega}_i^z + \omega_i^x \omega_i^y$, $\dot{\Omega}_{xi}^z = -\dot{\omega}_i^y + \omega_i^x \omega_i^z$.

2.2. Влияние размещения ЦМ тел на громоздкость УД

Рассмотрим УД переносных движений ангулярного манипулятора на рисунке. То есть будем считать, что три последних тела не движутся, а ЦМ третьего тела расположен выше оси абсцисс ССК(3).

По формуле (1.10) для $j = 3$ с учетом равенств $M_4 = 0$, $L_{13} = 0$, $p_3 = 0$ выпишем

$$M_{q_3} = \mathbf{q}_3 \cdot \mathbf{K}_{03} + L_{23}[\sum_{\xi} (q_{e32}^{\xi} \dot{\omega}_2^{\xi} - Q_{\xi 32}^e \omega_2^{\xi 2}) + q_{e32}^{xy} \omega_2^x \omega_2^y + q_{e32}^{xz} \omega_2^x \omega_2^z + q_{e32}^{yz} \omega_2^y \omega_2^z] + G_{q_3},$$

где $G_{q_3} = gb_3 \sum_{\xi} \in_{q_{\xi 3}} a_{\xi 3} \zeta_3^y = gb_3 (\in_{zxy} a_{x3} y_3^y + \in_{zyx} a_{y3} x_3^y) = gb_3 (a_{x3} y_3^y - a_{y3} x_3^y)$. Пусть $a_{x3} = c_{\alpha}$, $a_{y3} = s_{\alpha}$, где $c_{\alpha} = \cos(\alpha)$, $s_{\alpha} = \sin(\alpha)$ – проекции орта \mathbf{a}_3 на оси ССК(3), т. е. α – угол между ортами \mathbf{x}_3 и \mathbf{a}_3 . Очевидно, что $y_3^y = c_{23}$, $x_3^y = s_{23}$, $c_{23} = \cos(q_{23})$, $s_{23} = \sin(q_{23})$, $q_{23} = q_2 + q_3$. Множители q_{e32}^{ξ} , $Q_{\xi 32}^e$, q_{e32}^{xy} , q_{e32}^{xz} , q_{e32}^{yz} содержат константы $e_{x2} = 1$, $e_{y2} = 0$, $e_{z2} = 0$. Выражения $q_{32}^{u\xi}$ выписываются по формуле $q_{32}^{u\xi} = \sum_{\eta} \in_{q_{\eta \xi}} u_{\eta 3}^{-} \zeta_{32}^{\xi}$, где $u = e$, т. е. $u_{\eta 3}^{-} = a_{\eta 3}$. Таким образом,

$$q_{32}^{ex} = \sum_{\eta} \in_{q_{\eta \xi}} a_{\eta 3} \zeta_{32}^x = \in_{zxy} a_{x3} y_{32}^x + \in_{zyx} a_{y3} x_{32}^x = a_{x3} y_{32}^x - a_{y3} x_{32}^x =$$

$$= c_{\alpha} y_{32}^x - s_{\alpha} x_{32}^x = -c_{\alpha} s_3 - s_{\alpha} c_3 = -s_{\alpha 3}, s_{\alpha 3} = \sin(\alpha + q_3),$$

$$q_{32}^{ey} = \sum_{\eta} \in_{q_{\eta \xi}} a_{\eta 3} \zeta_{32}^y = c_{\alpha} y_{32}^y - s_{\alpha} x_{32}^y = c_{\alpha} c_3 - s_{\alpha} s_3 = c_{\alpha 3}, c_{\alpha 3} = \cos(\alpha + q_3), q_{32}^{ez} = 0.$$

Теперь

$$q_{e32}^x = e_{y2} q_{32}^{ez} - e_{z2} q_{32}^{ey} = 0, q_{eji}^y = e_{z2} q_{32}^{ex} - e_{x2} q_{32}^{ez} = 0, q_{eji}^z = e_{x2} q_{32}^{ey} - e_{y2} q_{32}^{ex} = q_{32}^{ey} = c_{\alpha 3},$$

$$Q_{x32}^e = e_{y2} q_{32}^{ey} + e_{z2} q_{32}^{ez} = 0, Q_{y32}^e = e_{x2} q_{32}^{ex} + e_{z2} q_{32}^{ez} = q_{32}^{ex} = -s_{\alpha 3},$$

$$Q_{z32}^e = e_{x2} q_{32}^{ex} + e_{y2} q_{32}^{ey} = q_{32}^{ex} = -s_{\alpha 3},$$

$$q_{e32}^{xy} = e_{y2} q_{32}^{ex} + e_{x2} q_{32}^{ey} = q_{32}^{ey} = c_{\alpha 3}, q_{e32}^{xz} = e_{x2} q_{32}^{ez} + e_{z2} q_{32}^{ex} = 0, q_{e32}^{yz} = e_{y2} q_{32}^{ez} + e_{z2} q_{32}^{ey} = 0.$$

Следовательно,

$$M_{q_3} = M_3 = \mathbf{q}_3 \cdot \mathbf{K}_{03} + L_{23}[c_{\alpha 3} \dot{\omega}_2^z + s_{\alpha 3} (\omega_2^{y2} + \omega_2^{z2}) + c_{\alpha 3} \omega_2^x \omega_2^y] + G_{q_3}.$$

Учитывая, что $\mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_3 = \mathbf{z}_2 = \mathbf{z}_3 = \mathbf{z}_1$, по формуле (1.10) для $j = 2$ выпишем

$$M_{q_2} = M_{q_3} + \mathbf{q}_2 \cdot \mathbf{K}_{02} + d_2 \sum_{\xi} \in_{q_{\xi \zeta}} e_{\xi 2} \dot{\Omega}_{e2}^{\zeta} +$$

$$+ L_{23}[\sum_{\xi} (q_{a23}^{\xi} \dot{\omega}_3^{\xi} - Q_{\xi 23}^a \omega_3^{\xi 2}) + q_{a23}^{xy} \omega_3^x \omega_3^y + q_{a23}^{xz} \omega_3^x \omega_3^z + q_{a23}^{yz} \omega_3^y \omega_3^z] + G_{q_2},$$

$$G_{q_2} = gb_2 \sum_{\xi} \in_{q_{\xi \zeta}} a_{\xi 2} \zeta_2^y = gb_2 (\in_{zxy} a_{x2} y_2^y + \in_{zyx} a_{y2} x_2^y) = gb_2 (a_{x2} y_2^y - a_{y2} x_2^y) =$$

$$= gb_2 y_2^y = gb_2 c_2.$$

Множители q_{a23}^{ξ} , $Q_{\xi 23}^a$, q_{a23}^{xy} , q_{a23}^{xz} , q_{a23}^{yz} содержат константы $a_{x3} = c_{\alpha}$, $a_{y3} = s_{\alpha}$, $a_{z3} = 0$. Выражения $q_{23}^{a\xi}$ выписываются по формуле $q_{23}^{a\xi} = \sum_{\eta} \in_{q_{\eta \xi}} u_{\eta 2}^{-} \zeta_{23}^{\xi}$, где $u = a$, т. е. $u_{\eta 2}^{-} = e_{\eta 2}$. Таким образом,

$$q_{23}^{ax} = \sum_{\eta} \in_{q_{\eta \xi}} e_{\eta 2} \zeta_{23}^x = \in_{zxy} e_{x2} y_{23}^x + \in_{zyx} e_{y2} x_{23}^x = e_{x2} y_{23}^x - e_{y2} x_{23}^x = y_{23}^x = s_3,$$

$$q_{23}^{ay} = \sum_{\eta} \in_{q_{\eta \xi}} e_{\eta 2} \zeta_{23}^y = \in_{zxy} e_{x2} y_{23}^y + \in_{zyx} e_{y2} x_{23}^y = y_{23}^y = c_3, q_{23}^{az} = y_{23}^z = 0.$$

Теперь

$$q_{a23}^x = a_{y3} q_{23}^{az} - a_{z3} q_{23}^{ay} = 0, q_{a23}^y = a_{z3} q_{23}^{ax} - a_{x3} q_{23}^{az} = 0,$$

$$q_{a23}^z = a_{x3} q_{23}^{ay} - a_{y3} q_{23}^{ax} = c_{\alpha} c_3 - s_{\alpha} s_3 = c_{\alpha 3},$$

$$Q_{x23}^a = a_{y3} q_{23}^{ay} + a_{z3} q_{23}^{az} = s_{\alpha} c_3, Q_{y23}^a = a_{x3} q_{23}^{ax} + a_{z3} q_{23}^{az} = c_{\alpha} s_3,$$

$$Q_{z23}^a = a_{x3} q_{23}^{ax} + a_{y3} q_{23}^{ay} = c_{\alpha} s_3 + s_{\alpha} c_3 = s_{\alpha 3},$$

$$q_{a23}^{xy} = a_{y3} q_{23}^{ax} + a_{x3} q_{23}^{ay} = s_{\alpha} s_3 + c_{\alpha} c_3, q_{a23}^{xz} = a_{x3} q_{23}^{az} + a_{z3} q_{23}^{ax} = 0,$$

$$q_{a23}^{yz} = a_{y3} q_{23}^{az} + a_{z3} q_{23}^{ay} = 0.$$

Следовательно,

$$M_{q_2} = M_2 = M_3 + \mathbf{q}_2 \cdot \mathbf{K}_{03} +$$

$$+ L_{23}[c_{\alpha 3} \dot{\omega}_3^z - s_{\alpha} c_3 \omega_3^{x2} - c_{\alpha} s_3 \omega_3^{y2} - s_{\alpha 3} \omega_3^{z2} + (s_{\alpha} s_3 + c_{\alpha} c_3) \omega_3^x \omega_3^y] + G_{q_2}.$$

Из формул вычисления движущих моментов сил M_3 и M_2 следует, что в случае $\alpha = 0$, т. е. в случае размещения ЦМ C_{a3} на оси $O_3 \mathbf{x}_3$, эти формулы сокращаются почти в два раза.

3. Плоские манипуляторы

Для манипулятора в вертикальной плоскости

$$M_j = M_{j+1} + \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} [(a_{xj} c_{ij} - a_{yj} s_{ij}) \ddot{\alpha}_i + (a_{xj} s_{ij} + a_{yj} c_{ij}) \dot{\alpha}_i^2] + I_j^p \ddot{\alpha}_j +$$

$$+ \sum_{i=j+1}^N L_{ji} [(a_{xj} c_{ji} - a_{yj} s_{ji}) \ddot{\alpha}_i - (a_{xj} s_{ji} + a_{yj} c_{ji}) \dot{\alpha}_i^2] + gb_j (a_{xj} y_j^y - a_{yj} x_j^y), \quad (3.1)$$

где $j = N, N - 1, \dots, 1$;

$I_j^p = I_j^z + L_j p_j$; $M_{N+1} = 0$; $s_{ij} = \sin(\alpha_{ij})$; $c_{ij} = \cos(\alpha_{ij})$; $\alpha_{ij} = \sum_{k=i+1}^j q_k$,
 q_k – относительный угол поворота тела m_{ok} , т. е. угол, откладываемый от оси $O_k \mathbf{x}_{k-1}$ до оси $O_k \mathbf{x}_k$; $\alpha_j = \sum_{k=1}^j q_k$ – абсолютный угол поворота тела m_{oj} , т. е. угол, откладываемый от горизонтальной оси $O \mathbf{x}$ до оси $O_j \mathbf{x}_j$. В случае $\mathbf{a}_i = \mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i$

$$M_j = M_{j+1} + \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} (c_{ij} \ddot{\alpha}_i + s_{ij} \dot{\alpha}_i^2) + I_j^p \ddot{\alpha}_j + \sum_{i=j+1}^N L_{ji} (c_{ji} \ddot{\alpha}_i - s_{ji} \dot{\alpha}_i^2) + g b_j \cos(\alpha_j). \quad (3.2)$$

3.1. Доказательство формул (3.1), (3.2)

Для рассматриваемого класса манипуляторов имеем $\mathbf{q}_i = \mathbf{z}_i = \mathbf{z}$ для всех i , где \mathbf{z} – нормаль к плоскости движения $O \mathbf{x} \mathbf{y}$. Следовательно, $\omega_j^x = \omega_j^y = 0$, $\omega_j^z = \dot{\alpha}_j = \sum_{i=1}^j \dot{q}_i$ для всех j . По формуле (1.10) выпишем

$$M_{qj} = M_j = M_{j+1} + \mathbf{z} \cdot \mathbf{K}_{0j} + \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} (q_{eji}^z \ddot{\alpha}_i - Q_{zji}^e \dot{\alpha}_i^2) + L_j p_j \sum_{\xi} \epsilon_{z\xi z} e_{\xi j} \dot{\Omega}_{e_j}^z + \sum_{i=j+1}^N L_{ji} (q_{aji}^z \ddot{\alpha}_i - Q_{zji}^a \dot{\alpha}_i^2) + G_{zj},$$

где $G_{zj} = g b_j \sum_{\xi} \epsilon_{z\xi z} a_{\xi j} \zeta_j^y = g b_j (\epsilon_{zxy} a_{xj} y_j^y + \epsilon_{zyx} a_{yj} x_j^y) = g b_j (a_{xj} y_j^y - a_{yj} x_j^y)$. Учитывая равенство $\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i$, выпишем

$$\begin{aligned} q_{eji}^z &= e_{xi} q_{ji}^{ey} - e_{yi} q_{ji}^{ex} = q_{ji}^{ey} = \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta z} a_{\eta j} \zeta_{ji}^y = \epsilon_{zxy} a_{xj} y_{ji}^y + \epsilon_{zyx} a_{yj} x_{ji}^y = a_{xj} y_{ji}^y - a_{yj} x_{ji}^y, \\ Q_{zji}^e &= e_{xi} q_{ji}^{ex} + e_{yi} q_{ji}^{ey} = q_{ji}^{ex} = \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta z} a_{\eta j} \zeta_{ji}^x = \epsilon_{zxy} a_{xj} y_{ji}^x + \epsilon_{zyx} a_{yj} x_{ji}^x = a_{xj} y_{ji}^x - a_{yj} x_{ji}^x, \\ q_{aji}^z &= a_{xi} q_{ji}^{ay} - a_{yi} q_{ji}^{ax} = a_{xi} \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta z} e_{\eta j} \zeta_{ji}^y - a_{yi} \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta z} e_{\eta j} \zeta_{ji}^x = a_{xi} y_{ji}^y - a_{yi} x_{ji}^y, \\ Q_{zji}^a &= a_{xi} q_{ji}^{ax} + a_{yi} q_{ji}^{ay} = a_{xi} \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta z} e_{\eta j} \zeta_{ji}^x + a_{yi} \sum_{\eta} \epsilon_{z\eta z} e_{\eta j} \zeta_{ji}^y = a_{xj} y_{ji}^x + a_{yj} y_{ji}^y, \\ \sum_{\xi} \epsilon_{z\xi z} e_{\xi j} \dot{\Omega}_{e_j}^z &= \epsilon_{zxy} e_{xj} \dot{\Omega}_{e_j}^y = \dot{\Omega}_{e_j}^y = e_{xj} \dot{\alpha}_j = \dot{\alpha}_j. \end{aligned}$$

По формуле (1.4) $\mathbf{K}_{0j} = \sum_{\xi} (\omega_j^{\xi} \mathbf{I}_j^{\xi})'_t = (\dot{\alpha}_j \mathbf{I}_j^z)'_t$. Следовательно, $\mathbf{z}_j \cdot \mathbf{K}_{0j} = (\dot{\alpha}_j \mathbf{z}_j \cdot \mathbf{I}_j^z)'_t = I_j^z \ddot{\alpha}_j$.

Таким образом,

$$M_j = M_{j+1} + (I_j^z + L_j p_j) \ddot{\alpha}_j + \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} [(a_{xj} y_{ji}^y - a_{yj} x_{ji}^y) \ddot{\alpha}_i - (a_{xj} y_{ji}^x - a_{yj} x_{ji}^x) \dot{\alpha}_i^2] + \sum_{i=j+1}^N L_{ji} [(a_{xj} y_{ji}^y - a_{yj} x_{ji}^y) \ddot{\alpha}_i - (a_{xj} y_{ji}^x + a_{yj} y_{ji}^y) \dot{\alpha}_i^2] + G_{zj}.$$

Для $i < j$, используя обозначение $\alpha_{ij} = \sum_{k=i+1}^j q_k$, получим

$$\begin{aligned} x_{ji}^x &= \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j = \cos(\angle \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \cos(\alpha_{ij}) = c_{ij}, \quad y_{ji}^y = \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{y}_j = \cos(\alpha_{ij}) = c_{ij}, \\ y_{ji}^x &= \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{y}_j = \cos(\angle \mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) = \cos(\alpha_{ij} + 90^\circ) = -s_{ij}, \\ x_{ji}^y &= \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{x}_j = \cos(\angle \mathbf{y}_i, \mathbf{x}_j) = \cos(\alpha_{ij} + 270^\circ) = s_{ij}. \end{aligned}$$

Аналогично для $i > j$, используя обозначение $\alpha_{ji} = \sum_{k=j+1}^i q_k$, получим

$$\begin{aligned} y_{ji}^y &= \mathbf{y}_j \cdot \mathbf{y}_i = \cos(\angle \mathbf{y}_j, \mathbf{y}_i) = \cos(\alpha_{ji}) = c_{ji}, \\ y_{ji}^x &= \mathbf{y}_j \cdot \mathbf{x}_i = \cos(\angle \mathbf{y}_j, \mathbf{x}_i) = \cos(\alpha_{ji} + 270^\circ) = s_{ji}. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$M_j = M_{j+1} + I_j^p \ddot{\alpha}_j + \sum_{i=1}^{j-1} L_{ij} [(a_{xj} c_{ij} - a_{yj} s_{ij}) \ddot{\alpha}_i - (-a_{xj} s_{ij} - a_{yj} c_{ij}) \dot{\alpha}_i^2] + \sum_{i=j+1}^N L_{ji} [(a_{xj} c_{ji} - a_{yj} s_{ji}) \ddot{\alpha}_i - (a_{xj} s_{ji} + a_{yj} c_{ji}) \dot{\alpha}_i^2] + G_{zj},$$

что доказывает формулу (3.1). Если $\mathbf{a}_i = \mathbf{e}_i$ для всех i , то формула (3.1) принимает вид (3.2), что требовалось доказать.

Очевидно, что если плоскость движения тел горизонтальна, то в формулах (3.1), (3.2) достаточно положить $g = 0$. В случае наклонной плоскости движения достаточно считать g , умноженным на $\sin(\alpha)$, где α – угол наклона плоскости движения к горизонту.

3.2. Ангулярный манипулятор в вертикальной плоскости

Для $j = N = 3$ в случае $\mathbf{a}_i = \mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i$ ($i = 1, 2, 3$) по формуле (3.2) выпишем

$$M_3 = \sum_{i=1}^2 L_{i3} (c_{i3} \ddot{\alpha}_i + s_{i3} \dot{\alpha}_i^2) + I_3^p \ddot{\alpha}_3 + g b_3 \cos(\alpha_3),$$

где $\alpha_3 = q_{13} = q_1 + q_2 + q_3$. Для $j = 2$ по формуле (3.2) выпишем

$$M_2 = M_3 + L_{12} (c_{12} \ddot{\alpha}_1 + s_{12} \dot{\alpha}_1^2) + I_2^p \ddot{\alpha}_2 + L_{23} (c_{23} \ddot{\alpha}_3 - s_{23} \dot{\alpha}_3^2) + g b_2 \cos(\alpha_2),$$

где $\alpha_2 = q_{12} = q_1 + q_2$. Для $j = 1$ по формуле (3.2) выпишем

$$M_1 = M_2 + \sum_{i=2}^3 L_{1i} (c_{1i} \ddot{\alpha}_i - s_{1i} \dot{\alpha}_i^2) + I_1^p \ddot{\alpha}_1 + g b_1 \cos(\alpha_1).$$

Заключение

На заре становления робототехники как науки выяснилось, что математическое моделирование манипуляторов и, в частности, вывод их УД является сложной и громоздкой задачей, не говоря уже о решении задач динамики, идентификации параметров тел, синтеза манипуляторов с заданными свойствами и решении других задач. Классические методы вывода УД (Ньютона, Лагранжа, Эйлера, Гамильтона и т. д.) создавались и развивались не для исследования манипуляторов, поэтому их трудно использовать для этих целей. Создаются новые методы вывода УД, освобождающие исследователей от утомительной аналитической работы, и их компактного представления в символьном виде с явно выраженными геометрическими, кинематическими, статическими и инерционными параметрами, позволяющими на множестве этих параметров решать, например, задачи синтеза манипуляторов с заданными свойствами.

В статьях [3, 5, 6] отражены результаты исследований по теме «Разработка методов выписывания оптимального аналитического вида математической модели промышленного робота», поддержанных РФФИ и Челябинской областью. В этих статьях представлены новые общие виды УД и формализмы их использования в процессе ручного выписывания УД конкретных манипуляторов с вращательными и поступательными сочленениями. В настоящей статье рассмотрены манипуляторы с вращательными сочленениями. Класс таких манипуляторов очень велик. Проведенный нами обзор современных промышленных роботов на основе источников [7–16] показал, что ведущие производители роботов выпускают манипуляторы из этого класса.

Примеры выписывания УД различных манипуляторов с шестью степенями свободы в пространстве и их оптимальные (в смысле минимума математических операций) виды позволяют нам ожидать, что число пользователей предлагаемых методов будет расти. Положительный опыт использования этих методов в учебном процессе в дисциплинах «Основы механики систем тел», «Электромеханические системы» и «Мехатроника» оправдывает наши ожидания.

Список литературы

1. Tourassis V.D., Neuman C.P. The inertial characteristics of dynamic robot models // Mech. and Mach. Theory. 1985. Vol. 20, no. 1. P. 41–52.
2. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
3. Телегин, А.И. Аналитическое решение первой задачи динамики манипуляторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 28–52. DOI: 10.14529/ctcr220103
4. Кузьмина Р.П. Гироскоп в кардановом подвесе. М.: Университетская книга, 2012. 202 с. ISBN 978-5-91304-299-6.
5. Пудовкина С.Г., Телегин А.И. Выписывание формул вычисления сил в сочленениях манипуляторов в статике // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 3. С. 47–58. DOI: 10.14529/ctcr210305
6. Телегин А.И. Формализм выписывания уравнений динамики манипуляторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 4. С. 52–68. DOI: 10.14529/ctcr210405
7. Моисеев Ю.И. Применение промышленных роботов для загрузки металлообрабатывающего оборудования: учеб. пособие. Курган: КГУ, 2013. 170 с. ISBN 978-5-4217-0258-0. Текст: электронный. Лань: Электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/177883> (дата обращения: 30.01.2022).
8. Климов А.С., Машнин Н.Е. Роботизированные технологические комплексы и автоматические линии в сварке: учеб. пособие для вузов. 4-е изд., стер. СПб.: Лань, 2021. 236 с. ISBN 978-5-8114-6792-1. Текст: электронный. Лань: Электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/152449> (дата обращения: 30.01.2022).
9. Kawasaki Robotics GmbH. Каталоги и технические брошюры [Электронный ресурс]. URL: <https://pdf.directindustry.com/ru/pdf/kawasaki-robotics-gmbh-18836.html> (дата обращения: 20.03.2022).
10. Yaskawa industrial robotic arms [Электронный ресурс]. URL: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial> (дата обращения: 20.03.2022).
11. ABB industrial robots [Электронный ресурс]. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots> (дата обращения: 20.03.2022).

12. ROBOTFORUM: промышленные роботы [Электронный ресурс] URL: <http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/tur.html> (дата обращения: 20.03.2022).
13. KUKA industrial robotics heavy payloads: каталог [Электронный ресурс]. URL: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_pb_schwere_tl_en.pdf (дата обращения: 20.03.2022).
14. ROBOTOX промышленный робот ROBOTOX_P6A-750-6 [Электронный ресурс]. URL: https://robotox.ru/katalog/promyshlennyye-robotyi/6-koordinatnye-robotyi/robotox_p6a-750-6-detail (дата обращения: 13.01.2022).
15. FANUC robotics range overview [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fanuc.eu/tr/en/robots/robot-range-page> (дата обращения: 20.03.2022).
16. PUMA 500 Robot arm [Электронный ресурс]. URL: <http://rutherford-robotics.com/PUMA/> (дата обращения: 20.03.2022).

References

1. Tourassis V.D., Neuman C.P. The inertial characteristics of dynamic robot models. *Mech. and Mach. Theory*. 1985;20(1):41–52.
2. Lur'ye A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical Mechanics]. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1961. 824 p. (In Russ)
3. Telegin A.I. Analytical solution of the first problem of the manipulators' dynamics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):28–52. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220103
4. Kuz'mina R.P. *Giroskop v kardanovom podvese* [Gyroscope in gimbal]. Moscow: Universitetskaya kniga; 2012. 202 p. ISBN978-5-91304-299-6. (In Russ)
5. 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;21(3):47–58. (In Russ) DOI: 10.14529/ctcr210305
6. Telegin A.I. Formalism of writing out of manipulators dynamic equation. *Bulletin of the South Ural State University Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics*. 2021; 21(4):52–68. (In Russ) DOI: 10.14529/ctcr210405
7. Moiseyev Yu.I. *Primeneniye promyshlennykh robotov dlya zagruzki metallobrabatyvayushchego oborudovaniya: uchebnoye posobiye*. [Application of industrial robots for loading of metalworking equipment: tutorial]. Kurgan: KSU; 2013. 170 p. ISBN 978-5-4217-0258-0. Text: electronic. Lan': Electronic library system. Available at: <https://e.lanbook.com/book/177883> (accessed 30.01.2022). (In Russ)
8. Klimov A.S., Mashnin N.E. *Robotizirovannyye tekhnologicheskiye komplekсы i avtomaticheskkiye linii v svarke: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Robotized technological complexes and automatic lines in welding: textbook for universities]. 4d ed. St. Petersburg: Lan'; 2021. 236 p. ISBN 978-5-8114-6792-1. Text: electronic. Lan': Electronic library system. Available at: <https://e.lanbook.com/book/152449> (accessed 30.01.2022). (In Russ)
9. Kawasaki Robotics GmbH. *Katalogi i tekhnicheskkiye broshyury* [Catalogs and technical brochures]. Available at: <https://pdf.directindustry.com.ru/pdf/kawasaki-robotics-gmbh-18836.html> (accessed 20.03.2022).
10. *Yaskawa industrial robotic arms*. Available at: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial> (accessed 20.03.2022).
11. *ABB industrial robots*. Available at: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots> (accessed 20.03.2022).
12. *ROBOTFORUM: promyshlennyy robot* [ROBOTFORUM: industrial robots]. Available at: <http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/tur.html> (accessed 20.03.2022). (In Russ)
13. *KUKA industrial robotics heavy payloads: catalogs*. Available at: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_pb_schwere_tl_en.pdf (accessed 20.03.2022).
14. *ROBOTFORUM: promyshlennyy robot ROBOTOX_P6A-750-6* [ROBOTFORUM: industrial robots ROBOTOX_P6A-750-6]. Available at: https://robotox.ru/katalog/promyshlennyye-robotyi/6-koordinatnye-robotyi/robotox_p6a-750-6-detail (accessed 13.01.2022). (In Russ)

15. *FANUC robotics range overview*. Available at: <https://www.fanuc.eu/tr/en/robots/robot-range-page> (accessed 20.03.2022).

16. *PUMA 500 Robot arm*. Available at: <http://rutherford-robotics.com/PUMA/> (accessed 20.03.2022).

Информация об авторе

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

Information about the author

Aleksandr I. Telegin, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. of the Department of Automation, South Ural State University, Miass, Russia; teleginai@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 21.12.2021

The article was submitted 21.12.2021

МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ: ПОДХОД, ОСНОВАННЫЙ НА ТЕОРИИ ЛАТЕНТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

С.А. Баркалов, barkalov@vgasu.vrn.ru

М.А. Карпович, tb.gerolskih@cds.vrn.ru

С.И. Моисеев, mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В работе предлагается математическая модель оценки привлекательности альтернатив по качественному критерию, которая основана на методе оценки латентных переменных по модели Раша. Данная модель предназначена для оценивания привлекательности альтернатив при экспертном оценивании по методу анализа иерархий, основанному на парном сравнении альтернатив. Предлагаемый метод позволит получать объективные оценки альтернатив по линейной шкале, которые не зависят от состава оцениваемых альтернатив. **Цель исследования** заключается в описании нового математического аппарата, позволяющего получать оценки привлекательностей альтернатив и обладающего рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами оценивания. Предлагаемая модель основана на теории латентных переменных, а точнее, на модели Раша оценки латентных переменных. **Материалы и методы.** В основе описанной в работе модели оценки альтернатив лежит метод парных сравнений. Однако в отличие от традиционного математического аппарата метода анализа иерархий, методика выявления предпочтения одной альтернативы над другой для каждой их пары основана на вероятностном подходе, поэтому оценки предпочтений менее абстрактны и более объективны. В работе дано математическое обоснование предлагаемой модели, проведено сравнение результатов оценивания по предлагаемой модели с результатами, полученными традиционными методами. Также описаны вычислительные эксперименты, которые обосновывают адекватность полученных оценок. **Результаты.** Разработана математическая модель, которая является альтернативой методу анализа иерархий (Т. Саати) для оценки привлекательности альтернатив по методу парных сравнений. В отличие от традиционного метода оценивания, модель позволяет получать независимые оценки альтернатив по линейной шкале, а критерии сравнения альтернатив носят вероятностный характер, что позволяет проводить объективное оценивание. Вычислительные эксперименты показали адекватность и хорошую устойчивость полученных оценок к изменению исходных данных. **Заключение.** Предлагаемый метод обработки экспертной информации, полученной при парных сравнениях альтернатив, позволит получать максимально объективные их оценки и может быть использован как математический аппарат для систем поддержки принятия решений во многих сферах научной и практической деятельности.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, альтернативы, принятие решений, экспертное оценивание, латентные переменные, модель Раша

Для цитирования: Баркалов С.А., Карпович М.А., Моисеев С.И. Метод анализа иерархий: подход, основанный на теории латентных переменных // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 58–66. DOI: 10.14529/ctcr220205

ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: AN APPROACH BASED ON THE THEORY OF LATENT VARIABLES

S.A. Barkalov, barkalov@vgasu.vrn.ru

M.A. Karpovich, tb.gerolskih@cds.vrn.ru

S.I. Moiseev, mail@moiseevs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6136-9763>

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The paper proposes a mathematical model for evaluating the attractiveness of alternatives by a qualitative criterion, which is based on the method of evaluating latent variables according to the Rasch model. This model is intended for assessing the attractiveness of alternatives in expert evaluation using the hierarchy analysis method based on a paired comparison of alternatives. The proposed method will make it possible to obtain objective estimates of alternatives on a linear scale, which do not depend on the composition of the alternatives being evaluated. **Aim.** The purpose of the study is to describe a new mathematical apparatus that allows one to obtain estimates of the attractiveness of alternatives and has a number of advantages over traditional methods of evaluation. The proposed model is based on the theory of latent variables, and more precisely, on the Rasch model for estimating latent variables. **Materials and methods.** The basis of the model for evaluating alternatives described in the paper is the method of paired comparisons. However, unlike the traditional mathematical apparatus of the hierarchy analysis method, the method for identifying the preference of one alternative over another for each of their pairs is based on a probabilistic approach, so preference estimates are less abstract and more objective. The paper gives a mathematical substantiation of the proposed model, compares the results of estimation by the proposed model with the results obtained by traditional methods. Computational experiments are also described that substantiate the adequacy of the obtained estimates. **Results.** A mathematical model has been developed, which is an alternative to the hierarchy analysis method (T. Saaty) for assessing the attractiveness of alternatives using the method of paired comparisons. Unlike the traditional evaluation method, the model allows you to obtain independent estimates of alternatives on a linear scale, and the criteria for comparing alternatives are probabilistic in nature, which allows for an objective assessment. Computational experiments have shown the adequacy and good stability of the obtained estimates to changes in the initial data. **Conclusion.** The proposed method for processing expert information obtained from paired comparisons of alternatives will make it possible to obtain the most objective assessments of them and can be used as a mathematical apparatus for decision support systems in many areas of scientific and practical activity.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, alternatives, decision-making, expert evaluation, latent variables, Rasch model

For citation: Barkalov S.A., Karpovich M.A., Moiseev S.I. Analytic hierarchy process: An approach based on the theory of latent variables. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):58–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220205

Введение

В теории аналитического планирования, при экспертном оценивании и принятии решений часто используются методы, которые опираются на математические модели, основанные на парном сравнении альтернатив. Оценки привлекательности альтернатив обычно находятся на основе математического аппарата метода анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process) – АИР. Этот метод основан на идее парных сравнений всего множества альтернатив и имеет несколько разновидностей. Первоначальной версией является аддитивный метод аналитической иерархии, разработанный Томасом Саати (Thomas Saaty) [1, 2]. Немного позднее был разработан усовершенствованный математический аппарат, который назвали мультипликативным методом АИР [3, 4].

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является описание нового математического аппарата, позволяющего получать оценки привлекательностей альтернатив и обладающего рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами оценивания. Предлагаемая модель основана на теории латентных переменных, а точнее, на модели Раша (G. Rasch) оценки латентных переменных [5, 6].

Традиционные методы оценивания, основанные на парном сравнении альтернатив, предполагают использование некоторой вербальной шкалы относительной важности одной альтернативы перед другой. Результаты сравнения представляют собой некоторую матрицу парных сравнений, которая с помощью определенного математического аппарата переводится в количественные показатели привлекательности каждой альтернативы. Однако оценки, полученные с помощью АНР и мультипликативного АНР, характеризуются следующими недостатками.

1. Вербальная шкала относительной важности достаточно абстрактна и поэтому в значительной степени субъективна, полученные по ней оценки представляют лишь субъективные мнения экспертов и не несут четкого смысла.

2. Оценки привлекательности альтернатив сильно зависят от их множества и состава, добавление либо исключение одной или нескольких альтернатив сильно влияет на полученные оценки и может привести к результату, значительно отличающемуся от первоначального.

3. Оценки привлекательности альтернатив не линейны относительно частных оценок из матрицы парных сравнений, по которым они получены.

Предлагаемая в работе модель, как будет показано далее, позволит в какой-то степени нивелировать указанные недостатки, что позволит получать более объективные оценки привлекательности альтернатив.

Кроме того, в работе будут приведены результаты вычислительных экспериментов, которые обоснуют адекватность полученных оценок по предлагаемой модели.

Постановка задачи оценки альтернатив при парных сравнениях

Рассмотрим n альтернатив, оцениваемых по некоторому качественному критерию, которые обозначим как A_1, A_2, \dots, A_n . Исходными данными для методов парных сравнений служит матрица x_{ij} , в которой приведены степени предпочтений h альтернативы A_i по сравнению с альтернативой A_j . В методах АНР и мультипликативного АНР для нахождения элементов этой матрицы используют вербальную шкалу, на основании которой определяется каждый элемент матрицы x_{ij} , при условии, что альтернатива A_i предпочтительнее альтернативы A_j : $x_{ij} = h$, если наоборот, то $x_{ij} = 1/h$, то есть $x_{ij} = 1/x_{ji}$. Степени предпочтений h , согласно [1, 3], приведены в табл. 1 (столбцы 1 и 2).

Вербальные шкалы степени предпочтений

Таблица 1

Table 1

Verbal preference scales

Степени предпочтения 1-й альтернативы перед 2-й	Значение h для АНР и мультипликативного АНР	Вероятность p для метода, основанного на модели Раша
1	2	3
Одинаковые предпочтения	1	0,5
Слабое превосходство	3	0,6
Умеренное превосходство	5	0,7
Значительное превосходство	7	0,8
Большое превосходство	9	0,9
Однозначное предпочтение	—	1

Приведем кратко методику расчета оценок привлекательности альтернатив по мультипликативному АНР, так как далее будет проводиться сравнение оценок этого метода с оценками, полученными по модели Раша. На основании матрицы парных сравнений x_{ij} сначала находят собственные векторы для каждой альтернативы w_i , которые являются ненормированными оценками

альтернатив: $w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{ij}}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Далее производится нормирование так, чтобы сумма

оценок равнялась единице: $W_i = w_i / \sum_{k=1}^n w_k$. Полученные значения W_i и будут служить оценками привлекательности альтернатив, полученными по мультипликативному АНР.

Математический аппарат получения оценок по модели Раша

Перейдем теперь непосредственно к математическому аппарату получения оценок привлекательности альтернатив по АНР, основанному на модели Раша.

Первое отличие данного метода от традиционных расчетов по АНР заключается в получении матрицы парных сравнений, которую в подходе модели Раша будем обозначать через x_{ij}^{Rm} . Степень предпочтения одной альтернативы над другой в паре носит вероятностный характер. Для его оценивания используется некоторая вероятность p , которая имеет смысл того, что некоторый эксперт, проводящий оценку, выберет первую альтернативу по сравнению со второй. Другими словами, оценка p характеризует некоторую меру степени предпочтения одной альтернативы перед другой по линейной шкале.

На языке теории нечетких множеств величину p можно интерпретировать как функцию принадлежности первой альтернативы к категории привлекательных в группе со второй альтернативой. Такое понятие степени предпочтения менее абстрактно и более понятно, чем для традиционных методов АНР, так как характеризуется пропорциональностью выбора одной альтернативы перед другой.

Если в экспертизе участвует группа экспертов, то для расчета величины p можно использовать долю экспертов в группе, которые выбирают первую альтернативу. Кроме того, для оценки p также можно использовать вербальную шкалу предпочтений, она приведена в табл. 1 (столбцы 1 и 3).

Полученная на основании параметра p матрица парных сравнений x_{ij}^{Rm} будет обладать следующими свойствами: $x_{ij}^{Rm} = 1 - x_{ji}^{Rm}$, $x_{ii}^{Rm} = \frac{1}{2}$.

Далее обоснуем математически методику расчета оценок привлекательности альтернатив на основе дихотомической модели Раша [5, 6].

Предположим, что эксперт путем парных сравнений на вероятностной основе пытается определить предпочтение одной альтернативы над другой.

Рассмотрим две альтернативы A_i и A_j . Обозначим P_{im} – вероятность выбора эксперта альтернативы A_i по сравнению с некоторой третьей альтернативой A_m . Соответственно, вероятность невыбора альтернативы A_i по сравнению с A_m будет равна $(1 - P_{im})$. Для альтернативы A_j по сравнению с A_m применяются аналогичные рассуждения. Тогда оценка степени привлекательности U_{ij} альтернативы A_i (в единицах оценки альтернативы A_j) путем сравнения их с некой альтернативой A_m будет, согласно теореме умножения вероятностей, пропорциональна вероятности выбора A_i по сравнению с A_m , умноженной на вероятность невыбора A_j по сравнению с A_m : $U_{ij} \sim P_{im}(1 - P_{jm})$. Аналогично оценка привлекательности A_j по сравнению с A_i будет $U_{ji} \sim (1 - P_{im})P_{jm}$.

Отношение этих параметров можно записать как

$$\frac{U_{i/j}}{U_{j/i}} \Big|_m = \frac{P_{im}(1 - P_{jm})}{P_{jm}(1 - P_{im})}. \quad (1)$$

Так как не накладывалось никаких условий на промежуточную альтернативу, с которой проводилось сравнение A_m , то будет справедливо равенство

$$\frac{U_{i/j}}{U_{j/i}} \Big|_m = \frac{P_{im}(1 - P_{jm})}{P_{jm}(1 - P_{im})} = \frac{P_{ik}(1 - P_{jk})}{P_{jk}(1 - P_{ik})} = \frac{U_{i/j}}{U_{j/i}} \Big|_k. \quad (2)$$

В свою очередь из выражения (2) можно записать следующее

$$\left(\frac{P_{im}}{1 - P_{im}} \right) = \left(\frac{P_{ik}}{1 - P_{ik}} \right) \left(\frac{1 - P_{jk}}{P_{jk}} \right) \left(\frac{P_{jm}}{1 - P_{jm}} \right).$$

Тогда при $m = j$ получим

$$\left(\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right) = \left(\frac{P_{ik}}{1 - P_{ik}} \right) \left(\frac{1 - P_{jk}}{P_{jk}} \right) \left(\frac{P_{jj}}{1 - P_{jj}} \right). \quad (3)$$

Требуется получить такую методику расчета, чтобы оценки альтернатив в паре не завесили от других альтернатив, то есть отношение (3) было справедливо для оценок любых пар альтерна-

тив с номерами m и k . С целью обеспечения выполнения этого требования в качестве исходных точек для проведения сравнительного анализа возьмем уровень оценок некоторой альтернативы с индексом 0. Помимо этого необходима единая шкала измерения оценок альтернатив по произвольному критерию, при этом за точку отсчета в ней удобно принять оценку альтернативы с индексом 0. Также учтем, что значение параметра P_{mm} , а также P_{00} будет равно 0,5. Применив это (при $k = 0$), получим из (3) выражение

$$\left(\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right) = \left(\frac{P_{i0}}{1 - P_{i0}} \right) \left(\frac{1 - P_{j0}}{P_{j0}} \right) \left(\frac{P_{jj}}{1 - P_{jj}} \right) = \left(\frac{P_{i0}}{1 - P_{i0}} \right) \left(\frac{1 - P_{j0}}{P_{j0}} \right) = \frac{U_{i/j}}{U_{i/j}} \Big|_0. \quad (4)$$

Следует заметить, что в выражении (4) величина $\frac{P_{i0}}{1 - P_{i0}} = b_i$ – это оценка привлекательности

альтернативы A_i , а $\frac{1 - P_{j0}}{P_{j0}} = \frac{1}{b_j}$ – величина, обратная той же оценке альтернативы A_j . Оценки привлекательности альтернатив, полученные таким образом, не зависят от множества оцениваемых альтернатив. Учитывая также соотношение вероятностей $P_{ij} = 1 - P_{ji}$, можно для (4) записать

$$\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} = \frac{P_{ij}}{P_{ji}} = \frac{b_i}{b_j}. \quad (5)$$

Таким образом, отношение оценок привлекательности альтернатив равно отношению вероятностей предпочесть одну из них другой, то есть оценки пропорциональны вероятностям выбора соответствующих им альтернатив, что и предполагалось ранее.

Найдем вероятность P_{ij} . При этом, чтобы соблюдалось свойство линейности оценок b_i , удобнее использовать их логарифмы. Прологарифмируем (5), получим: $\ln \left(\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right) = \ln(b_i) - \ln(b_j)$.

Обозначая $\ln b_i = W_i^{Rm}$, можно записать: $\ln \left(\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} \right) = W_i^{Rm} - W_j^{Rm}$, что аналогично $\frac{P_{ij}}{1 - P_{ij}} = e^{W_i^{Rm} - W_j^{Rm}}$, при этом параметр W_i^{Rm} будет иметь смысл ненормированной оценки привлекательности альтернативы A_i , полученной по модели Раша.

Исходя из этого, можно вычислить вероятность P_{ij} предпочтения альтернативы A_i по сравнению с альтернативой A_j :

$$P_{ij} = \frac{e^{W_i^{Rm} - W_j^{Rm}}}{1 + e^{W_i^{Rm} - W_j^{Rm}}}. \quad (6)$$

Следует отметить, что полученное выражение (6) представляет собой логистическую функцию и аналогично формуле расчета вероятностей при оценке латентных переменных по дихотомической модели Раша [5].

Перейдем теперь к вопросу нахождения оценок привлекательности альтернатив W_i^{Rm} . Тут следует отметить, что элементы матрицы парных сравнений, полученные в вероятностном подходе x_{ij}^{Rm} , имеют смысл тех же вероятностей (6), но полученных на основании экспертного мнения. Следовательно, вероятность (6) должна стремиться к эмпирическим вероятностям x_{ij}^{Rm} . Данную задачу можно решить в подходе модели Раша, основанном на методе наименьших квадратов, который описан в работах [7–10]. Согласно этому методу, параметры W_i^{Rm} модели (6) выбираются так, чтобы сумма квадратов отклонений эмпирических данных x_{ij}^{Rm} от расчетных вероятностей (6) была наименьшей. Математически это сводится к решению оптимизационной задачи:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_{ij}^{Rm} - P_{ij})^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(x_{ij}^{Rm} - \frac{e^{w_i^{Rm} - w_j^{Rm}}}{1 + e^{w_i^{Rm} - w_j^{Rm}}} \right)^2 \rightarrow \min . \quad (7)$$

Оптимизационная задача (7) будет дополняться условием неотрицательности полученных оценок:

$$w_i^{Rm} \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, n . \quad (8)$$

После того как найдены оценки привлекательности альтернатив w_i^{Rm} , их необходимо нормировать так, чтобы их сумма равнялась единице:

$$W_i^{Rm} = \frac{w_i^{Rm}}{\sum_{k=1}^n w_k^{Rm}}; \quad i = 1, 2, \dots, n . \quad (9)$$

Полученные по формуле (9) оценки W_i^{Rm} позволят определить степень привлекательности альтернатив на основе модели Раша оценивания латентных переменных.

Проверка адекватности полученных оценок

Для проверки адекватности оценок альтернатив по модели Раша было решено сравнить эти оценки с оценками, полученными на основе хорошо зарекомендовавшего себя и апробированного мультипликативного АНР.

Для этих целей были проведены вычислительные эксперименты по методике, описанной в работах [11–14], которые заключались в генерации различных матриц парных сравнений, на основании которых вычислялись оценки W_i и W_i^{Rm} , а затем вычислялась согласованность оценок с помощью корреляционного анализа. Связь между матрицами x_{ij} и x_{ij}^{Rm} осуществлялась в соответствии с табл. 1.

Приведем результаты одного из таких вычислительных экспериментов. Он предполагал оценивание $n = 10$ альтернатив с матрицами парных сравнений, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2
Матрицы парных сравнений для вычислительного эксперимента

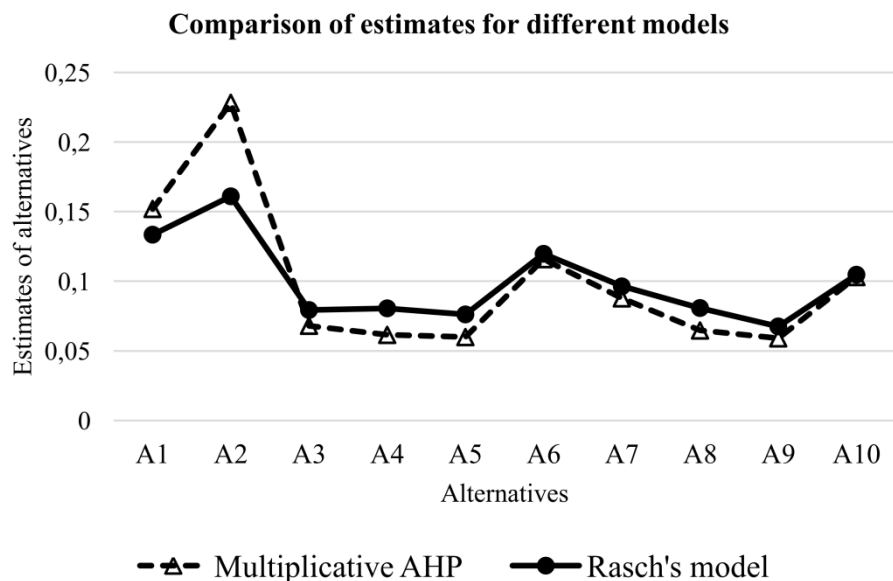
Таблица 2

Pairwise comparison matrices for computational experiment

Table 2

	Матрица x_{ij}										Матрица x_{ij}^{Rm}									
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}
A_1	1	1/5	1/7	3	7	5	1	9	1	7	0,5	0,3	0,2	0,6	0,8	0,7	0,5	0,9	0,5	0,8
A_2	5	1	7	1/7	7	9	7	1/9	9	5	0,7	0,5	0,8	0,2	0,8	0,9	0,8	0,1	0,9	0,7
A_3	7	1/7	1	3	5	1/7	1/7	7	1/5	1/7	0,8	0,2	0,5	0,6	0,7	0,2	0,2	0,8	0,3	0,2
A_4	1/3	7	1/3	1	1/7	1/3	1/5	5	3	1/5	0,4	0,8	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3	0,7	0,6	0,3
A_5	1/7	1/7	1/5	7	1	3	1/7	1	7	1/5	0,2	0,2	0,3	0,8	0,5	0,6	0,2	0,5	0,8	0,3
A_6	1/5	1/9	7	3	1/3	1	9	7	9	1/7	0,3	0,1	0,8	0,6	0,4	0,5	0,9	0,8	0,9	0,2
A_7	1	1/7	7	5	7	1/9	1	7	1/5	1/7	0,5	0,2	0,8	0,7	0,8	0,1	0,5	0,8	0,3	0,2
A_8	1/9	9	1/7	1/5	1	1/7	1/7	1	9	7	0,1	0,9	0,2	0,3	0,5	0,2	0,2	0,5	0,9	0,8
A_9	1	1/9	5	1/3	1/7	1/9	5	1/9	1	9	0,5	0,1	0,7	0,4	0,2	0,1	0,7	0,1	0,5	0,9
A_{10}	1/7	1/5	7	5	5	7	7	1/7	1/9	1	0,2	0,3	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,2	0,1	0,5

На основании данных из табл. 2 были получены оценки привлекательности альтернатив по мультипликативному АНР и по методу, основанному на модели Раша. Результаты оценивания представлены на рисунке.



Результаты оценивания альтернатив по мультипликативной АНР и модели Раша
The results of evaluating alternatives by multiplicative AHP and Rasch model

Как видно из рисунка, оценки альтернатив, полученные разными методами, достаточно согласованы, коэффициент корреляции для данного примера составит 0,977. Ранжирование альтернатив на основании оценок по разным методам также совпадает. Однако между оценками существуют и различия, что связано с различными математическими моделями обработки информации.

Было проведено около 50 аналогичных вычислительных экспериментов для различного числа альтернатив, всегда получались аналогичные результаты. Средний коэффициент корреляции оказался равным 0,972. Все это подтверждает адекватность оценок привлекательности альтернатив по АНР с математическим аппаратом, основанным на модели Раша оценки латентных переменных.

Заключение

Предложена и математически обоснована модель обработки экспертной информации при оценке привлекательности альтернатив по методу анализа иерархий, которая основана на модели Раша оценок латентных переменных. Основные преимущества данной модели по сравнению с традиционными методами АНР следующие [15]:

- показатель превосходства одной альтернативы над другой носит вероятностный характер, поэтому он менее абстрактный и более объективный;
- оценки привлекательности альтернатив намного меньше зависят от набора оцениваемых альтернатив;
- полученные оценки альтернатив измеряются по линейной шкале.

Проведенные вычислительные эксперименты показали адекватность оценок альтернатив, полученных по модели Раша, и пригодность предложенной методики оценивания альтернатив к практическому применению.

Список литературы

1. Saaty Thomas L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors // RACSAM. 2008. Vol. 102, no. 2. P. 251–318.
2. Drake P.R. Using the Analytic Hierarchy Process in Engineering Education // International Journal of Engineering Education. 1998. Vol. 14, no. 3. P. 191–196.
3. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // J. Multi-Criteria Decision Analysis. 1993. Vol. 2. P. 87–110. DOI: 10.1002/MCDA.4020020205
4. Lootsma F.A., Schuijt H. The multiplicative AHP, SMART and ELECTRE in a common context // J. Multi-Criteria Decision Analysis. 1997. Vol. 6. P. 185–196.

5. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests. Copenhagen, Denmark: Danish Institute for Educational Research, 1960.
6. Rasch Models: Foundations, Recent Developments, and Applications / Editors: G.H. Fischer, I.W. Molenaar. Springer, 1997.
7. Маслак А.А., Моисеев С.И. Модель Раша оценки латентных переменных и ее свойства: моногр. Воронеж: НПЦ «Научная книга», 2016. 177 с.
8. Моисеев С.И. Модель Раша оценки латентных переменных, основанная на методе наименьших квадратов // Экономика и менеджмент систем управления. 2015. № 2.1 (16). С. 166–172.
9. Моисеев С.И., Зенин А.Ю. Методы принятия решений, основанные на модели Раша оценки латентных переменных // Экономика и менеджмент систем управления. 2015. № 2.3 (16). С. 368–375.
10. Модель оценивания профессиональной пригодности работников, основанная на теории латентных переменных / С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, С.И. Моисеев, Т.В. Насонова // Экономика и менеджмент систем управления. 2017. № 1.1 (23). С. 140–150.
11. Соколов А.В., Токарев В.В. Методы оптимальных решений. В 2 т. Т. 1: Общие положения. Математическое программирование. М.: Физматлит, 2012. 564 с.
12. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Порядина В.Л. Математические методы и модели в управлении и их реализация в MS Excel. Воронеж: Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2015. 265 с.
13. Kuzmenko R.V., Moiseev S.I., Stepanov L.V. Method for measuring of latent indicators of continuous sets of original information data // Proc. 2nd Int. Ural Conf. on Measurements (UralCon). South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russian Federation. 2017. P. 211–216.
14. Averina T.A., Barkalov S.A., Moiseev S.I. Application of the Theory of Latent Variables to Personnel Management Methods // SOCIETY, INTEGRATION, EDUCATION. Proc. of the Int. Scientific Conf. May 25th–26th, 2018. Rezekne: Rezekne Academy of Technologies, 2018. Vol. VI. P. 42–52. DOI: 10.17770/sie2018vol1.3121
15. Маслак А.А., Моисеев С.И., Осипов С.А. Сравнительный анализ оценок параметров модели Раша, полученных методами максимального правдоподобия и наименьших квадратов // Проблемы управления. 2015. № 5. С. 58–66.

References

1. Saaty Thomas L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. *RACSAM*. 2008;102(2):251–318.
2. Drake P.R. Using the Analytic Hierarchy Process in Engineering Education. *International Journal of Engineering Education*. 1998;14(3):191–196.
3. Lootsma F.A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART. *J. Multi-Criteria Decision Analysis*. 1993;2:87–110. DOI: 10.1002/MCDA.4020020205
4. Lootsma F.A., Schuijt H. The multiplicative AHP, SMART and ELECTRE in a common context. *J. Multi-Criteria Decision Analysis*. 1997;6:185–196.
5. Rasch G. *Probabilistic models for some intelligence and attainment tests*. Copenhagen, Denmark: Danish Institute for Educational Research; 1960.
6. Fischer G.H., Molenaar I.W., editors. *Rasch Models: Foundations, Recent Developments, and Applications*. Springer, 1997.
7. Maslak A.A., Moiseyev S.I. *Model' Rasha otsenki latentnykh peremennykh i eye svoystva: monogr.* [Rasch model of latent variable estimation and its properties. Monograph]. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2016. 177 p. (In Russ.)
8. Moiseev S.I. [The Rasch model for estimating latent variables based on the least squares method]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2015;2.1(16):166–172. (In Russ.)
9. Moiseev S.I., Zenin A.Yu. [Decision-making methods based on the Rasch model for estimating latent variables]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2015;2.3(16):368–375 (In Russ.)
10. Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Moiseev S.I., Nasonova T.V. [A model for assessing the professional suitability of employees based on the theory of latent variables]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2017;1.1(23):140–150 (In Russ.)

11. Sokolov A.V., Tokarev V.V. *Metody optimal'nykh resheniy. V 2 t. T. 1: Obshchiye polozheniya. Matematicheskoye programmirovaniye* [Methods of Optimal Solutions. In 2 vols. Vol. 1: Generalities. Mathematical Programming]. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2012. 564 p. (In Russ.)
12. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Poryadina V.L. *Matematicheskiye metody i modeli v upravlenii i ikh realizatsiya v MS Excel* [Mathematical methods and models in management and their implementation in MS Excel]. Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering Publ.; 2015. 265 p. (In Russ.)
13. Kuzmenko R.V., Moiseev S.I., Stepanov L.V. Method for measuring of latent indicators of continuous sets of original information data. In: *Proc. 2nd Int. Ural Conf. on Measurements (UralCon). South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russian Federation*; 2017. P. 211–216.
14. Averina T.A., Barkalov S.A., Moiseev S.I. Application of the Theory of Latent Variables to Personnel Management Methods. *SOCIETY, INTEGRATION, EDUCATION. Proc. of the Int. Scientific Conf. May 25th–26th, 2018*. Rezekne: Rezekne Academy of Technologies; 2018. Vol. VI. P. 42–52. DOI: 10.17770/sie2018vol1.3121
15. Maslak A.A., Moiseev S.I., Osipov S.A. [Comparative analysis of estimates of the Rasch model parameters obtained by maximum likelihood and least squares methods]. *Problemy upravleniya*; 2015;(5):58–66. (In Russ.)

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; barkalov@vgasu.vrn.ru.

Карпович Мирон Абрамович, д-р техн. наук, проф. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; tb.gerolskih@cds.vrn.ru.

Моисеев Сергей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; mail@moiseevs.ru.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; barkalov@vgasu.vrn.ru.

Miron A. Karpovich, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; tb.gerolskih@cds.vrn.ru.

Sergey I. Moiseev, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; mail@moiseevs.ru.

Статья поступила в редакцию 31.03.2022

The article was submitted 31.03.2022

СОЗДАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ

Н.В. Бильфельд¹, bilfeld@mail.ru
С.А. Варламова¹, varlamovasa@mail.ru
В.В. Захаров², metkol@yandex.ru

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал, Березники, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В процессе жизненного цикла технологические объекты могут быть подвержены различным изменениям, возникающим из-за особенностей технологических процессов. К таким изменениям можно отнести, например образование накипи в агрегатах. В результате математическое описание объекта, полученное на предыдущих стадиях жизненного цикла, может не соответствовать текущему состоянию объекта автоматизации. Такие системы называют робастными. **Целью работы** является определение функций для анализа и описания подогревателя высокого давления средствами системы MATLAB с применением библиотеки *Robust Toolbox*. **Материалы и методы.** Исходными данными работы являлась передаточная функция подогревателя по каналу расхода, полученная экспериментальным образом. К этому объекту был синтезирован регулятор и представлено описание системы и переходный процесс в MATLAB. Следующим этапом работы был синтез неопределенных параметров с помощью функции *ureal*. В результате объект получил не конкретные значения параметров, а интервал для каждого из параметров объекта. В результате был получен объект с неопределенными параметрами и графики его переходных процессов. На следующем этапе были выделены номинальные параметры объекта и проверка устойчивости системы. Система с номинальными параметрами устойчива, поэтому можно выполнить анализ системы с неопределенными параметрами. Для этого выполнен расчет робастной устойчивости. Расчет робастной устойчивости выполнен средствами MATLAB с применением функции *robuststab*. В результате работы функция позволяет определить ряд значений для оценки системы и комбинацию ее параметров, при которой рассматриваемая система становится неустойчивой. На следующем этапе исследования были определены наихудшие параметры системы из выбранного набора, полученные значения отличаются от параметров робастной неустойчивости системы. В результате получены передаточные функции системы с номинальными параметрами, наихудшими параметрами и неустойчивой системы, построены передаточные функции. **Результаты.** С помощью инструмента анализа робастных систем выполнено исследование объекта, определены диапазоны параметров, при которых система будет оставаться устойчивой.

Ключевые слова: неопределенная система, робастное управление, неопределенные параметры, робастные методы, анализ устойчивости, номинальные параметры

Для цитирования: Бильфельд Н.В., Варламова С.А., Захаров В.В. Создание и тестирование моделей неопределенных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 67–75. DOI: 10.14529/ctcr220206

CREATING AND TESTING MODELS OF UNCERTAINTY SYSTEMS

N.V. Bil'fel'd¹, bilfeld@mail.ru
S.A. Varlamova¹, varlamovasa@mail.ru
V.V. Zakharov², metkol@yandex.ru

¹ Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Technological objects can be subject to various changes in the life cycle process, arising from the peculiarities of technological processes. Such changes include, for example, the formation of scale in the aggregates. As a result, the mathematical description of the object obtained at the previous stages of the life cycle may not correspond to the current state of the automation object. Such systems are called robust. **The aim of the work** is to define functions for the analysis and description of a high-pressure heater using the MATLAB system, using the *Robust Toolbox* library. **Materials and methods.** The initial data of the work was the transfer function of the heater through the flow channel, obtained experimentally. A controller was synthesized for this object and a description of the system and the transient process in MATLAB were presented. The next stage of work was the synthesis of uncertain parameters using the *ureal* function. As a result, the object received not specific parameter values, but an interval for each of the object's parameters. As a result, an object with uncertain parameters and graphs of its transients was obtained. At the next stage, the nominal parameters of the object were identified and the stability of the system was checked. A system with nominal parameters is stable, so it is possible to perform an analysis of a system with uncertain parameters. To do this, the calculation of robust stability was performed. Robust stability calculation was performed by means of MATLAB, using the *robuststab* function. As a result of the work, the function allows you to determine a number of values for estimating the system and a combination of system parameters at which the system under consideration becomes unstable. At the next stage of the study, the worst parameters of the system from the selected set were determined; the obtained values differ from the parameters of the robust instability of the system. As a result, the transfer functions of a system with nominal parameters, the worst parameters, and an unstable system are obtained, and the transfer functions are constructed. **Results.** With the help of the tool for analyzing robust systems, the study of the object was carried out, the ranges of parameters were determined, under which the system will remain stable.

Keywords: uncertain system, robust control, uncertain parameters, robust methods, stability analysis, nominal parameters

For citation: Bil'fel'd N.V., Varlamova S.A., Zakharov V.V. Creating and testing models of uncertainty systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):67–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220206

Введение

Очень часто технологические объекты подвержены различным изменениям (флуктуациям). В частности, в трубах теплообменников может появиться накипь из-за некачественной воды. Реакции в аппаратах синтеза могут происходить с выделением или поглощением тепла и т. д. Другими словами, математическое описание объекта, полученное в процессе его идентификации, может не соответствовать текущему описанию объекта. Управление такими системами называется робастным управлением [1–4], если оно справляется с возникающими в системе изменениями.

В MATLAB имеется большой перечень инструментов (функций), предназначенных для работы с робастными системами [5]. Все они находятся в библиотеке (*toolbox*) *Robust*.

Цель данной статьи – рассмотреть отдельные функции из этого набора для анализа и описания робастной системы управления на примере подогревателя высокого давления (ПВД). Такие подогреватели используются на паровых котлах для предварительного подогрева воды, поступающей в барабан котла [6, 7].

Экспериментально полученная (безразмерная) передаточная функция подогревателя по каналу расход пара – температура воды имеет вид

$$W(s) = \frac{1}{50s^2 + 20s + 1}.$$

Настройки оптимального ПИ-регулятора имеют значение $Kp = 3$, $Ti = 2$. Тогда передаточная функция регулятора опишется как [8]

$$C(s) = \frac{6s + 1}{2s}.$$

Создадим неопределенную систему с нашим объектом и регулятором [9–11].

1. Создание неопределенной системы

Опишем в MATLAB наш объект и регулятор. Для этого выполним команды:

$$W = tf([1],[50 20 1])$$

$$C = tf([6 1],[2 0]).$$

Получим передаточную функцию замкнутой системы и построим переходный процесс по возмущению. Для этого выполним команды:

$$WC = W/(1+W*C); step(WC), grid;$$

В результате получим переходный процесс, приведенный на рис. 1.

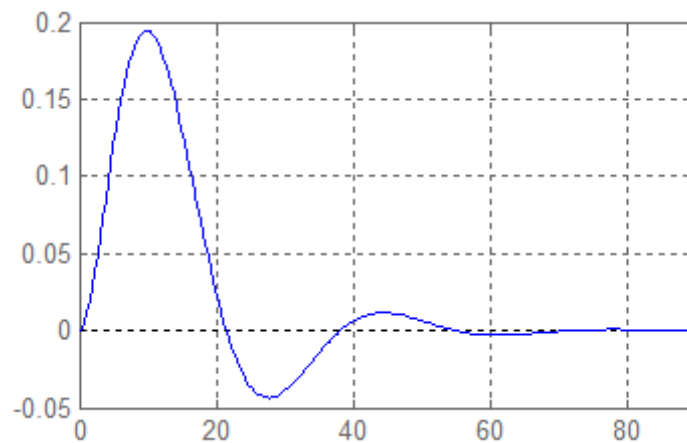


Рис. 1. Переходный процесс в замкнутой системе
для идентифицированного объекта
Fig. 1. Transient process in a closed system
for an identified object

Так как наш объект может менять значения своих параметров, создадим неопределенные параметры. Неопределенные параметры создаются с помощью функции *ureal*. Функция создает 20 случайных значений в указанном интервале. Подробное описание функции приведено в [12–14].

Для этого выполним команды:

$$k = ureal('k', 1, 'percent', 20);$$

$$T1 = ureal('T1', 20, 'percent', 20);$$

$$T2 = ureal('T2', 50, 'percent', 40);$$

Теперь параметры нашего объекта заданы в интервалах:

k от 0.8 до 1.2

$T1$ от 16 до 24

$T2$ от 30 до 70

Теперь можно создать объект с неопределенными параметрами и передаточную функцию замкнутой системы с неопределенными параметрами. Построим переходные процессы. Для этого выполним команды:

$$Wo = tf([k],[T2 T1 1]) \quad Wz = Wo/(1+Wo*C).$$

$$figure; step(Wz), grid$$

В результате получим переходные процессы, приведенные на рис. 2.

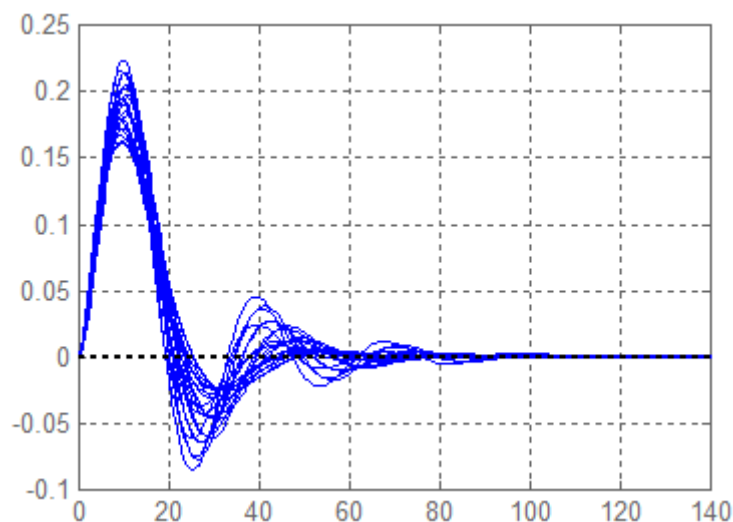


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе для объекта с неопределенными параметрами

Fig. 2. Transient processes in a closed system for an object with uncertain parameters

Необходимо отметить, что на графике 8000 переходных процессов, так как у нас три неопределенных параметра, по 20 значений у каждого.

2. Выделение систем с номинальными параметрами

Чтобы выделить (получить) переходный процесс системы с номинальными параметрами, выполним команду

```
Wnom = tf(Wz.nominal);
```

Опцию *nominal* можно использовать только для переменных, объявленных с помощью неопределенных параметров. Подробное описание опции приведено в [15–17]. Если построить переходный процесс для системы *Wnom*, то получим переходный процесс, совпадающий с переходным процессом, приведенным на рис. 1.

Проверим систему с номинальными параметрами на устойчивость. Для этого выполним команду

```
m = max(real(pole(Wnom)));
```

По сути, команда вычисляет максимальное значение от всех действительных частей полюсов нашей системы.

В результате получим значение -0.05 . Так как действительная часть полюса имеет отрицательное значение, следовательно, система устойчива.

3. Анализ системы с неопределенными параметрами

Для анализа системы с неопределенными параметрами выполним команды:

```
[StabilityMargin,Udestab,Report] = robuststab(Wz);  
disp(StabilityMargin); disp(Udestab); disp(Report);
```

Функция *robuststab* рассчитывает робастную устойчивость [13–15, 18]. Номинально устойчивая неопределенная система обычно нестабильна при определенных значениях ее неопределенных элементов. Определение значений неопределенных элементов, наиболее близких к их номинальным значениям, для которых возникает нестабильность, является расчетом робастной устойчивости.

Если неопределенная система устойчива для всех значений неопределенных элементов в пределах их допустимых диапазонов, неопределенная система является робастно устойчивой. И наоборот, если существует комбинация значений элементов, вызывающих нестабильность, и все они лежат в допустимых пределах, тогда неопределенная система не является надежно устойчивой.

Это очень мощная функция. Для ее выполнения требуется определенное время. После ее завершения выведется следующая информация:

LowerBound: 1.989579704281458e+00

UpperBound: 2.041062710585281e+00

DestabilizingFrequency: 2.347676495189469e-01

T1: 1.183574915765887e+01

T2: 8.915809634940935e+01

k: 1.304674732920217e+00

Uncertain system is robustly stable to modeled uncertainty.

It can tolerate up to 199% of the modeled uncertainty.

A destabilizing combination of 204% of the modeled uncertainty was found.

This combination causes an instability at 0.235 rad/seconds.

Sensitivity with respect to the uncertain elements are:

'T1' is 1%. Increasing 'T1' by 25% leads to a 0% decrease in the margin.

'T2' is 3%. Increasing 'T2' by 25% leads to a 1% decrease in the margin.

'k' is 4%. Increasing 'k' by 25% leads to a 1% decrease in the margin.

В параметре *StabilityMargin* возвращаются следующие значения:

Значение *StabilityMargin* – скалярное положительное значение нижней оценки границы запаса устойчивости. Если это значение больше 1, то неопределенная система гарантированно устойчива для всех значений моделируемой неопределенности.

Значение *UpperBound* – скалярное положительное значение верхней оценки границы запаса устойчивости. Если это значение меньше единицы, то неопределенная система неустойчива для всех значений моделируемой неопределенности.

Если номинальное значение неопределенной системы нестабильно, то значение обеих границ будет равно нулю.

Значение *DestabilizingFrequency* – критическое значение частоты, при котором возникает нестабильность, с неопределенными параметрами, наиболее близкими к их номинальным значениям.

В параметре *Udestab* выводятся значения параметров, при которых система становится неустойчивой. В нашем случае это будет при

$k = 1.3$; $T1 = 11.8$; $T2 = 89.1$.

В принципе, это параметры, при которых система будет находиться на границе устойчивости.

В параметре *Report* выводится отчет.

В нашем случае его можно интерпретировать следующим образом:

Неопределенная система надежно устойчива к смоделированной неопределенности.

Система останется устойчивой при изменении параметров на 199 % от смоделированной неопределенности. В нашем случае это практически в 2 раза.

Обнаружена дестабилизирующая комбинация параметров (система может стать неустойчивой) при изменении параметров на 204 % от смоделированной неопределенности. Эта комбинация вызывает нестабильность на уровне (частоте) 0.235 рад/с.

Далее идет информация о каждом параметре. Например:

Параметр *T2* составляет 3 %. Увеличение *T2* на 25 % приводит к снижению устойчивости на 1 %.

Получим передаточную функцию замкнутой системы для параметров, полученных функцией *robuststab*. Для этого выполним:

$Wol=tf([1.3],[89.1 11.8 1]); Wwc1=Wol/(1+Wol*C);$

4. Определение наихудших параметров

Для получения наихудших значений из заданной неопределенности выполним команду

$[Wch,Wcu] = wcgain(Wz); disp(Wcg); disp(Wcu);$

Функция выводит амплитудно-частотные характеристики для переходного процесса по возмущению для наихудших значений параметров из диапазона неопределенных значений и значение резонансной частоты.

В параметре Wcg возвращается максимальное и минимальное значение амплитудно-частотной характеристики. Как правило, они равны.

В параметре Wcu возвращаются наихудшие значения из диапазона неопределенных значений.

В результате получим:

$LowerBound: 0.8503;$

$UpperBound: 0.8503;$

$CriticalFrequency: 0.2348;$

$T1: 16; T2: 70; k: 1.2000$

Заметим, что наихудшие параметры, полученные функцией *robuststab* и функцией *wcgain*, отличаются.

В первом случае это параметры для нестабильной системы, а во втором – это параметры наихудшей системы из заданного диапазона неопределенных параметров.

Если в пакете *MISU* (многокритериальное исследование систем управления) построить АЧХ для замкнутой системы, для объекта с полученными параметрами ($k, T1, T2$), получим график, приведенный на рис. 3.

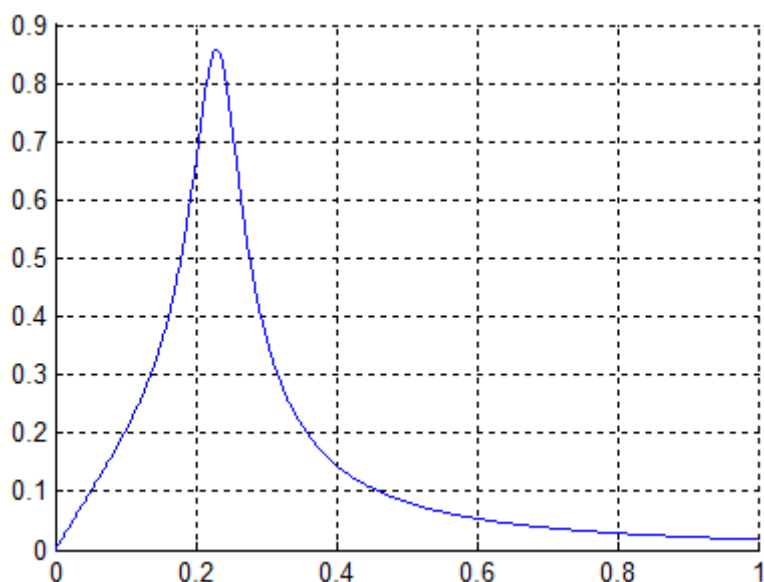


Рис. 3. График АЧХ системы с наихудшими параметрами
Fig. 3. Graph of the frequency response of the system
with the worst parameters

Чтобы сформировать передаточную функцию замкнутой системы с наихудшими параметрами, воспользуемся функцией *usubs*.

Для этого выполним

$Wwc = usubs(Wz, Uwc);$

Итак, мы имеем передаточную функцию $Wnom$ с номинальными параметрами, передаточную функцию Wwc с наихудшими параметрами из заданного диапазона и передаточную функцию $Wwc1$ неустойчивой системы.

Построим переходные процессы всех систем:

$step(Wnom, Wwc, Wwc1, 200), grid$

В результате получим графики, приведенные на рис. 4.

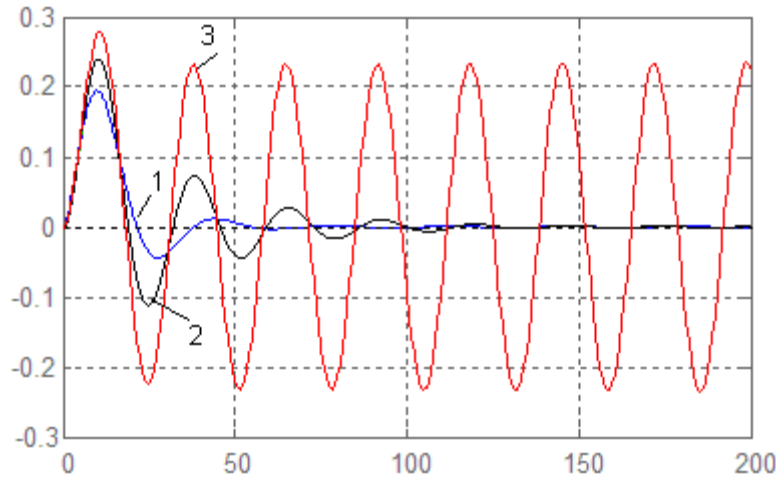


Рис. 4. Переходные процессы систем W_{nom} (1), W_{wc} (2), W_{wc1} (3)
Fig. 4. Transient processes of systems W_{nom} (1), W_{wc} (2), W_{wc1} (3)

Выводы

Итак, с помощью функций анализа робастных систем мы исследовали наш объект и определили диапазон значений параметров, в котором наша система с используемым регулятором будет устойчивой. В заключение докажем, что с любыми другими параметрами из заданного диапазона переходный процесс будет лучше, чем с параметрами, полученными для наихудшего варианта. Для этого воспользуемся функцией *usample*. Функция генерирует указанное значение случайных передаточных функций с параметрами из указанного диапазона.

Для этого выполним

```
Wrand=usample(Wz, 4); figure; step(Wrand, 'b', Wwc, 'r'); grid on
```

Первым аргументом функции является описание системы с неопределенными параметрами, вторым аргументом – количество генерируемых значений.

В результате получим переходные процессы, приведенные на рис. 5.

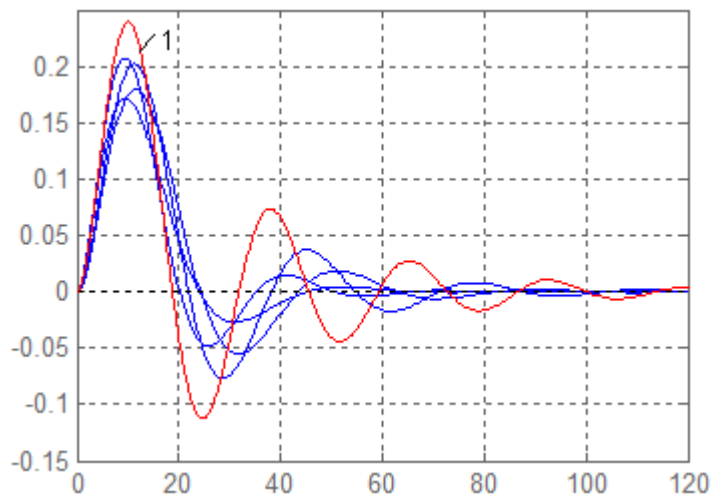


Рис. 5. Случайные переходные процессы и переходный процесс с наихудшими параметрами
Fig. 5. Random transients and a transient with the worst parameters

Из рис. 5 видно, что динамическая ошибка у всех переходных процессов меньше, чем у переходного процесса с наихудшими параметрами.

Список литературы

1. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 378 с.
2. Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Робастное управление нестационарными нелинейными структурно неопределенными объектам // Проблемы управления. 2008. № 5. С. 2–7.
3. Цыкунов А.М. Робастное управление линейным объектом по косвенным измерениям // Проблемы управления. 2009. № 3. С. 13–22.
4. Кирич Ю.П., Бильфельд Н.В., Тихонов В.А. Робастная настройка пи регулятора температуры процесса вакуумной сепарации губчатого титана // Промышленные АСУ и контроллеры. 2019. № 6. С. 3–10. DOI: 10.25791/asu.06.2019.676
5. Перельмутер В.М. Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. М.: Солон-Пресс, 2008. 224 с.
6. Рихтер Л.А., Елизаров Д.П., Лавыгин В.М. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1987. 216 с.
7. Федорович Л.А., Рыков А.П. Выбор тепломеханического оборудования ТЭС. М.: МЭИ, 1999. 48 с.
8. Бимбиреков Б.Л. Определение параметров регулятора для линейной системы по частотным критериям // Автоматика и телемеханика. 1993. № 5. С. 3–10.
9. Тремба А.А. Робастное D-разбиение при ограниченных параметрических неопределенностях // Автоматика и телемеханика. 2006. № 12. С. 21–36.
10. Разработка имитационной модели для планирования горно-взрывных работ / С. А. Варламова, Ю. И. Володина, А. В. Затонский, П. А. Язев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 10. С. 214–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222
11. Афанасьев В.Н. Динамические системы с неполной информацией: Алгоритмическое конструирование. М.: КомКнига, 2007. 216 с.
12. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999. 467 с.
13. Gu D.-W., Petkov P.Hr., Konstantinov M.M. Robust control design with MATLAB. Vienna: Springer, 2005. 390 p.
14. Бильфельд Н.В., Володина Ю.И. Современные средства моделирования динамики системы автоматизации. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. 143 с.
15. Robust Control Toolbox Getting Started Guide / G. Balas, R. Chiang, A. Packard, M. Safonov. Natick, MA: Math Works, Inc., 2005–2010. 135 p.
16. Затонский А.В. Моделирование технологического участка обогатительной фабрики в пакете MATLAB // Обогащение руд. 2014. № 4. С. 49–54.
17. Rustamov G.A. Absolutely robust control systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2013. Vol. 47, no. 5. P. 227–241.
18. Бильфельд Н.В. Многокритериальное исследование систем управления. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. 440 с.

References

1. Polyak B.T. *Robastnaya ustoychivost' i upravleniye* [Robust stability and control]. Moscow: Nauka; 2002. 378 p. (In Russ.)
2. Furtat I.B., Tsykunov A.M. [Robust control of non-stationary nonlinear structurally indeterminate objects]. *Control Sciences*. 2008;(5):2–7. (In Russ.)
3. Tsykunov A.M. [Robust control of a linear plant by indirect measurements]. *Control Sciences*. 2009;(3):13–22. (In Russ.)
4. Kirin Yu.P., Bilfeld N.V., Tikhonov V.A. Robust adjustment of pi controller for sponge titanium vacuum separation process. *Industrial controllers ACS*. 2019;(6):3–10. (In Russ.) DOI: 10.25791/asu.06.2019.676
5. Perel'muter V.M. *Pakety rasshireniya MATLAB. Control System Toolbox i Robust Control Toolbox* [MATLAB Extension Packs. Control System Toolbox and Robust Control Toolbox]. Moscow: Solon-Press; 2008. 224 p. (In Russ.)
6. Rikhter L.A., Elizarov D.P., Lavygin V.M. *Vspomogatel'noye oborudovaniye teplovykh elektrostansiy* [Auxiliary equipment of thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat; 1987. 216 p. (In Russ.)

7. Fedorovich L.A., Rykov A.P. *Vybor teplomekhanicheskogo oborudovaniya TES* [Choice of thermal mechanical equipment of TPP]. Moscow: MPEI; 1999. 48 p. (In Russ.)
8. Bimbirekov B.L. [Determination of controller parameters for a linear system by frequency criteria]. *Automatika i Telemekhanika*. 1993;(5):3–10. (In Russ.)
9. Tremba, A.A. [Robust D-decomposition with limited parametric uncertainties]. *Automatika i Telemekhanika*. 2006;(12):21–36. (In Russ.)
10. Varlamova S.A., Volodina Yu.I., Zatonskiy A.V., Yazev P.A. Simulation model for planning mining operations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(10):214–222. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222
11. Afanas'yev V.N. *Dinamicheskiye sistemy s nepolnoy informatsiyey: Algoritmicheskoye konstruirovaniye* [Dynamic Systems with Incomplete Information: Algorithmic Design]. Moscow: KomKniga; 2007. 216 p. (In Russ.)
12. Andriyevskiy B.R., Fradkov A.L. *Izbrannyye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* [Selected chapters of the theory of automatic control with examples in the MATLAB language]. St. Petersburg: Nauka; 1999. 467 p. (In Russ.)
13. Gu D.-W., Petkov P.Hr., Konstantinov M.M. *Robust control design with MATLAB*. Vienna: Springer; 2005. 390 p.
14. Bil'fel'd N.V., Volodina Yu.I. *Sovremennyye sredstva modelirovaniya dinamiki sistemy avtomatizatsii* [Modern tools for modeling the dynamics of the automation system]. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ.; 2020. 143 p. (In Russ.)
15. Balas G., Chiang R., Packard A., Safonov M. *Robust Control Toolbox Getting Started Guide*. Natick, MA: Math Works, Inc.; 2005–2010. 135 p.
16. Zatonskiy A.V. [Modeling of the technological section of the processing plant in the MATLAB]. *Obogashhenie rud*. 2014;(4):49–54. (In Russ.)
17. Rustamov G.A. Absolutely robust control systems. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2013;47(5):227–241.
18. Bil'fel'd N.V. *Mnogokriterial'noye issledovaniye sistem upravleniya* [Multi-criteria study of control systems]. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ.; 2015. 440 p. (In Russ.)

Информация об авторах

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

Варламова Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Россия; varlamovasa@mail.ru.

Захаров Вадим Владимирович, младший научный сотрудник кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; metkol@yandex.ru.

Information about the authors

Nikolaj V. Bil'fel'd, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; bil-feld@mail.ru.

Svetlana A. Varlamova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; var-lamovasa@mail.ru.

Vadim V. Zakharov, junior researcher of the Department of Information and Analytical Support for Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; metkol@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 29.03.2022

The article was submitted 29.03.2022

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С ОГРАНИЧЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Н.Н. Чернышев¹, chernyshev@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3057-9140>
Т.В. Ниженец², tanaparty@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6230-469X>

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

² Донецкий национальный технический университет, Донецк, Донецкая Народная Республика

Аннотация. Основным фактором повышения эффективности процесса функционирования систем автоматического управления техническими объектами и процессами в различных областях промышленности является оптимальная настройка параметров модального регуляторов так, чтобы, например, обеспечить протекание переходных процессов за минимальное время или достичь минимального значения интегральной оценки качества управления. Решение оптимизационной задачи выполняется для подынтегральной функции такого вида, чтобы интегральная оценка лучше выражала качество управления. При этом показатели качества управления зависят от настроечных параметров регулятора достаточно сложными соотношениями, что значительно усложняет процедуру аналитического синтеза. Алгоритмы численной оптимизации различаются между собой способом изменения подстраиваемых параметров, при этом наиболее эффективными считаются те, которые достигают результата при меньших затратах вычислительного времени. **Цель исследования** – получение оптимальных значений параметров модального регулятора с интегральной составляющей и ограничениями для непрерывных линейных стационарных систем на основе стохастического метазвристического метода роя частиц. **Материалы и методы.** Используется современная теория автоматического управления, роевой интеллект в решении задачи оптимизации параметров модального регулятора и управлении техническими системами. **Результаты.** Представлен процесс параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц для одномерного объекта управления. Приведены результаты моделирования с помощью метода прямого перебора параметров регулятора и метода роя частиц, их сравнение. **Заключение.** Результаты численных исследований позволяют говорить о том, что разработанный алгоритм решения параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц обладает высокой точностью и большим быстродействием.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, модальный регулятор, показатели качества управления, ограничения, метод роя частиц

Для цитирования: Чернышев Н.Н., Ниженец Т.В. Параметрическая оптимизация модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 76–86. DOI: 10.14529/ctcr220207

Original article
DOI: 10.14529/ctcr220207

PARTICLE SWARM PARAMETRIC OPTIMIZATION OF A CONSTRAINED STATE FEEDBACK CONTROLLER

N.N. Chernyshev¹, chernyshev@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3057-9140>
T.V. Nizhenets², tanaparty@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6230-469X>

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

² Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic

Abstract. The key to increasing the efficient functioning of automatic control systems for technical facilities and processes in various areas of industry is the optimal setting of the state feedback controller parameters, for instance, so as to minimize the duration of transient processes or achieve the minimum value

of the integral control quality assessment. The optimization problem is solved for an integrand of a kind that ensures that the integral assessment better expresses the quality of control. At the same time, the control quality indicators are in a rather complex relation to the set parameters of the controller, which greatly complicates the analytical synthesis procedure. Numerical optimization algorithms differ in the way the adjustable parameters are changed, the most effective being those that achieve the result in a shorter computational time. **Aim.** The goal is to obtain the optimal parameter values for a state feedback controller with an integral component and limitations for continuous linear stationary systems based on the stochastic metaheuristic particle swarm method. **Materials and methods.** The modern theory of automatic control, swarm intelligence are used to solve the problem of optimizing the parameters of the state feedback controller and controlling technical systems. **Results.** The process of parametric optimization of a constrained state feedback controller using the particle swarm method for a one-dimensional controlled object is described. The results of simulation using the method of direct enumeration of the controller parameters and the particle swarm method are described and compared. **Conclusion.** The results of numerical studies allow us to conclude that the developed algorithm for particle swarm parametric optimization of a constrained state feedback controller is highly accurate and fast.

Keywords: parametric optimization, state feedback controller, transient response specifications, constraints, particle swarm optimization algorithm

For citation: Chernyshev N.N., Nizhenets T.V. Particle swarm parametric optimization of a constrained state feedback controller. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):76–86. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220207

Введение

В общем смысле задача настройки регулятора, обеспечивающего оптимальное протекание переходного процесса в системе, сводится к задаче глобальной оптимизации. Особенности такой задачи часто являются нелинейность, мультимодальность, вычислительная сложность, большая размерность пространства, в котором осуществляется поиск, что является причиной отсутствия универсальных алгоритмов решения оптимизационных задач [1, 2]. Параметрическая оптимизация численными методами позволяет упростить процесс нахождения оптимальных параметров регуляторов [3–9], но не всегда достигается:

1) быстрдействие алгоритма настройки регуляторов для различного класса объектов управления, что особенно важно для бортовых систем управления, построенных на маломощных вычислительных средствах;

2) оптимальное протекание переходных процессов в замкнутой системе по причине того, что не учитывались различного рода нелинейные зависимости. В частности, при учете эффекта насыщения исполнительного механизма классические методы настройки не гарантируют получение переходных процессов с заданными показателями качества.

В 1980-х гг. появилась группа стохастических поисковых методов оптимизации, которые называют интеллектуальными, метаэвристическими, роевыми и т. д. Роевые методы в сравнении с классическими методами оптимизации имеют преимущества при решении задач с перечисленными особенностями, при этом они могут обеспечить нахождение глобального экстремума целевой функции с приемлемой точностью для решения большинства практических задач управления в технических системах [1, 10, 11]. Поэтому для решения оптимизационной задачи при синтезе модального регулятора предлагается применение стохастического метаэвристического метода оптимизации роя частиц (particle swarm optimization).

При использовании метода роя частиц возникает задача его настройки для решения конкретной оптимизационной задачи для системы управления, выбора значений коэффициентов для получения точного решения, как показано в исследованиях таких авторов, как П.В. Матренин, Н.В. Ростов, А.Р. Engelbrecht, М. Dorigo, R.C. Eberhart, J. Kennedy, S. Ozana, Y.H. Shi, H. Lu, W. Chen и других [1–15].

1. Постановка задачи

Рассмотрим замкнутую систему с модальным регулятором и обратной связью по регулируемой переменной (рис. 1). Для придания астатических свойств замкнутой системе в структуру введена интегральная составляющая модального регулятора.

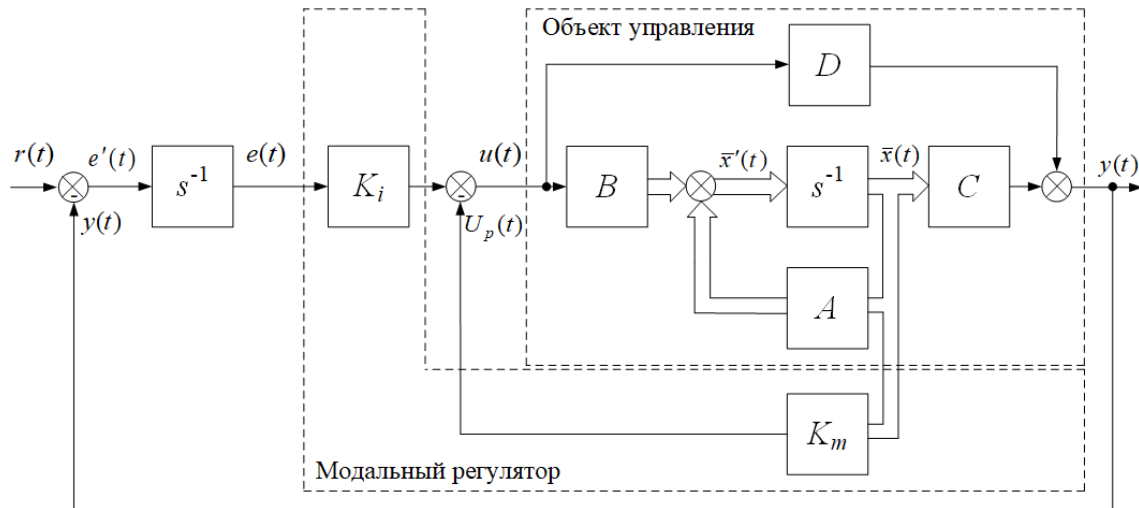


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы с модальным регулятором
Fig. 1. Structural diagram of a closed system with a state feedback controller

В соответствии с рис. 1 можно записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = A\bar{x}(t) + Bu(t), \\ y(t) = C\bar{x}(t) + Du(t), \end{cases} \quad (1)$$

где A – матрица динамики размерности $(n \times n)$; B – матрица управления размерности $(n \times 1)$; C – матрица выхода размерности $(1 \times n)$; D – матрица обхода размерности (1×1) ; $\bar{x}(t)$ – n -мерный вектор состояния; $r(t)$ – задающее воздействие; $u(t)$ – управляющие воздействие; $y(t)$ – регулируемая переменная.

Введем обозначение для переменной рассогласования регулятора:

$$e'(t) = r(t) - y(t) = r(t) - C\bar{x}(t) - Du(t). \quad (2)$$

Предполагается, что объект, описываемый уравнением (1): обладает свойством полной управляемости; все переменные состояния измеряются; не возникнет случая сокращения нулей интегратора и объекта; входное воздействие в виде ступенчатой функции $r(t) = 1(t)$ прикладывается к системе в момент $t = 0$.

Динамика системы может быть описана уравнением, которое является объединением уравнений (1), (2):

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(t) \\ e'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & O_{(n \times 1)} \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(t), \quad (3)$$

где

$$u(t) = -K_m \bar{x}(t) + K_i e(t). \quad (4)$$

Введем в рассмотрение новый вектор $\bar{X}(t)$ $m = (n + 1)$ -го порядка:

$$\bar{X}(t) = \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

С учетом введенного обозначения (5) уравнение (3) примет вид

$$\dot{\bar{X}}(t) = A_s \bar{X}(t) + B_s u(t), \quad (6)$$

где

$$A_s = \begin{bmatrix} A & O_{(n \times 1)} \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad B_s = \begin{bmatrix} B \\ D \end{bmatrix}, \quad (7)$$

а уравнение (4) может быть представлено в виде

$$u(t) = -K \bar{X}(t), \quad (8)$$

где

$$K = [K_m \quad -K_i]. \quad (9)$$

Задача параметрической оптимизации модального регулятора такой замкнутой системы состоит в том, чтобы при заданных уравнении объекта управления (6), (7), ограничениях $\bar{X}(t) \in X$, $u(t) \in U$ найти управление $u(t)$ (8), при котором минимизируется целевая функция вида

$$J = f(\bar{X}(t), u(t), t) \quad (10)$$

и замкнутая система является асимптотически устойчивой.

2. Выбор целевой функции

Оценка качества управления основывается на численных показателях. Так, прямые, корневые и частотные показатели качества характеризует лишь один признак переходного процесса. В инженерной практике часто используются интегральные показатели качества по ошибке управления [7]:

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t) dt, \quad I = \int_0^{\infty} |e(t)| dt, \quad I = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \text{ и др.} \quad (11)$$

Они позволяют не только выполнить оценку качества, но и определить оптимальные значения параметров регулятора, которые соответствуют минимуму выбранного интегрального показателя. Однако на практике при синтезе регулятора необходимо учитывать различного рода ограничения [7, 8, 12] как на управляемую переменную, так и на формируемый сигнал управления.

1. Перерегулирование. Для учета перерегулирования предлагается использовать вычисление переменной $y_{OV}(t)$ по формуле вида

$$y_{OV}(t) = \begin{cases} r(t) & y(t) \geq r(t), \\ y(t) & y(t) < r(t). \end{cases} \quad (12)$$

Штрафная функция может быть вычислена по формуле

$$P_1(K) = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|y(t) - y_{OV}(t)| dt = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|e_{OV}(t)| dt, \quad (13)$$

где $t_{п.п}$ – время переходного процесса.

2. Насыщение сигнала управления. Для учета ограничения на предельные значения (u_{\max} и u_{\min}) сигнала управления $u(t)$ на выходе регулятора предлагается использовать вычисление переменной $u_{SL}(t)$ по формуле вида

$$u_{SL}(t) = \begin{cases} u_{\max} & u(t) \geq u_{\max}, \\ u(t) & u_{\min} < u(t) < u_{\max}, \\ u_{\min} & u(t) \leq u_{\min}. \end{cases} \quad (14)$$

Штрафная функция может быть вычислена по формуле

$$P_2(K) = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|u(t) - u_{SL}(t)| dt = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|e_{SL}(t)| dt. \quad (15)$$

3. Скорость изменения сигнала управления. Для учета ограничения на максимальную скорость нарастания (R) и убывания (F) управляющей переменной $u(t)$ предлагается использовать вычисление первой производной $du(k)$ и переменной $u_{RL}(k)$ по формуле вида

$$du(k) = \frac{u(k) - u_{RL}(k)}{\Delta t}, \quad k = 1, 2, \dots, \\ u_{RL}(k) = \begin{cases} \Delta t \cdot R + u_{RL}(k-1) & du(k) > R, \\ u(t) & F \leq du(k) \leq R, \\ \Delta t \cdot F + u_{RL}(k-1) & du(k) < F. \end{cases} \quad (16)$$

Штрафная функция тогда может быть вычислена по формуле

$$P_3(K) = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|u(t) - u_{RL}(t)| dt = \int_0^{3 \cdot t_{п.п}} t|e_{RL}(t)| dt. \quad (17)$$

Принимая во внимание рассмотренные ограничения, при решении задачи глобальной оптимизации целесообразно использовать целевую функцию с учетом интегрального критерия качества и штрафных функций, значение которой определяется параметрами регулятора K :

$$\min J(K) = k_1 \cdot I(K) + k_2 \cdot P_1(K) + k_3 \cdot P_2(K) + k_4 \cdot P_3(K), \quad (18)$$

где k_1, k_2, k_3 и k_4 – весовые коэффициенты, которые определяют вклад каждого слагаемого в получаемое значение целевой функции и позволяют в процессе синтеза регулятора учесть в большей или меньшей степени необходимые ограничения; $I(K)$ – интегральный показатель качества по ошибке управления вида (11); $P_1(K)$ – штрафная функция по величине перерегулирования регулируемой переменной вида (13); $P_2(K)$ – штрафная функция по величине насыщения сигнала управления вида (15); $P_3(K)$ – штрафная функция по величине скорости изменения сигнала управления вида (17).

3. Описание метода роя частиц для решения оптимизационной задачи

Основу поведения роя частиц составляет самоорганизация, обеспечивающая достижение общих целей роя на основе низкоуровневого взаимодействия. Частицы движутся в многомерном пространстве поиска, где положение каждой частицы определяется в соответствии с ее собственным опытом и опытом ее соседей, таким образом происходит обнаружение оптимальных областей многомерного пространства, в котором выполняется поиск [10, 13–15].

Пусть $x_{i,n}(k)$ обозначает положение частицы i ($i = 1, 2, \dots, M$, где M – количество частиц роя) в n -мерном пространстве поиска (n – число настраиваемых параметров регулятора) в k -й момент времени. Положение частицы изменяется путем переноса $x_{i,n}(k)$ на вектор скорости $v_{i,n}(k+1)$, т. е.

$$x_{i,n}(k+1) = x_{i,n}(k) + v_{i,n}(k+1), \quad (19)$$

где $v_{i,n}(k+1)$ – скорость перемещения частицы из позиции $x_{i,n}(k)$ в позицию $x_{i,n}(k+1)$.

Существует несколько разновидностей «социальной» структуры роя. Предлагается использовать структуру в форме «звездообразной» сети. Поскольку она позволяет организовать процесс поиска оптимума быстрее, чем другие сетевые структуры [10]. Коррекция скорости каждой частицы при использовании «звездообразной» социальной структуры роя определяется выражением

$$v_{i,n}(k+1) = w \cdot v_{i,n}(k) + r_1 \cdot c_1 \cdot (p_{i,n}(k) - x_{i,n}(k)) + r_2 \cdot c_2 \cdot (g_n(k) - x_{i,n}(k)), \quad (20)$$

где w – коэффициент инерции; c_1, c_2 – коэффициенты ускорения частицы, которые отражают стремление частицы достигнуть глобально лучшего решения либо сохранить свое положение; r_1, r_2 – коэффициенты, которые могут принимать случайные значения из интервала $[0; 1]$.

Предлагается коэффициент инерции изменять по формуле

$$w(k+1) = \alpha w(k), \quad (21)$$

где $\alpha < 1$.

Личная лучшая позиция $p_{i,n}$ i -й частицы – это лучшая позиция, которую частица посетила с первого временного шага. С учетом задач минимизации лучшая личная позиция на следующем временном шаге $k+1$ рассчитывается как

$$p_{i,n}(k+1) = \begin{cases} p_{i,n}(k) & J(x_{i,n}(k+1)) \geq J(p_{i,n}(k)), \\ p_{i,n}(k+1) & J(x_{i,n}(k+1)) < J(p_{i,n}(k)), \end{cases} \quad (22)$$

где J – целевая функция вида (18).

Глобальная наилучшая позиция g_n является наилучшей позицией, обнаруженной любой из частиц до момента k и определяется как

$$g_n(k) \in \{p_{1,n}(k), \dots, p_{M,n}(k)\}, \\ g_n(k) = \min \{J(p_{1,n}(k)), \dots, J(p_{M,n}(k))\}, \quad (23)$$

где M – общее количество частиц в рое.

4. Алгоритм параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц

Численное решение задачи параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц проходит в несколько этапов и схематически выглядит следующим образом (рис. 2).

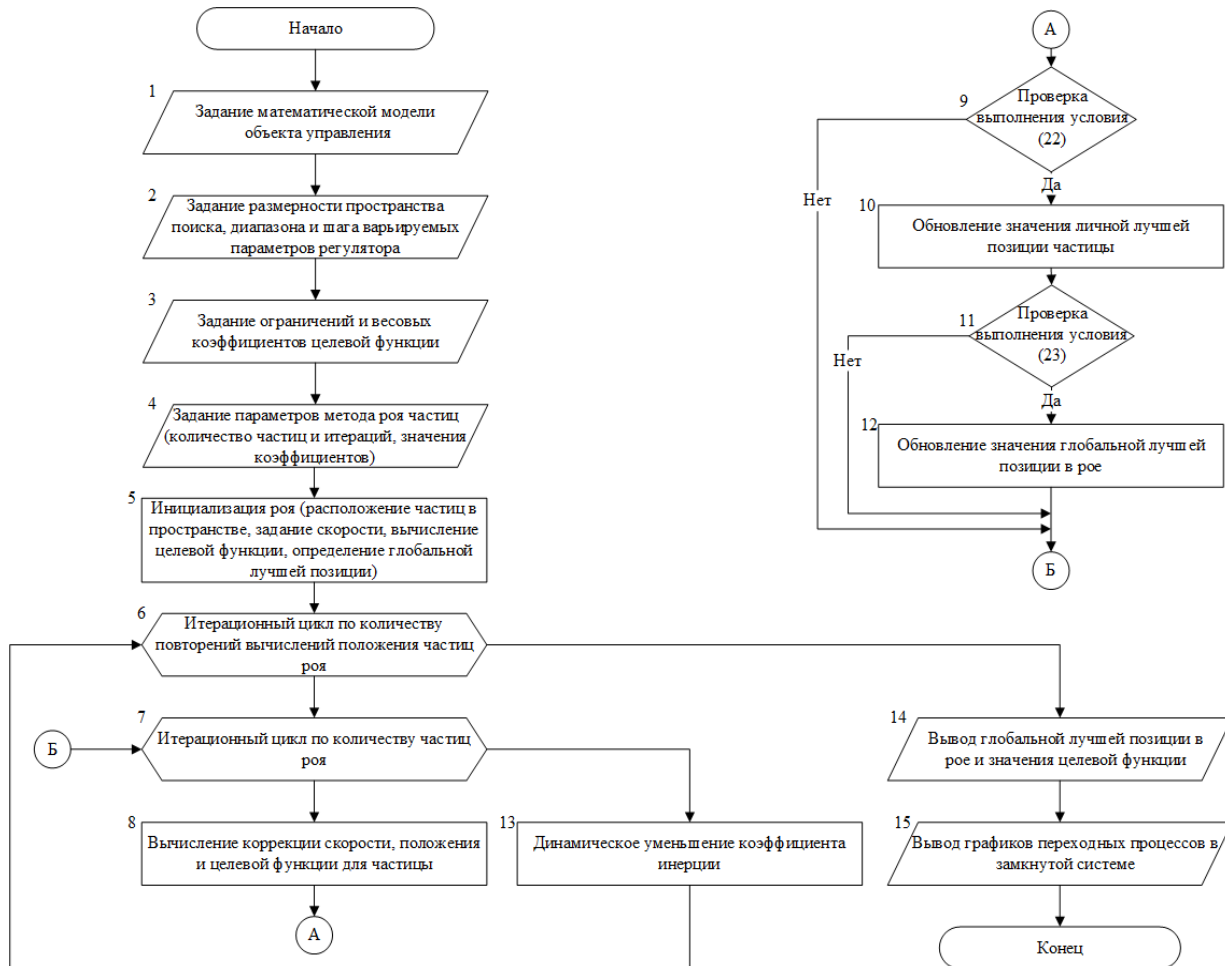


Рис. 2. Блок-схема алгоритма параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц

Fig. 2. Block diagram of the parametric optimization algorithm of state feedback controller with constraints based on the particle swarm optimization algorithm

Шаг 1. В начале задается математическая модель объекта управления в форме пространства состояний вида (6).

Шаг 2. Задание диапазона поиска и шага изменения параметров регулятора $[x_{i,n}^{\min} \quad x_{i,n}^{\max}]$ в n -мерном пространстве ($n=1, 2, \dots$).

Шаг 3. Ввод ограничений на регулируемую переменную (12), сигнал управления (14), (16) и значений весовых коэффициентов k_1, k_2, k_3 и k_4 функционала (18).

Шаг 4. Задание параметров метода роя частиц: количество частиц в рое M и итераций It , значения коэффициентов инерции w , ускорения частицы c_1 и c_2 .

Шаг 5. Инициализация роя заключается в случайном распределении частиц $x_{i,n}^0(0)$ в пространстве поиска, задания начальной скорости $v_{i,n}^0(0)$, вычисления целевой функции для каждой частицы и определении глобальной лучшей позиции роя по формуле (23).

Шаг 6 и 7. Далее проходит итерационный процесс вычислений заданное число раз для каждой частицы роя.

Шаг 8. Вычисление коррекции скорости частицы $v_{i,n}(k+1)$ по формуле (20), положения частицы $x_{i,n}(k+1)$ по формуле (19) и значения целевой функции $J(x_{i,n}(k))$ частицы i в позиции $x_{i,n}(k)$.

Шаг 9 и 10. Определение личной лучшей позиции $p_{i,n}(k)$ i -й частицы по формуле (22).

Шаг 11 и 12. Определение глобальной наилучшей лучшей позиции в рое $g_p(k)$ по формуле (23).

Шаг 13. Динамическое уменьшение коэффициента инерции по формуле (21).

Итерации продолжают, пока алгоритм не достигнет останавливающегося критерия – достижение определенного числа итераций.

Шаг 14. После завершения алгоритма выводится найденное значение целевой функции $J(g_n(T))$ в глобальной наилучшей лучшей позиции роя.

Шаг 15. Отображение графиков переходных процессов по регулируемой переменной, сигналу рассогласования и управления при оптимальных параметрах модального регулятора.

5. Моделирование процесса параметрической оптимизации модального регулятора

Рассмотрим объект управления, описываемый дифференциальным уравнением вида (параметры $k = 2, T = 10$ с):

$$x'(t) = -\frac{1}{T}x(t) + \frac{k}{T}u(t),$$

где T – постоянная времени; k – коэффициент передачи; $u(t)$ – управляемая переменная; $x(t)$ – регулируемая переменная.

Начальные значения параметров модального регулятора $K = [K_m^0 \quad K_i^0] = [13,5 \quad 20]$ найдены при распределении полюсов по Баттерворту со значением среднегеометрического корня $\omega_0 = 2$.

Предположим, что при параметрической оптимизации модального регулятора нужно учитывать следующие физические ограничения:

1) на амплитуду сигнала управления $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$ ($u_{\max} = 4$ ед., $u_{\min} = 0$ ед.);

2) на скорость нарастания (убывания) сигнала управления $F \leq u'(t) \leq R$ ($R = 9$ ед./с, $F = -9$ ед./с).

Примем, что весовые коэффициенты целевой функции равны:

$$\min J(K) = 0,5 \cdot I(K) + 0,1 \cdot P_1(K) + 1 \cdot P_2(K) + 30 \cdot P_3(K). \quad (24)$$

На рис. 3 показаны графики переходных процессов в системе с начальными параметрами модального регулятора.

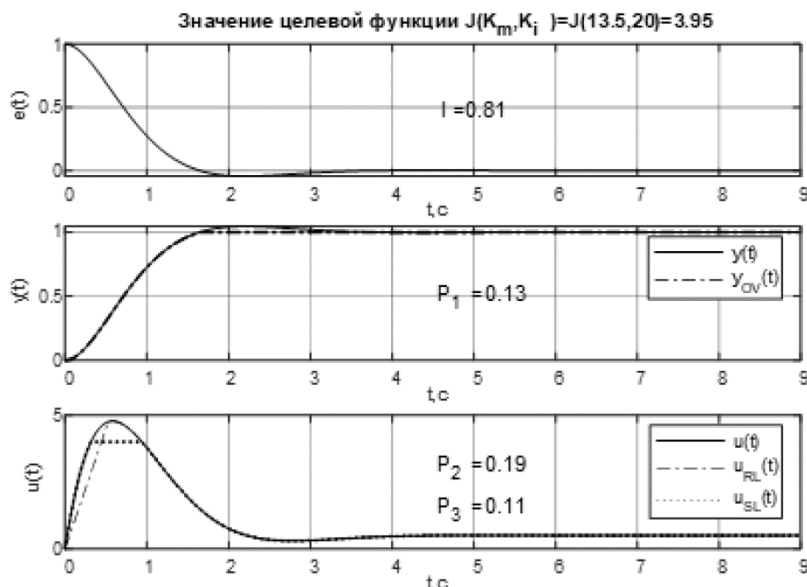


Рис. 3. Переходные процессы в замкнутой системе с начальными параметрами модального регулятора
Fig. 3. Transient processes in a closed system with initial parameters of the state feedback controller

Анализ графиков на рис. 3 позволяет сделать вывод, что сигнал управления не соответствует введенным ограничениям. Для подтверждения адекватности разработанного алгоритма параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц сначала найдем минимальное значение целевой функции (24) с помощью метода прямого перебора значений параметров регулятора из диапазона:

$$x_{1,2} = K_m \in [0,01 \cdot K_m^0 \quad 1,5 \cdot K_m^0],$$

$$x_{2,2} = K_i \in [0,01 \cdot K_i^0 \quad 1,5 \cdot K_i^0].$$

Шаг изменения параметров регулятора выбран равным 0,1. В результате получена зависимость значений целевой функции от параметров регулятора в форме поверхности, приведенной на рис. 4.

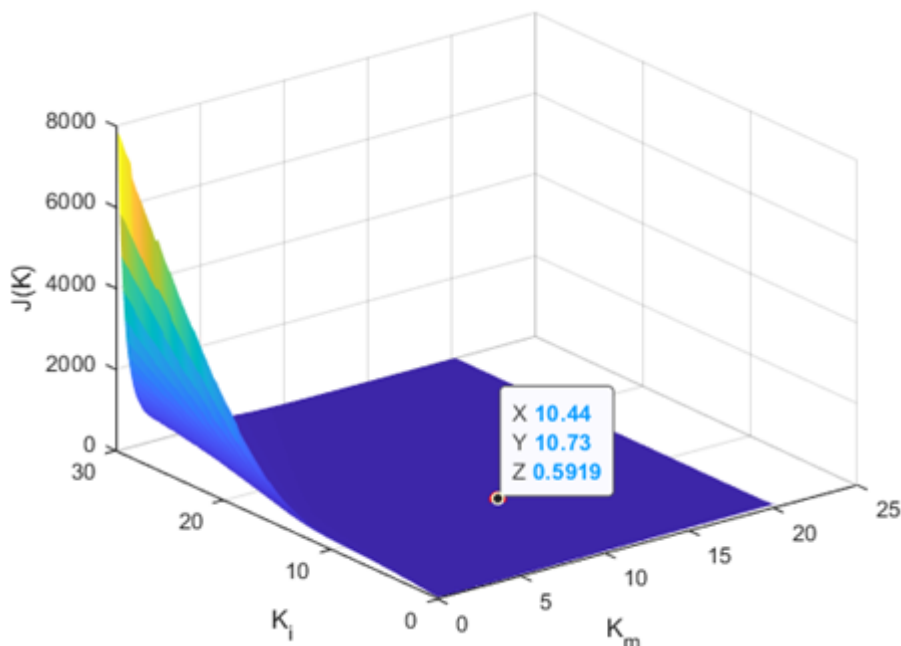


Рис. 4. Поверхность, полученная с помощью последовательного перебора параметров регулятора
Fig. 4. The surface obtained by sequential enumeration of the controller parameters

Минимальное значение целевая функция принимает при параметрах регулятора, равных:

$$\min J(K) = \min J\left(\begin{bmatrix} K_m^{\text{np}} & K_i^{\text{np}} \end{bmatrix}\right) = \min J([10,44 \quad 10,73]) = 0,5919.$$

Для параметрической оптимизации модального регулятора на основе метода роя частиц зададим количество частиц в рое $M = 10$ и итераций $It = 45$, коэффициенты инерции $w = 1$, $\alpha = 0,99$, ускорения частицы $c_1 = c_2 = 0,5$. В результате получено, что минимальное значение целевая функция принимает при параметрах регулятора, равных

$$\min J(K) = \min J\left(\begin{bmatrix} K_m^{\text{pc}} & K_i^{\text{pc}} \end{bmatrix}\right) = \min J([10,31 \quad 10,57]) = 0,5918.$$

На рис. 5 показаны графики переходных процессов в системе с найденными параметрами модального регулятора

$$K = \begin{bmatrix} K_m^{\text{pc}} & K_i^{\text{pc}} \end{bmatrix}.$$

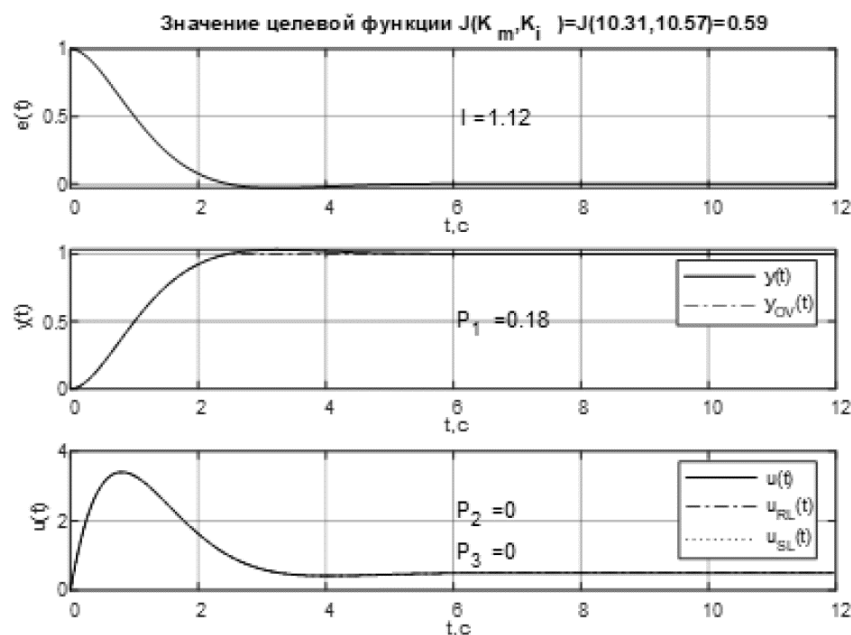


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутой системе с параметрами модального регулятора, найденными с помощью метода роя частиц
Fig. 5. Transient processes in a closed system with the parameters of the state feedback controller found using the particle swarm optimization algorithm

6. Экспериментальные результаты

На эффективность решения задачи параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц влияет ряд управляющих параметров, а именно:

1) количество частиц в рое. Большой рой позволяет охватить большую часть пространства поиска и уменьшить количество итераций. Для роя с небольшим количеством частиц (меньше 20) требуется больше итераций для нахождения минимума целевой функции, при этом уменьшается быстродействие алгоритма;

2) количество итераций. Малое число итераций может привести к преждевременному прекращению поиска. Слишком большое количество итераций приводит к повышению вычислительной сложности алгоритма;

3) коэффициент инерции w контролирует скорость движения частиц путем определения степени влияния скорости в прошлый момент времени на новое значение скорости частиц [15]. Поэтому большие значения w позволяют рою исследовать большие «территории». Небольшой w способствует поиску в меньшем пространстве, при этом уменьшается способность роя к проведению поиска экстремума целевой функции в большей окрестности. В разработанном алгоритме предлагается использовать динамическое уменьшение коэффициента инерции (21), что позволит сократить время поиска минимума целевой функции;

4) коэффициенты c_1 , c_2 контролируют влияние когнитивной и социальной составляющих на общую скорость частицы [15]. Предлагается коэффициенты c_1 и c_2 задать равными друг другу и не изменять в процессе выполнения поиска, это приведет к тому, что частицы будут тяготеть к среднему значению $p_{i,n}(k)$ и $g_n(k)$. При этом c_1 и c_2 рекомендуется брать меньше 1, в результате траектории движения частиц будут плавными, что позволит рою осуществить поиск оптимума в большем пространстве, прежде чем вернуться к лучшему значению. При этом неправильная инициализация c_1 и c_2 может привести к расходящемуся или циклическому поведению роя.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что найденные параметры модального регулятора совпадают с полученными по методу перебора. При этом время выполнения программы (MATLAB®, процессор Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @ 2,30ГГц – 2,40 ГГц, ОЗУ 8,00 ГБ) по поиску параметров модального регулятора с помощью метода перебора составляет около 5,5 мин, а предложенным способом на основе метода роя частиц – около 4 с.

Заключение

Предложенный алгоритм параметрической оптимизации модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц позволяет исследователю варьировать весовые коэффициенты целевой функции, тем самым добываясь требуемых показателей качества переходных процессов с учетом ограничений на управление, а изменение параметров метода роя частиц позволит достичь требуемой точности и затрачиваемого времени для нахождения оптимальных параметров модального регулятора.

Список литературы

1. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 446 с.
2. Матренин П.В., Секаев В.Г. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта // Программная инженерия. 2013. № 12. С. 39–45.
3. Allaoua B. Intelligent PID DC Motor Speed Control Alteration Parameters Using Particle Swarm Optimization // Artificial Intelligence Resources in Control and Automation Engineering. 2012. No. 12. P. 3–14. DOI: 10.2174/978160805126711201010003
4. PID controller tuning parameters using meta-heuristics algorithms: comparative analysis / M. Issa, A.A. Elbaset, A.E. Hassanien, I. Ziedan // Machine Learning Paradigms: Theory and Application. 2018. Vol. 801. P. 413–30. DOI: 10.1007/978-3-030-02357-7_20
5. Самигулина Г.А., Самигулин Т.И. Обзор современных подходов искусственного интеллекта для систем управления сложными объектами // Проблемы информатики. 2018. № 3. С. 4–20.
6. Ростов Н.В. Параметрическая оптимизация цифровых модальных регуляторов // Информатика, телекоммуникации и управление. 2010. № 3 (101). С. 39–44.
7. Ozana S., Docekal T. PID controller design based on global optimization technique with additional constraints // Journal of Electrical Engineering. 2016. No. 67 (3). P. 160–168. DOI: 10.1515/jee-2016-0023
8. Solihin M.I., Akmeliawati R., Legowo A. Robust feedback control design using PSO-based optimisation: a case study in gantry crane control // Int. J. Mechatronics and Automation. 2011. No. 1 (2). P. 121–131.
9. Mahdizadeh A., Schmid R. Robust eigenvalue assignment via particle swarm optimization methods // 2015 5th Australian Control Conference (AUCC). 2015. P. 153–157.
10. Engelbrecht A.P. Computational intelligence: An introduction. Second edition. Chichester: Wiley, 2020. 640 p.
11. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. Swarm Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 512 p.
12. Lu H., Chen W. Dynamic-objective particle swarm optimization for constrained optimization problems // Journal of Combinatorial Optimization. 2006. No. 12 (4). P. 409–19. DOI: 10.1007/s10878-006-9004-x
13. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. 1995. No. 4. P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968
14. Eberhart R.C., Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources // Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546). 2001. No. 1. P. 81–86. DOI: 10.1109/CEC.2001.934374
15. Eberhart R.C., Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization // Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation CEC00 (Cat. No. 00TH8512). 2000. No. 1. P. 84–88. DOI: 10.1109/CEC.2000.870279

References

1. Karpenko A.P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman Publ.; 2017. 446 p. (In Russ.)
2. Matrenin P.V., Sekaev V.G. [System description of swarm intelligence algorithms]. *Programmnyaya Inzheneriya*. 2013;(12):39–45. (In Russ.)
3. Allaoua B. Intelligent PID DC Motor Speed Control Alteration Parameters Using Particle Swarm

Optimization. *Artificial Intelligence Resources in Control and Automation Engineering*. 2012;(12):3–14. DOI: 10.2174/978160805126711201010003

4. Issa M., Elbaset A.A., Hassanien A.E., Ziedan I. PID Controller Tuning Parameters Using Meta-Heuristics Algorithms: Comparative Analysis. *Machine Learning Paradigms: Theory and Application*. 2018;801:413–30. DOI: 10.1007/978-3-030-02357-7_20

5. Camigulina G.A., Samigulin T.I. [Review of Modern Approaches of Artificial Intelligence for Control Systems of Complex Objects]. *Problems of Informatics*. 2018;(3):4–20. (In Russ.)

6. Rostov N.V. [Parametric Optimization of Digital Modal Controllers]. *Informatics, Telecommunications and Control*. 2010;3(101):39–44. (In Russ.)

7. Ozana S., Docekal T. PID Controller Design Based on Global Optimization Technique with Additional Constraints. *Journal of Electrical Engineering*. 2016;67(3):160–168. DOI: 10.1515/jee-2016-0023

8. Solihin M.I., Akmeliawati R., Legowo A. Robust Feedback Control Design Using PSO-Based Optimisation: a Case Study in Gantry Crane Control. *Int. J. Mechatronics and Automation*. 2011;1(2):121–131.

9. Mahdizadeh A., Schmid R. Robust Eigenvalue Assignment via Particle Swarm Optimization Methods. In: *2015 5th Australian Control Conference (AUCC)*; 2015. P. 153–157.

10. Engelbrecht A.P. Computational intelligence: An introduction. Second edition. Chichester: Wiley; 2020. 640 p.

11. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. *Swarm Intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers; 2001. 512 p.

12. Lu H., Chen W. Dynamic-Objective Particle Swarm Optimization for Constrained Optimization Problems. *Journal of Combinatorial Optimization*. 2006;12(4):409–19. DOI: 10.1007/s10878-006-9004-x

13. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*; 1995, no. 4. P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968

14. Eberhart R.C., Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In: *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*; 2001, no. 1. P. 81–86. DOI: 10.1109/CEC.2001.934374

15. Eberhart R.C., Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation CEC00 (Cat. No. 00TH8512)*; 2000, no. 1. P. 84–88. DOI: 10.1109/CEC.2000.870279

Информация об авторах

Чернышев Николай Николаевич, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры автоматических систем, Институт искусственного интеллекта, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия; chernyshev@mirea.ru.

Ниженец Татьяна Владимировна, ассистент кафедры автоматизации и телекоммуникаций, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Донецкая Народная Республика; tanaparty@gmail.com.

Information about the authors

Nikolai N. Chernyshev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of Department of Automatic Systems, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia; chernyshev@mirea.ru.

Tatyana V. Nizhenets, Assistant of Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic; tanaparty@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022

The article was submitted 11.04.2022

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья
УДК 519.71:681.2
DOI: 10.14529/ctcr220208

РАЗРАБОТКА ПОРТАТИВНОГО ЭЛЕКТРОМИОГРАФА ДЛЯ ФИКСАЦИИ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МЫШЦАХ

Ш. Алали¹, alali.charif.1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8894-4257>
Ф. Алхадж Хассан², fouadhajjhassan42@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4851-425X>
Л.Р. Гайнуллина², gainullina7819@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5414-7647>

¹ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Аннотация. В работе рассматривается диагностический метод электромиографии, позволяющий оценивать состояние функционирования нерва, иннервирующего поврежденную мышцу. Метод основан на регистрации и анализе биоэлектрических потенциалов мышц и периферических нервов. **Цель исследования:** разработка алгоритма работы и структурной схемы прибора электромиографии с возможностью преобразования результатов записи на ПК, дисплей и смартфон через USB и Bluetooth для их анализа. **Материалы и методы.** Предлагается метод измерения мышечной функции, который включает в себя наблюдение за движением мышц с поверхности кожи над мышцей. Мышечный датчик дает выходной сигнал в зависимости от ее активности. С помощью поверхностного электрода можно отслеживать общее движение мышц. С помощью программы для сопряжения мышечного сенсора Myoware EMG с Arduino получаем аналоговый сигнал. Значения датчика можно наблюдать на последовательном плоттере. Следующей задачей было прочесть данные датчика или аналоговое напряжение на LCD1602-дисплее. Мы подключили контакты I2C (SDA и SCL) LCD1602-дисплея к А4 и А5 Arduino. LCD1602-модуль отображает 2 строки по 16 символов. После загрузки специального кода LCD1602 по I2C-дисплей начал отображать значение аналогового сигнала EMG, а также напряжение. Arduino может связываться с другими устройствами через Bluetooth с помощью модуля HC-05 (zs-040). Этот модуль позволяет Arduino подключаться и обмениваться данными с другими устройствами, такими как смартфон, компьютер и т. п. **Результаты.** Было получено представление о биоэлектрическом потенциале, возникающем в мышце. Применяемый метод фиксации биоэлектрических сигналов в мышцах имеет практическое значение для клинической неврологии; его реализация облегчит и повысит диагностическую точность электрофизиологических исследований. **Заключение.** В данной работе разработана структурная схема прибора и решение технической задачи на основе технических требований, разработан алгоритм прибора. На выполнение практических работ с учетом затрат основных и вспомогательных материалов, а также прочих прямых затрат израсходовано 4963 руб.

Ключевые слова: поверхностная электромиография, ЭМГ-сигнал, ЭМГ-датчик, биоэлектрический потенциал, Bluetooth

Для цитирования: Алали Ш., Алхадж Хассан Ф., Гайнуллина Л.Р. Разработка портативного электромиографа для фиксации биоэлектрических потенциалов, возникающих в мышцах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 87–95. DOI: 10.14529/ctcr220208

DEVELOPMENT OF A PORTABLE ELECTROMYOGRAPH FOR RECORDING BIOELECTRIC POTENTIALS APPEARING IN MUSCLES

Sh. Alali¹, alali.charif.1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8894-4257>

F. Alhaji Hassan², fouadhajhassan42@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4851-425X>

L.R. Gainullina², gainullina7819@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5414-7647>

¹ Kazan Federal University, Kazan, Russia

² Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract. The paper discusses the diagnostic method of electromyography, which allows assessing the state of functioning of the nerve that innervates the damaged muscle. The method is based on registration and analysis of bioelectrical potentials of muscles and peripheral nerves. **Purpose of the study:** develop an algorithm of operation and a structural diagram of an electromyography device with the possibility of converting the recording results to a PC, display and smartphone via USB and bluetooth for their analysis. **Materials and methods.** A method is proposed for measuring muscle function, which involves observing the movement of muscles from the surface of the skin over the muscle. The muscle sensor gives an output signal depending on its activity. Using a surface electrode, you can track the overall movement of the muscles. Using the program for interfacing the Myoware EMG muscle sensor with the Arduino, we obtain an analog signal. The sensor values can be observed on the serial plotter. The next task was to read the sensor data or analog voltage on the LCD1602 display. We have connected the I2C pins (SDA and SCL) of the LCD1602 to A4 and A5 of the Arduino. LCD1602 module displays 2 lines of 16 characters. After downloading the special code LCD1602 via I2C, the display began to display the value of the EMG analog signal, as well as the voltage. The Arduino can communicate with other devices via Bluetooth using the HC-05 (zs-040) module. This module allows the Arduino to connect and communicate with other devices such as a smartphone, computer or other. **Results.** Based on the results of the study, an idea was obtained of the bioelectric potential that occurs in the muscle. The applied method of fixation of bioelectrical signals in muscles is of practical importance for clinical neurology; its implementation will facilitate and increase the diagnostic accuracy of electrophysiological studies. **Conclusion.** In this study, a structural diagram of the device and the solution of a technical problem based on technical requirements have been developed, and an algorithm for the device has been developed. 4,963 rubles were spent on the implementation of practical study taking into account the costs of basic and auxiliary materials, as well as other direct costs.

Keywords: surface electromyography, EMG signal, EMG sensor, bioelectrical potential, Bluetooth

For citation: Alali Sh., Alhaji Hassan F., Gainullina L.R. Development of a portable electromyograph for recording bioelectric potentials appearing in muscles. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2): 87–95. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220208

Введение

Биоэлектрические сигналы, полученные от различных участков кожи или с поверхности тела, предоставляют наиболее ценные знания о работе внутренних органов и физиологических процессах тела согласно сравнению эффективности различных диагностических методов. В первую очередь, это касается электрических потенциалов мышц. Эти критические процедуры требуют дополнительных усилий и создания электронного оборудования для решения сложных исследовательских задач в диагностических целях [1, 2].

Электромиография (ЭМГ) – это диагностический метод, который оценивает биоэлектрическое поведение мышц, позволяя сделать выводы о состоянии функционирования нерва, который иннервирует поврежденную мышцу. Этот тест поможет врачу определить место и величину поражения, а также степень и тип повреждения мышц и периферических нервов. Это исследование проводится с помощью специальных инструментов, называемых электромиографом [3].

Сигнал ЭМГ – это изображение тока, воспринимаемого в определенном месте, который создается доставкой ионов через мембраны мышечных волокон и передается через промежуточные ткани. Это вызвано нервно-мышечной стимуляцией во время сокращения мышц [4].

Экспериментальная часть

Цель работы – разработка алгоритма работы и структурной схемы прибора ЭМГ с возможностью преобразования результатов записи на ПК, дисплей и смартфон через USB и Bluetooth для их анализа.

Для того чтобы получить и зафиксировать информацию, необходимо иметь целую совокупность устройств. Структурная схема прибора состоит из нескольких основных элементов (рис. 1):

- датчик для получения сигнала;
- блок питания (2 батареи 9 В);
- Arduino для выполнения анализа процессов;
- компьютер для отображения данных и диаграммы;
- ЖК-дисплей для отображения данных;
- Bluetooth для просмотра данных на смартфоне или ноутбуке.

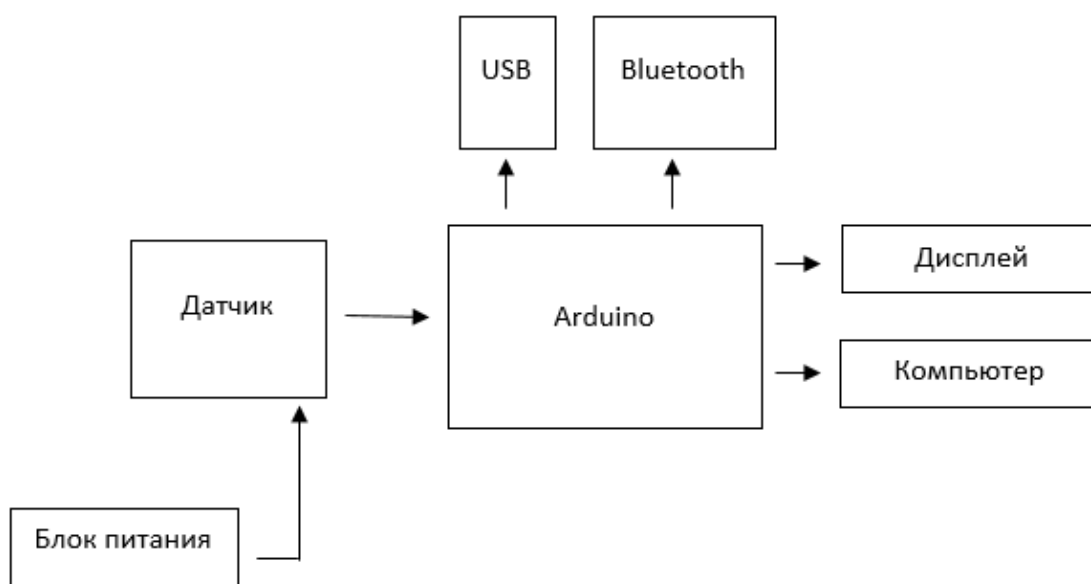


Рис. 1. Структурная схема прибора
Fig. 1. Blockdiagramofthedevice

Мышечный датчик V3, который мы использовали, – это универсальный датчик для электромиографии (ЭМГ) от Advancer Technologies. Он дает выходной сигнал от 0 до V_{in} В в зависимости от активности выбранной мышцы. Нам нужно наклеить несколько электродов и считывать напряжение, когда мышцы сгибаются [5, 6].

Этот датчик будет измерять отфильтрованную и выпрямленную электрическую активность мышцы; вывод $0-V_s$ В в зависимости от активности в выбранной мышце, где V_s означает напряжение источника питания. Напряжение питания: $\min \pm 3,5$ В [7].

Мы использовали 2 батарейки (Camelion 9v) для питания датчика.

Тестирование в научных целях потребовало использования микроконтроллера Arduino UNO, преимуществом которого является его доступность по сравнению с более дорогими медицинскими устройствами. В Arduino не все контакты одного типа. Имеется 6 аналоговых и 14 цифровых выходов. Разница в том, что на аналоговых выходах диапазон значений может быть разделен от единицы до нуля на несколько небольших участков. На цифровых выводах всего два значения: логический ноль или логическая единица. На практике аналоговые датчики чаще всего подключаются к выходам аналогового типа [8].

В данном исследовании используются поверхностные электроды, показанные на рис. 2.

С помощью поверхностного электрода можно отслеживать только общее движение мышц, которое представляет собой прерывание потенциалов действия сотен или даже тысяч волокон [9].

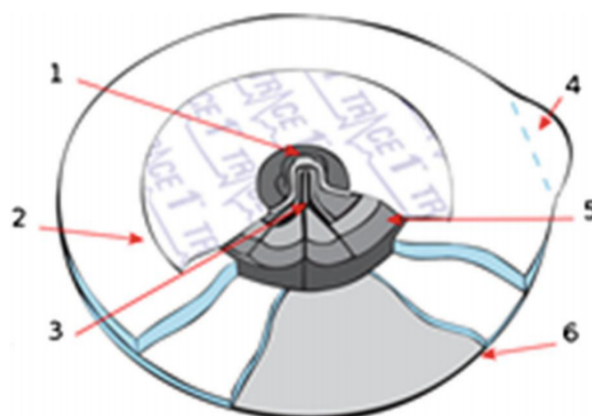


Рис. 2. Структура электрода [9]: 1– металлический конус; 2 – пенная подкладка; 3 – Ag/AgCl датчик; 4 – крыло; 5 – электролитный гель; 6 – клейкая защитная пленка
Fig. 2. Structure of the electrode [9]: 1 – metal cone; 2 – foam lining; 3 – Ag/AgCl sensor; 4 – wing; 5 – electrolyte gel; 6 – adhesive protective film

Программа для сопряжения мышечного сенсора Myoware EMG с Arduino очень проста. Все, что нам нужно, это измерение аналогового напряжения (рис. 3).

A screenshot of the Arduino IDE interface. The main window displays the following code:

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A0, INPUT);
}

void loop()
{
  float sensorValue = analogRead(A0);
  float millivolt = (sensorValue/1023)*5;
  Serial.print("Sensor Value: ");
  Serial.print("Voltage: ");
  Serial.print(millivolt*1000);
  Serial.println(" mV");
  Serial.println("");
  delay(1);
}
```

The status bar at the bottom indicates "13" and "Arduino Uno on COM3".

Рис. 3. Исходный код / основная программа Arduino
Fig. 3. Arduino source code / main program

После загрузки мы можем начать тестирование датчика и наблюдение за значениями. Для проверки работы датчика вытягиваем руку, затем сокращаем или расслабляем мышцы. Это создает аналоговое напряжение, которое можно наблюдать на последовательном мониторе [10].

Сигнал также можно наблюдать на последовательном плоттере. Для этого надо открыть экран последовательного плоттера и просмотреть форму волны, когда рычаг приводится в движение (рис. 4).

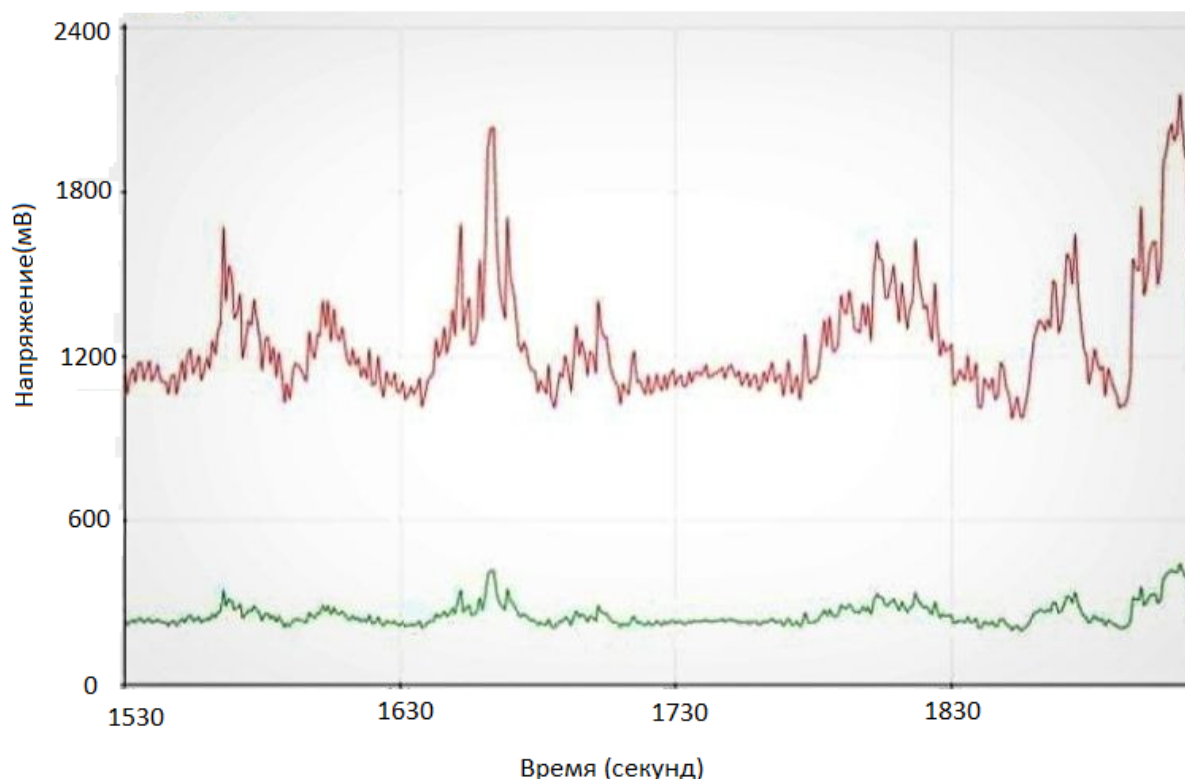


Рис. 4. Форма волны мышечного сенсора V3
Fig. 4. Musclesen sorwave form V3

Помимо перечисленных наблюдений нашей задачей было прочитать данные датчика вышеперечисленных наблюдений или аналоговое напряжение на LCD1602-дисплее. Мы подключили контакты I2C (SDA и SCL) LCD1602 -дисплея к A4 и A5 Arduino. LCD1602-модуль отображает 2 строки по 16 символов. После загрузки специального кода LCD1602 по I2C-дисплей начал отображать значение аналогового сигнала EMG, а также напряжение.

Arduino может связываться с другими устройствами через Bluetooth с помощью модуля HC-05 (zs-040). Этот модуль позволяет Arduino подключаться и обмениваться данными с другими устройствами, такими как смартфон, компьютер или другие микроконтроллеры [11].

Наши мобильные гаджеты или даже ПК осуществляют связь Bluetooth с MCU (микроконтроллером) через специальные приложения, известные как Bluetooth Terminal. Мы либо отправляем данные / команду, используя хост-устройство BT, в MCU, чтобы управлять интересующей системой, либо просто получаем данные / команду от MCU для определенного использования [12]. Нами было использовано приложение (Bluetooth terminal HC-05) для отображения данных «значение датчика и напряжение» на смартфоне [13].

Полученные результаты демонстрируют работоспособность предложенного портативного электромиографа, который может использоваться в лабораторных условиях для студентов, обучающихся по направлению биотехнических систем и технологий.

Алгоритм работы автоматизированной фиксации биоэлектрических потенциалов, возникающих в мышцах, приведен на рис. 5.

Разработанное устройство отличается тем, что добавлена возможность преобразования результата записи ЭМГ на ПК, дисплей и смартфон через USB и Bluetooth для анализа результатов. Компонировка устройства приведена на рис. 6.

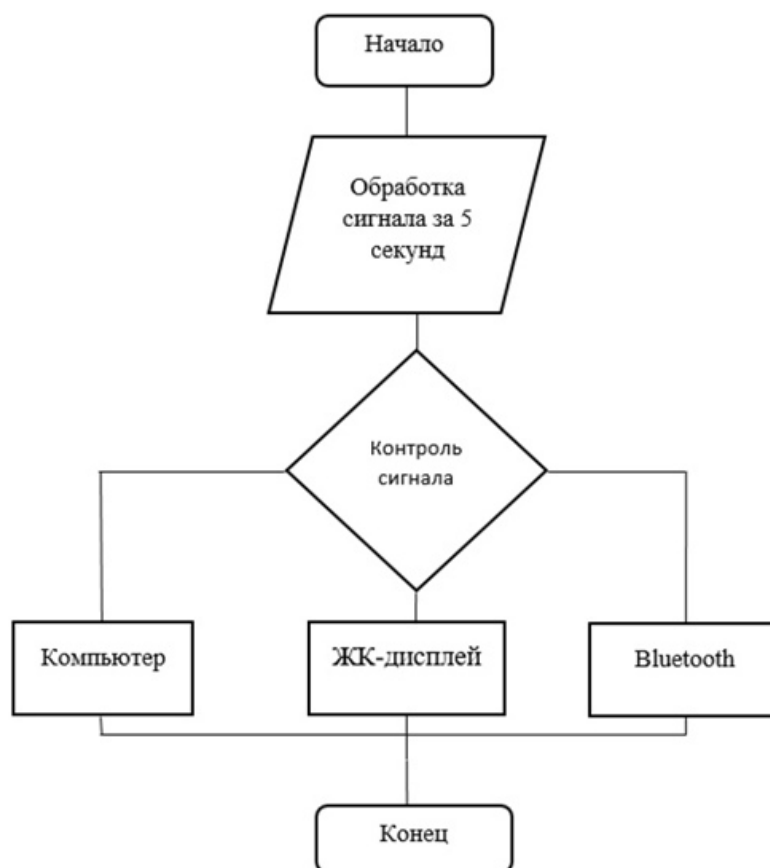


Рис. 5. Общий алгоритм работы прибора
Fig. 5. General algorithm of the device operation

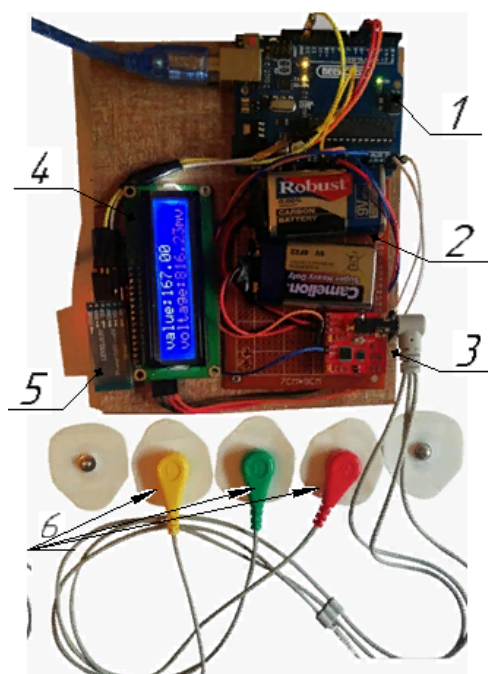


Рис. 6. Компоновка структурных элементов прибора: 1 – Arduino Uno; 2 – блок питания (2 батареи 9 В); 3 – мышечный датчик V3; 4 – LCD1602-дисплей по I2C; 5 – модуль Bluetooth HC-05; 6 – поверхностные электроды
Fig. 6. The layout of the structural elements of the device: 1 – Arduino Uno; 2 – power supply (2 batteries 9V); 3 – muscle sensor V3; 4 – LCD1602 display via I2C; 5 – module Bluetooth HC-05; 6 – surface electrodes

Результаты расчетов основных средств представлены в таблице [14, 15].

Затраты на основные и вспомогательные материалы
The cost of basic and auxiliary materials

Название	Количество штук на 1 изделие	Цена за 1 шт., руб.	Сумма, руб.
Датчик эмг V3	1	1 999	1999
Ардуино уно с кабелем	1	1449	1449
Дисплей LCD 1602/ I2C	1	422	422
Батарейка 9 В, Camelion	2	232	464
Гель медицинский	1	200	200
Bluetooth HC-05	1	429	429
Итого			4963

Выводы

Применяемый метод фиксации биоэлектрических сигналов в мышцах имеет практическое значение для клинической неврологии, его реализация облегчит и повысит диагностическую точность электрофизиологических исследований.

Носимые датчики становятся все более распространенными по мере развития технологий. А датчик ЭМГ может стать одним из наиболее важных инструментов для оптимизации восстановления, заживления и сохранения правильного мышечного тонуса во время спортивных тренировок, снижающим утомляемость и перегрузку.

В данной работе разработаны структурная схема прибора и решение технической задачи на основе технических требований, алгоритм прибора.

Разработан портативный ЭМГ по невысокой цене и с конкурентоспособными характеристиками. Устройство принимает сигнал ЭМГ и отображает его на компьютере, дисплее, а также на смартфоне через Bluetooth.

На выполнение практических работ с учетом затрат основных и вспомогательных материалов, а также прочих прямых затрат израсходовано 4963 руб.

Зная всю необходимую о нём информацию, отечественные разработчики могут модернизировать текущее устройство или же на его базе построить новый, более улучшенный тип прибора ЭМГ.

Список литературы

1. Баталов А.В., Веселов О.В. Регистрация и обработка сигнала биоэлектрической активности мышц для управления приводом бионического протеза // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 12. С. 263–268.
2. Тювакова О.И. Проблемы при проведении электромиографической диагностики // Материалы III научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань: РГРТУ. 2017. С. 83.
3. Научно-технический отчет. Санкт-Петербург. 2012. URL: <https://kam-doc.ru/> (дата обращения: 15.01.2022).
4. Коломоец А.А., Кудрявцев Б.М. Усиление и фильтрация поверхностного ЭМГ-сигнала // Colloquium-journal. 2019. № 23-2 (47). С. 30–36.
5. Alhajj Hassan F., Mahmoud M., Almohammed O.A.M. Analysis of the Generated Output Energy by Different Types of Wind Turbines // Journal of Human, Earth, and Future. 2020. Vol. 1, no. 4. P. 181–187. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-04-03
6. Practical study on heat pump enhancement by the solar energy / O.A.M. Almohammed, F.M. Philippova, F.I. Alhajj Hassan et al. // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 288, 01069. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801069
7. Muscle Sensor v3 // Advancer Technologies: официальный сайт. URL: <http://www.advancertechnologies.com/> (дата обращения: 15.01.2022).
8. Alhajj Hassan F., Sidorov A. Study of power system stability: Matlab program processing data

from Zahrani power plant (Beirut, Lebanon) // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 124, 05011. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405011

9. Arduino Uno. Устройство и применение. Особенности // *Электросам.Ру*: официальный сайт. URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/arduino-uno/>

10. Alhajj Hassan F. Multi-criteria Approach and Wind Farm Site Selection Analysis for Improving Power Efficiency // *Journal of Human, Earth, and Future*. 2020. Vol. 1, no. 2. P. 60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02

11. Алгоритмы классификации одноканального ЭМГ-сигнала для человеко-компьютерного взаимодействия / А.И. Лукьянчиков, А.О. Мельников, О.И. Лукьянчиков, А. Н. Никольский // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5, № 2. С. 300–309.

12. Mohannad Jabbar Mnati, Alex Van den Bossche, Raad Farhood Chisab. A Smart Voltage and Current Monitoring System for Three Phase Inverters Using an Android Smartphone Application // *MDPI, Sensors*. 2017. Vol. 17 (4), 872. DOI: 10.3390/s17040872

13. Сучков П.С. Смартфон – совместимая система мониторинга узлов и агрегатов автомобиля: каналы измерения параметров вибрации кузова и подвески: цифровая часть // *Электронный научный журнал «Дневник науки»*. 2018. <http://www.dnevniknauki.ru/>

14. KazanExpress: ООО «Маркетплейс-технологии»: официальный сайт. URL: <https://kazanexpress.ru/> (дата обращения: 15.01.2022).

15. Суперпрайс: интернет-магазин инструментов и измерительного оборудования: официальный сайт. URL: <https://supereyes.ru/> (дата обращения: 15.01.2022).

References

1. Batalov A.V., Veselov O.V. [Registration and processing of a signal of bioelectrical activity of muscles to control the drive of a bionic prosthesis]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2020;(12):263–268 pp. (In Russ.)

2. Tyuvakova O.I. [Problems during electromyographic diagnostics]. In: *Materialy III nauchno-tekhnicheskoi konferentsii magistrantov Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Materials of the III Scientific and Technical Conference of Undergraduates of the Ryazan State Radio Engineering University]; 2017. P. 83. (In Russ.)

3. *Nauchno-tekhnicheskii otchet* [Scientific and technical report]. St. Petersburg; 2012. Available at: <https://kam-doc.ru/> (accessed 15.01.2022). (In Russ.)

4. Kolomoets A.A., Kudryavtsev B.M. Surface EMG signal amplification and filtering. *Colloquium-journal*. 2019;23-2(47):30–36. (In Russ.)

5. Alhajj Hassan F., Mahmoud M., Almohammed O.A.M. Analysis of the Generated Output Energy by Different Types of Wind Turbines. *Journal of Human, Earth, and Future*. 2020;1(4):181–187. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-04-03

6. Almohammed O.A.M., Philippova F.M., Alhajj Hassan F.I., Timerbaev N.F., Fomin A.A. Practical study on heat pump enhancement by the solar energy. *E3S Web of Conferences*. 2021;288:01069. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801069

7. Muscle Sensor v3 / Advancer Technologies. Available at: <http://www.advancertechnologies.com/> (accessed 15.01.2022).

8. Alhajj Hassan F., Sidorov A. Study of power system stability: Matlab program processing data from Zahrani power plant (Beirut, Lebanon). *E3S Web of Conferences*. 2019;124:05011. DOI: 10.1051/e3sconf/201912405011

9. Arduino Uno. *Ustroystvo i primeneniye. Osobennosti* [Device and application. Peculiarities]. In: *Elektrosam.Ru: ofitsial'nyy sayt*. Available at: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/arduino-uno/> (In Russ.)

10. Alhajj Hassan F. Multi-criteria Approach and Wind Farm Site Selection Analysis for Improving Power Efficiency. *Journal of Human, Earth, and Future*. 2020;1(2):60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02

11. Lukyanchikov A., Melnikov A., Lukyanchikov O., Nikolskiy A. Algorithms for classification of a single channel EMG signal for human-computer interaction. *Cloud of Science*. 2018;5(2):300–309. (In Russ.)

12. Mohannad Jabbar Mnati, Alex Van den Bossche, Raad Farhood Chisab. A Smart Voltage and

Current Monitoring System for Three Phase Inverters Using an Android Smartphone Application. *MDPI, Sensors*. 2017;17(4):872. DOI: 10.3390/s17040872

13. Suchkov P.S. [Smartphone-compatible system for monitoring vehicle components and assemblies: channels for measuring vibration parameters of the body and suspension: digital part]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Dnevnik nauki"*. 2018. Available at: <http://www.dnevniknauki.ru/> (In Russ.)

14. *KazanExpress: OOO "Marketpleys-tehnologii": ofitsial'nyy sayt* [KazanExpress: "Marketplace Technologies": official website]. Available at: <https://kazanexpress.ru/> (accessed 15.01.2022) (In Russ.)

15. *Superprays: internet-magazin instrumentov i izmeritel'nogo oborudovaniya: ofitsial'nyy sayt* [Superprice: online store for tools and measuring equipment: official website]. Available at: <https://supereyes.ru/> (accessed 15.01.2022). (In Russ.)

Информация об авторах

Алали Шариф, магистрант кафедры биомедицинской инженерии и управления инновациями, Казанский федеральный университет, Казань, Россия; alali.charif.1@mail.ru.

Алхадж Хассан Фуад, аспирант кафедры возобновляемых источников энергии, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия; fouadhajjhassan42@gmail.com.

Гайнуллина Лейсан Раисовна, канд. техн. наук, доцент кафедры возобновляемых источников энергии, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия; gainullina7819@mail.ru.

Information about the authors

Sharif Alali, Master's student of the Department of Biomedical Engineering and Innovation Management, Kazan Federal University, Kazan, Russia; alali.charif.1@mail.ru.

Fouad Alhajj Hassan, Postgraduate Student of the Department of Renewable Energy Sources, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; fouadhajjhassan42@gmail.com.

Leysan R. Gainullina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Renewable Energy Sources, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; gainullina7819@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 10.03.2022

The article was submitted 10.03.2022

Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья
УДК 553.04 + 004.942
DOI: 10.14529/ctcr220209

УПРАВЛЕНИЕ ПРИРОДНО-РЕСУРСНЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЕРМСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОЙ МОДЕЛИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

А.В. Затонский, zxenon@narod.ru
Н.А. Сиротина, nsiroтина117@mail.ru

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

Аннотация. Статья посвящена проблеме управления природно-ресурсным потенциалом на основе конечно-разностной модели 2-го порядка. В проведенных ранее исследованиях было установлено, что управление природно-ресурсным потенциалом с использованием конечно-разностных моделей позволяет получить качественные прогнозы в сравнении с традиционно используемыми линейными множественными моделями. **Цель работы.** Целью данной работы является построение конечно-разностной модели комплексного показателя природно-ресурсного потенциала второго порядка на основании статистических данных и оценка ее прогностических свойств на примере Пермского края. **Материалы и методы.** Конечно-разностная модель второго порядка была получена путем добавления в модель множественной линейной регрессии авторегрессионных слагаемых первого и второго порядков. На основании трендов был выполнен прогноз факторов и рассчитаны соответствующие модельные значения. Возможность управления факторами, определяющими ПРП, была установлена на основании их качественного анализа. Оценки влияния изменения факторов на уровень ПРП была произведена путем увеличения и уменьшения прогнозных значений выбранных управляемых и неуправляемых факторов на 5 %. Выработана система рекомендаций для регионального правительства по управлению природно-ресурсным потенциалом Пермского края на 2019 и 2020 гг. **Результаты исследования.** Выявлено, что в течение обоих прогнозных периодов отрицательная динамика ПРП в результате снижения неконтролируемых факторов – уменьшение на 0,01 в 2019 г. и на 0,02 в 2020 г. – компенсируется его положительной динамикой в результате роста контролируемых факторов – ростом на 0,15 в 2019 г. и на 0,16 в 2020 г. Поскольку увеличение управляемых факторов на 5 % позволяет существенно увеличить ПРП, то для компенсации отрицательного влияния неуправляемых факторов достаточно роста управляемых факторов менее чем на 5 %. **Обсуждение и заключение.** Полученные результаты позволяют утверждать, что использование конечно-разностной модели второго порядка позволяет осуществлять эффективное управление уровнем природно-ресурсного потенциала региона.

Ключевые слова: математическое моделирование, природно-ресурсный потенциал, конечно-разностная модель, прогнозирование, система рекомендаций

Для цитирования: Затонский А.В., Сиротина Н.А. Управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края на основе конечно-разностной модели второго порядка // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 96–106. DOI: 10.14529/ctcr220209

MANAGEMENT OF THE NATURAL RESOURCE POTENTIAL OF THE PERM REGION ON THE BASIS OF A SECOND-ORDER FINITE-DIFFERENCE MODEL

A.V. Zatonkiy, zxeon@narod.ru

N.A. Sirotina, nsirotina117@mail.ru

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia

Abstract. The article is devoted to the problem of natural resource potential management based on a finite-difference model of the 2nd order. In previous studies, it was found that the management of natural resource potential using finite-difference models allows us to obtain qualitative forecasts in comparison with the traditionally used linear multiple models. **Purpose of work.** The purpose of this work is to build a finite-difference model of a complex indicator of the second-order natural resource potential based on statistical data and to evaluate its predictive properties on the example of the Perm Region. **Materials and methods.** The second-order finite-difference model was obtained by adding autoregressive terms of the first and second orders to the multiple linear regression model. Based on trends, a forecast of factors was made and the corresponding model values were calculated. The ability to control the factors determining the PRP was established on the basis of their qualitative analysis. Estimates of the impact of changes in factors on the level of PRP were made by increasing and decreasing the forecast values of the selected controlled and uncontrolled factors by 5%. A system of recommendations for the regional government on the management of the natural resource potential of the Perm Region for 2019 and 2020 has been developed. **The results of the study.** It was revealed that during both forecast periods, the negative dynamics of the PRP as a result of a decrease in uncontrolled factors – a decrease of 0.01 in 2019. and by 0.02 in 2020. it is compensated by its positive dynamics as a result of the growth of controlled factors – an increase of 0.15 in 2019 and 0.16 in 2020. Since an increase in controlled factors by 5% allows for a significant increase in PRP, an increase in controlled factors by less than 5% is sufficient to compensate for the negative impact of unmanaged factors. **Discussion and conclusion.** The results obtained allow us to assert that the use of a second-order finite-difference model makes it possible to effectively manage the level of the natural resource potential of the region.

Keywords: mathematical modeling, natural resource potential, finite difference model, forecasting, recommendation system

For citation: Zatonkiy A.V., Sirotina N.A. Management of the natural resource potential of the Perm region on the basis of a second-order finite-difference model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(2):96–106. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220209

Введение

Рациональное использование природных ресурсов является необходимым условием эффективного управления устойчивым региональным развитием. Комплексным показателем совокупности региональных природных ресурсов является природно-ресурсный потенциал. Кризисные явления, характерные для социально-экономических систем в современных условиях, выражаются в негативных тенденциях и цикличности. Для их коррекции необходимо обеспечить качественное управление региональным природно-ресурсным потенциалом (ПРП). Это будет способствовать инвестиционной привлекательности субъекта, более динамичному экономическому росту, а также позволит установить целесообразность того или иного вида хозяйственной деятельности.

1. Обзор литературы

В работе [1] предпринята попытка оценить влияние природных ресурсов на международную торговлю и финансовое развитие территорий, однако данный анализ осуществлен на макроуровне, а указанный в статье метод статистического анализа панельных данных предполагает составную структуру объекта исследования (например, регионы Федерального округа) и не может быть использован на уровне единичного объекта. Ряд авторов разрабатывают вопрос эффективного

освоения и управления ПРП посредством моделирования инвестиционных денежных потоков на примере различных стран и регионов: Африки [2], Таджикистана [3], Китая [4]. Для комплексного изучения ПРП и управления его отдельными элементами достаточно широко распространено использование геоинформационно-аналитических систем (ГИС). Так, в [5] для целей эффективного управления природными ресурсами рассматривается применение ГИС на территории Индии, в [6] показана роль дисциплины GIScience в информационной и методологической поддержке исследований в области природных ресурсов и окружающей среды, а в [7] автором предпринята попытка комплексной оценки природного богатства Пермского края.

Методы математического моделирования широко применимы для моделирования и прогнозирования, а, следовательно, и управления природными ресурсами территории. Так, в работе [8] осуществлен обзор имеющихся математических моделей поддержки принятия решений с целью повышения устойчивого развития сельского хозяйства в развивающихся странах. Авторы заключили, что принятие решений по землепользованию с целью повышения устойчивости сельского хозяйства и эффективности использования ресурсов на основе математических моделей обладает большим потенциалом по сравнению с использованием традиционных моделей. В исследовании [9] разработана модель рыночного равновесия на основе смешанного комплементарного программирования (МСП) для оценки безопасности поставок газа в Китае. Работа [10] посвящена оптимизационным динамическим моделям невозобновимых природных ресурсов. В [11] автор предпринял попытку разработки обобщенной модели оценки общей технико-экономической и экологической эффективности переработки металлосодержащих техногенных ресурсов Грузии, основанной на специально усовершенствованной для этой цели математической модели анализа точки безубыточности. Однако при этом рассматриваются только отдельные виды ресурсов, что является неприменимым для большей части регионов ввиду наличия большого их количества.

В работе [12] исследуется роль лесной биомассы в борьбе с бронхитом у населения, вызванным урбанизацией. Для этой цели авторами сформулирована нелинейная математическая модель, учитывающая интерактивную динамику между лесной биомассой, населением и загрязнением окружающей среды. Разработанная модель качественно проанализирована для существования и устойчивости ее различных состояний равновесия с использованием теории устойчивости дифференциальных уравнений.

Авторами в [13] разработана многокритериальная многофакторная нечеткая модель для оптимизации распределения земельных и водных ресурсов в условиях риска. Подобные методы эффективны для решения слабо формализуемых задач, однако зачастую требуют разработки соответствующего программного обеспечения и специфического математического инструментария. В [14] авторы используют стохастические детерминированные модели для оценки влияния осадков на лесные ресурсы. Авторы в [15] оценивают экономическое региональное развитие территории с помощью системы дифференциальных уравнений. Важно отметить, что детерминированные факторные модели в основном используются для моделирования и прогнозирования физических и технических систем, а поведение сложных экономических и социально-экономических систем не всегда адекватно описывают.

Достаточно распространенным подходом к управлению природными ресурсами является моделирование с целью нивелирования воздействий на окружающую среду. В [16] в рамках постановки и решения задачи линейного программирования предпринята попытка оценки результативности мероприятий по восстановлению окружающей природной среды. Авторы в [17] исследуют вопросы моделирования с целью контроля в сфере истощения запасов природных ресурсов. В работе [18] авторы предложили методику математического моделирования с целью управления отходами и ресурсами с использованием комплексного подхода.

Проведенный обзор имеющихся работ позволил установить, что вопрос управления природно-ресурсным потенциалом разработан недостаточно. Значительная часть отечественных работ является неактуальной ввиду давности исследования. Серьезных работ, посвященных изучению ПРП Пермского края, выполненных в течение последних 20 лет, в ходе проведенного обзора обнаружить не удалось. При этом оперативное планирование при использовании природных богатств органами власти является интересной задачей как с теоретической, так и прикладной точек зрения, поскольку ее решение позволяет обеспечить устойчивое развитие региона. Для управления ПРП на практике необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать математическую модель природно-ресурсного потенциала региона;
- 2) осуществить сбор экономико-статистических данных на примере конкретного региона;
- 3) выполнить построение разработанной математической модели на примере конкретного региона;
- 4) проанализировать возможности лиц, принимающих решения (ЛПР) по противодействию негативным тенденциям неуправляемых факторов, определяющих уровень ПРП, путем варьирования управляемыми факторами на примере конкретного региона.

2. Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран ПРП Пермского края. Целесообразно оценить влияние изменения управляемых и неуправляемых факторов на его величину и выработать систему рекомендаций по краткосрочному управлению им с целью компенсации негативных тенденций определяющих его факторов. Для этого необходимо:

- выполнить краткосрочный прогноз факторов, определяющих ПРП Пермского края (на 1 год);
- вычислить соответствующее прогнозное значение ПРП Пермского края (центральную точку прогноза);
- проанализировать факторы, определяющие ПРП Пермского края, и оценить их с точки зрения управляемости;
- выбрать по два наиболее значимых для региона управляемых и неуправляемых фактора;
- вычислить абсолютные значения выбранных факторов при их увеличении и уменьшении на 5 %;
- рассчитать значения ПРП при различных комбинациях значений управляемых и неуправляемых факторов, оценить, компенсируют ли положительные изменения управляемых факторов негативные изменения неуправляемых;
- в случае если рассмотренные изменения управляемых факторов не позволяют компенсировать изменения неуправляемых, соответствующие значения следует подобрать «вручную»;
- на основании полученных расчетов разработать рекомендации по управлению ПРП Пермского края для лиц, принимающих решения.

Изучение имеющейся статистической информации в открытых источниках позволило установить набор показателей, определяющих уровень ПРП Пермского края на временном интервале с 2008 по 2018 г. (табл. 1).

Факторы ПРП Пермского края
Natural resource potential factors for the Perm region

Таблица 1
Table 1

№	Обозначение	Наименование
1	X_1	Посевные площади сельскохозяйственных культур, тыс. га
2	X_2	Среднегодовая численность занятых в экономике, тыс. чел.
3	X_3	Инвестиции в основной капитал предприятий, млн руб.
4	X_4	Внесение удобрений: минеральные удобрения, тыс. т
5	X_5	Внесение удобрений: органические удобрения, тыс. т
6	X_6	Стоимость основных фондов на конец года, млн руб.
7	X_7	Лесовосстановление, тыс. га
8	X_8	Число предприятий и организаций на конец года
9	X_9	Цена нефти Brent (среднегодовое значение), USD за баррель
10	X_{10}	Экспорт продукции ТЭК, млн USD

Ранее было установлено [19], что для прогнозирования социально-экономических процессов модели с авторегрессионными слагаемыми различных порядков (в частности конечно-разностные модели первого и второго порядков, КРМ-1 и КРМ-2) позволяют получить более ка-

чественные прогнозы по сравнению с традиционно используемыми линейными множественными моделями (ЛММ).

На основании статистических данных по Пермскому краю за 2008–2018 гг. в [20] нами установлено, что наилучшее качество прогнозирования обеспечивает набор факторов $X_1, X_2, X_4, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$, а уравнения КРМ-1 и КРМ-2 имеют вид соответственно:

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{КРМ-1}}(t_k) &= -1,683 + (-0,894 + 1) \cdot Y_{\text{КРМ-1}}(t_{k-1}) + 1,950 \cdot X_1(t_k) - 0,844 \cdot X_2(t_k) + 0,192 \cdot X_4(t_k) + \\
 &+ 1,819 \cdot X_6(t_k) - 0,807 \cdot X_7(t_k) + 1,483 \cdot X_8(t_k) + 1,112 \cdot X_9(t_k) + 0,338 \cdot X_{10}(t_k) = \\
 &= -1,683 + 0,106 \cdot Y_{\text{КРМ-1}}(t_{k-1}) + 1,950 \cdot X_1(t_k) - 0,844 \cdot X_2(t_k) + 0,192 \cdot X_4(t_k) + \\
 &+ 1,819 \cdot X_6(t_k) - 0,807 \cdot X_7(t_k) + 1,483 \cdot X_8(t_k) + 1,112 \cdot X_9(t_k) + 0,338 \cdot X_{10}(t_k)
 \end{aligned} \quad (1)$$

и

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{КРМ-2}}(t_k) &= -1,270 + (-1,781 - 0,349 + 2) \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-1}) - (1 - 0,349) \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-2}) + \\
 &+ 0,108 \cdot X_1(t_k) + 1,216 \cdot X_2(t_k) - 0,176 \cdot X_4(t_k) + 2,567 \cdot X_6(t_k) + 0,389 \cdot X_7(t_k) + \\
 &+ 0,361 \cdot X_8(t_k) + 0,009 \cdot X_9(t_k) + 0,166 \cdot X_{10}(t_k) = -1,270 - 0,130 \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-1}) + \\
 &+ 0,651 \cdot Y_{\text{КРМ-2}}(t_{k-2}) + 0,108 \cdot X_1(t_k) + 1,216 \cdot X_2(t_k) - 0,176 \cdot X_4(t_k) + 2,567 \cdot X_6(t_k) + \\
 &+ 0,389 \cdot X_7(t_k) + 0,361 \cdot X_8(t_k) + 0,009 \cdot X_9(t_k) + 0,166 \cdot X_{10}(t_k).
 \end{aligned} \quad (2)$$

Погрешности прогнозирования с использованием КРМ, как правило, существенно ниже, чем с использованием ЛММ (табл. 2).

Погрешности прогнозирования ПРП Пермского края

Таблица 2

Table 2

Perm region natural resource potential forecasting errors

Временной интервал	Модель	Постпрогноз 1 год	Постпрогноз 2 года	
			1-й год	2-й год
2008–2018 гг.	ЛММ	100	100	100
	КРМ-1	65,55	-29,77	83,21
	КРМ-2	68,73	-16,29	45,52

При прогнозировании на 2 года вперед целесообразно рассмотреть качество прогнозов на 1 и 2 года. Прогнозы КРМ на 1 год обладают лучшим качеством по сравнению с ЛММ лишь в половине случаев:

– при прогнозировании на один год вперед на временном интервале 2008–2018 (на 2018 г. по данным 2008–2017 гг.) прогнозы КРМ-1 и КРМ-2 на 2018 г. лучше ЛММ-прогноза на 34,45 и 31,27 % соответственно;

– при прогнозировании на 2 года вперед на временном интервале 2008–2018 гг. прогнозы КРМ-1 и КРМ-2 на 1 год (на 2017 г. по данным 2008–2016 гг.) существенно лучше ЛММ-прогноза (на 70,23 и 83,71 % по абсолютной величине соответственно); прогнозы КРМ-1 и КРМ-2 на 2 года вперед (на 2018 г. по данным 2008–2016 гг.) существенно лучше ЛММ-прогноза (на 16,79 и 54,48 % по абсолютной величине соответственно).

Таким образом, прогнозирование с использованием КРМ-2 на 2 года позволяет сократить погрешность прогнозирования более чем вдвое по сравнению с погрешностью прогнозирования ЛММ. Поскольку точность прогноза КРМ-2 выше, чем КРМ-1, расчеты для целей дальнейшего исследования будем выполнять на основании КРМ-2.

3. Результаты исследования

Для построения краткосрочного прогноза ПРП на 2019 и 2020 гг. в соответствии с полученными уравнениями (1) и (2) необходимы соответствующие прогнозные значения факторов. Выполним их прогноз на основании 4–5-летних трендов (табл. 3).

Таблица 3

Прогнозные значения факторов на 2019–2020 гг.

Table 3

Forecast values of factors for 2019–2022

№	Фактор	Метод прогноза	Прогноз на 2019 г. ($t_k = 6$)	Прогноз на 2020 г. ($t_k = 7$)
1	X_1	$X_1(t_k) = 0,0459 \cdot t_k - 0,0234$	0,2520	0,2979
2	X_2	$X_2(t_k) = -0,1574 \cdot t_k + 0,8362$	-0,1082	-0,2656
3	X_4	$X_4(t_k) = 0,1341 \cdot t_k + 0,0523$	0,8569	0,991
4	X_6	$X_6(t_k) = 0,1131 \cdot t_k + 0,4533$	1,1319	1,2450
5	X_7	$X_7(t_k) = 0,1670 \cdot t_k + 0,1485$	0,9203	1,0026
6	X_8	$X_8(t_k) = -0,1134 \cdot t_k + 1,0023$	0,3219	0,2085
7	X_9	$X_9(t_k) = 0,1985 \cdot t_k - 0,2164$, $t_4 = 2019, t_5 = 2020$	0,5776	0,7761
8	X_{10}	$X_{10}(t_k) = 0,0744 \cdot t_k + 0,2233$, $t_4 = 2019, t_5 = 2020$	0,5209	0,5953
9	$Y_{\text{КРМ-2}}(t_k = 12)$	В соответствии с уравнением (2)	1,2513	1,2316

Возможность управления факторами, определяющими ПРП, может быть установлена на основании их качественного анализа. Так, к управляемым факторам в (1) и (2) можно отнести:

X_1 – посевные площади сельскохозяйственных культур, тыс. га;

X_3 – инвестиции в основной капитал предприятий, млн руб.;

X_4 – внесение минеральных удобрений, тыс. т;

X_5 – внесение органических удобрений, тыс. т;

X_6 – стоимость основных фондов на конец года, млн руб.;

X_7 – лесовосстановление, тыс. га.

К неуправляемым факторам относятся:

X_2 – среднегодовая численность занятых в экономике, тыс. чел.;

X_8 – число предприятий и организаций на конец года;

X_9 – цена нефти Brent (среднегодовое значение), USD за баррель;

X_{10} – экспорт продукции ТЭК, млн USD.

Возможность оперативного управления размерами посевных площадей (X_1) определяется активно реализуемыми программами поддержки сельхозпроизводителей на территории Пермского края в рамках реализации стратегии импортозамещения. Стоимость объектов основных средств является одним из основополагающих факторов экономики, главной составляющей процесса хозяйственной деятельности, иллюстрирующих успешность функционирования организаций (от эффективности их использования зависит качество, количество производимой продукции или оказанных услуг, а также их конкурентоспособность), кроме того, поэтому целесообразно выбрать в качестве управляющего фактора X_6 . Фактором X_4 (внесение минеральных удобрений) управлять невозможно в силу того, что соответствующий коэффициент имеет нулевое значение. Фактор лесовосстановления (X_7) является одним из важнейших для целей обеспечения устойчивого развития региона, данный вид деятельности в Пермском крае активно реализуется на практике, однако эффект от него не может быть получен в краткосрочной перспективе. Таким образом, в качестве управляемых факторов выбраны X_1 и X_6 .

Наиболее значимыми неуправляемыми факторами являются: X_2 – среднегодовая численность занятых в экономике и X_9 – цена нефти Brent. Показатель численности занятых в большей степени определяется экономической конъюнктурой и социальной ответственностью бизнеса и в меньшей степени – политикой региональных властей, соответственно, управление им затруднительно. Стоимость нефти определяется взаимодействием мирового спроса и предложения, на ее уровень до определенной степени могут повлиять федеральные, но не региональные власти. При этом значимость нефтяной отрасли для бюджета региона весьма существенна, а производство нефти является одним из значимых и относительно редких краевых ресурсов.

Для оценки влияния изменения факторов на уровень ПРП рассчитаем увеличение и уменьшение прогнозных значений выбранных управляемых и неуправляемых ПРП факторов на 5 % (табл. 4).

Таблица 4

Изменение уровней определяющих факторов на 5 % в 2019 и 2020 гг.

Table 4

Change in the levels of determining factors by 5 % in 2019 and 2020

Фактор	$X - 5 \%$	X	$X + 5 \%$
X_1 (2019)	0,2394	0,2520	0,2646
X_1 (2020)	0,2830	0,2979	0,3128
X_2 (2019)	-0,1136	-0,1082	-0,1028
X_2 (2020)	-0,2789	-0,2656	-0,2523
X_6 (2019)	1,0753	1,1319	1,1885
X_6 (2020)	1,1828	1,2450	1,3073
X_9 (2019)	0,5487	0,5776	0,6065
X_9 (2020)	0,7373	0,7761	0,8149

Их наличие позволяет определить соответствующие уровни ПРП по каждому из уравнений (1) и (2) (табл. 5, 6).

Таблица 5

КРМ-2 прогнозы ПРП при малых изменениях неуправляемых факторов

Table 5

CRM-2 forecasts of PRP with small changes in uncontrolled factors

	КРМ-2 2019 ($t_k = 12$)			КРМ-2 2020 ($t_k = 13$)		
	$X_2 - 5 \%$	X_2	$X_2 + 5 \%$	$X_2 - 5 \%$	X_2	$X_2 + 5 \%$
$X_9 - 5 \%$	1,2445 (-0,55 %)	1,2511 (-0,02 %)	1,2577 (0,50 %)	1,2151 (-1,34 %)	1,2313 (-1,28 %)	1,2474 (1,28 %)
X_9	1,2448 (-0,53 %)	1,2513	1,2579 (0,53 %)	1,2155 (-1,31 %)	1,2316	1,2478 (1,31 %)
$X_9 + 5 \%$	1,2450 (-0,50 %)	1,2516 (0,02 %)	1,2582 (0,55 %)	1,2158 (-1,28 %)	1,2320 (0,03 %)	1,2481 (1,34 %)

Поскольку положительной динамикой ПРП является рост, то наихудший сценарий из рассмотренных соответствует снижению обоих неуправляемых факторов на 5 %, т. е.

$$Y_{\text{КРМ-2}}(t_k = 12, X_2 - 5 \%, X_9 - 5 \%) = 1,2445,$$

$$Y_{\text{КРМ-2}}(t_k = 13, X_2 - 5 \%, X_9 - 5 \%) = 1,2151.$$

Тогда снижение уровня ПРП относительно его центральных точек прогноза составит

$$\Delta Y_{\text{КРМ-2}}^{\text{неупр}}(t_k = 12) = 1,2445 - 1,2513 = -0,0068,$$

$$\Delta Y_{\text{КРМ-2}}^{\text{неупр}}(t_k = 13) = 1,2151 - 1,2316 = -0,0165.$$

Таблица 6

КРМ-2 прогнозы ПРП при малых изменениях управляемых факторов

Table 6

CRM-2 forecasts of PRP with small changes in controlled factors

	КРМ-2 2019 ($t_k = 12$)			КРМ-2 2020 ($t_k = 13$)		
	$X_6 - 5 \%$	X_6	$X_6 + 5 \%$	$X_6 - 5 \%$	X_6	$X_6 + 5 \%$
$X_1 - 5 \%$	1,1047 (-11,72 %)	1,2500 (-0,11 %)	1,3952 (11,50 %)	1,0703 (-13,10 %)	1,2300 (-0,13 %)	1,3898 (12,84 %)
X_1	1,1061 (-11,61 %)	1,2513	1,3966 (11,61 %)	1,0719 (-12,97 %)	1,2316	1,3914 (12,97 %)
$X_1 + 5 \%$	1,1074 (-11,50 %)	1,2527 (0,11 %)	1,3980 (11,72 %)	1,0735 (-12,84 %)	1,2332 (0,13 %)	1,3930 (13,10 %)

Поскольку положительной динамикой ПРП является рост, то наилучший сценарий из рассмотренных соответствует росту обоих управляемых факторов на 5 %, т. е.

$$Y_{\text{КРМ-2}}(t_k = 12, X_1 + 5\%, X_6 + 5\%) = 1,3980,$$

$$Y_{\text{КРМ-2}}(t_k = 13, X_1 + 5\%, X_6 + 5\%) = 1,3930.$$

Тогда увеличение уровня ПРП относительно его центральной точки прогноза составит

$$\Delta Y_{\text{КРМ-2}}^{\text{упр}}(t_k = 12) = 1,3980 - 1,2513 = 0,1466,$$

$$\Delta Y_{\text{КРМ-2}}^{\text{упр}}(t_k = 13) = 1,3930 - 1,2316 = 0,1614.$$

Очевидно, что в течение обоих прогнозных периодов отрицательная динамика ПРП в результате снижения неконтролируемых факторов (уменьшение на 0,0068 в 2019 г. и на 0,0165 в 2020 г.) компенсируется его положительной динамикой в результате роста контролируемых факторов (ростом на 0,1466 в 2019 г. и на 0,1614 в 2020 г.). Поскольку увеличение управляемых факторов на 5 % позволяет существенно увеличить ПРП, то для компенсации отрицательного влияния неуправляемых факторов достаточно роста управляемых факторов менее чем на 5 %. Так, в 2019 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном значении стоимости основных фондов на конец периода необходимо увеличение посевных площадей сельскохозяйственных культур на 25,3 %. В 2020 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном значении стоимости основных фондов на конец периода необходимо увеличение посевных площадей сельскохозяйственных культур на 51,5 %.

В 2019 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном значении посевных площадей сельскохозяйственных культур необходимо увеличение стоимости основных фондов на конец года на 0,235 %. В 2020 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном значении посевных площадей сельскохозяйственных культур необходимо увеличение стоимости основных фондов на конец года на 0,516 %.

Обсуждение и заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Отрицательной динамикой неуправляемых факторов X_2 (среднегодовая численность занятых в экономике) и X_9 (цена нефти Brent) является снижение. При уменьшении факторов на 5 % происходит уменьшение ПРП в соответствии с КРМ-2 на 3,91 % в 2019 г. и на 3,10 % в 2020 г.

2. Положительной динамикой управляемых факторов X_1 (размеры посевных площадей) и X_6 (стоимость основных фондов на конец года) является рост. При увеличении факторов на 5 % происходит рост ПРП в соответствии с КРМ-2 на 11,72 % в 2019 г. и на 13,10 % в 2020 г.

3. Прирост ПРП в результате положительного изменения управляемых факторов X_1 и X_6 на 5 % компенсирует его снижение в результате негативного изменения неуправляемых факторов X_2 и X_9 на 5 %, следовательно, достаточно изменения управляемых факторов менее чем на 5 %. Это позволит перенаправить потоки ресурсов на другие значимые социальные и экономические проекты.

4. В 2019 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном значении стоимости основных фондов на конец периода необходимо увеличение посевных площадей сельскохозяйственных культур на 25,3 %. В 2020 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном значении стоимости основных фондов на конец периода необходимо увеличение посевных площадей сельскохозяйственных культур на 51,5 %. Представляется, что такое существенное увеличение труднодостижимо на практике.

5. В 2019 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном значении посевных площадей сельскохозяйственных культур необходимо увеличение стоимости основных фондов на конец года на 0,235 %. В 2020 г. для компенсации 5 % ухудшения обоих неуправляемых факторов (среднегодовая численность занятых в экономике и цена нефти Brent) при неизменном зна-

чении посевных площадей сельскохозяйственных культур необходимо увеличение стоимости основных фондов на конец года на 0,516 %. В абсолютных цифрах соответствующие прогнозные показатели равны 7 264 048,2 и 7 857 542,8 млн руб. в 2019 и 2020 гг. соответственно.

6. Для достижения требуемых уровней стоимости основных производственных фондов необходимы инвестиции в размере

7 264 048,2 – 7 250 539,6 = 13 508,62 млн руб. в 2019 г.;

7 857 542,8 – 7 824 917,5 = 32 625,27 млн руб. в 2020 г.

Таким образом, лица, принимающие административные решения могут обеспечить устойчивое развитие ПРП региона за счет обеспечения положительной динамики управляемых факторов даже в неблагоприятных внешних и внутренних условиях.

Список литературы

1. Redmond T., Nasir M.A. Role of natural resource abundance, international trade and financial development in the economic development of selected countries // *Resources Policy*. 2020. Vol. 66. P. 65–78. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101591

2. The politics of natural resource investments and rights in Africa: A theoretical approach / L. Buur, R. Pedersen, M. Nystrand et al. // *The Extractive Industries and Society*. 2020. Vol. 7, iss. 3. P. 918–930.

3. Ходиев Д.А., Хофизов Ф.А., Табаров О.С. Моделирование и прогнозирование привлечения инвестиций для освоения природно-ресурсного потенциала региона // *Вестник Таджикского национального университета. Серия социально-экономических и общественных наук*. 2018. № 6. С. 30–36.

4. Investment risk and natural resource potential in “Belt & Road Initiative” countries: A multi-criteria decision-making approach / J. Hussain, K. Zhou, S. Guo, A. Khan // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 723. P. 137981.

5. Kumar N., Yamaç S.S., Velmurugan A. Applications of Remote Sensing and GIS in Natural Resource Management // *Journal of the Andaman Science Association*. 2015. Vol. 20 (1). P. 1–6.

6. GIScience and remote sensing in natural resource and environmental research: Status quo and future perspectives / T. Pei, J. Xu, Y. Liu et al. // *Geography and Sustainability*. 2021. Vol. 2, iss. 3. P. 207–215. DOI: 10.1016/j.geosus.2021.08.004

7. Геоинформационное обеспечение экономической оценки природно-ресурсного потенциала территорий Пермского края / П.А. Красильников, А.В. Коноплев, В.В. Хронусов, М.Г. Барский // *Экономика региона*. 2009. № 1 (17). С. 143–151.

8. Mellaku T.M., Sebsibe S.S. Potential of mathematical model-based decision making to promote sustainable performance of agriculture in developing countries: A review article // *Heliyon*. 2022. Vol. 8, iss. 2. P. e08968. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e08968

9. Evaluating natural gas supply security in China: An exhaustible resource market equilibrium model / X. Wang, Y. Qiu, J. Chen, X. Hu // *Resources Policy*. 2022. Vol. 76. P. 102562. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102562

10. Кузнецов Ю.А., Семенов А.В., Власова М.Н. Математическое моделирование оптимального использования невозобновимых природных ресурсов // *Экономический анализ: теория и практика*. 2012. № 32. С. 45–57.

11. Jandieri G. A generalized model for assessing and intensifying the recycling of metal-bearing industrial waste: A new approach to the resource policy of manganese industry in Georgia // *Resources Policy*. 2022. Vol. 75. P. 102462. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102462

12. Tandon A., Banerjee S., Jyotsna K. Forestry biomass and its role in controlling bronchitis in urban areas: a nonlinear modelling study // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2021. Vol. 8, iss. 1. P. 69–80. DOI: 10.1007/s40808-020-01071-7

13. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty / M. Li, Q. Fu, V.P. Singh et al. // *Agricultural systems*. 2020. Vol. 178. P. 102685. DOI: 10.1016/j.agry.2019.102685

14. Lata K., Misra A.K. The influence of forestry resources on rainfall: A deterministic and stochastic model // *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 81. P. 673–689. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.009

15. Курьшев Н.И. Модель и способ оценки эколого-экономического состояния регионов // Вестник кибернетики. 2007. № 6. С. 138–149.

16. Бурцев С.В. Экономико-математическая модель оценки эффективности мероприятий по восстановлению окружающей природной среды закрываемых угольных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №1. С. 357–359.

17. Потравный И.М., Новоселова А.Л., Алныкина Е.М. Модели истощения природных ресурсов и оценки прошлого ущерба от загрязнения окружающей среды // Плехановский научный бюллетень. 2015. № 2 (8). С. 53–78.

18. Соловьева Н.В., Худошина М.Ю. Комплексный подход к моделированию управления ресурсами и отходами в системе «природа – техносфера» с целью минимизации воздействия на окружающую среду // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 2 (134). С. 33–40.

19. Сиротина Н.А., Копотева А.В., Затонский А.В. Применение конечно-разностных моделей для краткосрочного прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 2. С. 154–166. DOI: 10.14529/ctcr210215

20. Сиротина Н.А. Краткосрочное управление природно-ресурсным потенциалом Пермского края с использованием конечно-разностных моделей // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 11. С. 94–101. DOI: 10.37882/2223-2966.2021.11.27

References

1. Redmond T., Nasir M.A. Role of natural resource abundance, international trade and financial development in the economic development of selected countries. *Resources Policy*. 2020;66:65–78. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101591

2. Buur L., Pedersen R., Nystrand M., Macuane J., Jacob T. The politics of natural resource investments and rights in Africa: A theoretical approach. *The Extractive Industries and Society*. 2020;7(3):918–930.

3. Khodiyev D.A., Khofizov F.A., Tabarov O.S. Modeling and forecasting attraction of investment for development of the natural and resource potential of the region. *Bulletin of the Tajik National University. Series of socio-economic and social sciences*. 2018;(6):30–36. (In Russ.)

4. Hussain J., Zhou K, Guo S., Khan A. Investment risk and natural resource potential in “Belt & Road Initiative” countries: A multi-criteria decision-making approach. *Science of the Total Environment*. 2020;723:137981.

5. Kumar N., Yamaç S.S., Velmurugan A. Applications of Remote Sensing and GIS in Natural Resource Management. *Journal of the Andaman Science Association*. 2015;20(1):1–6.

6. Pei T., Xu J., Liu Y. et al. GIScience and remote sensing in natural resource and environmental research: Status quo and future perspectives. *Geography and Sustainability*. 2020;2(3):207–215. DOI: 10.1016/j.geosus.2021.08.004

7. Krasilnikov P.A., Konoplev A.V., Hronusov V.V., Barskiy M.G. Software of the economic estimation of natural resource potential of the territory of Perm region. *Economy of Regions*. 2009;1(17):143–151. (In Russ.)

8. Mellaku T.M., Sebsibe S.S. Potential of mathematical model-based decision making to promote sustainable performance of agriculture in developing countries: A review article. *Heliyon*. 2022;8(2):e08968. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e08968

9. Wang X., Qiu Y., Chen J., Hu X. Evaluating natural gas supply security in China: An exhaustible resource market equilibrium model. *Resources Policy*. 2022;76:102562. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102562

10. Kuznetsov Yu.A., Semenov A.V., Vlasova M.N. [Mathematical modeling of optimal use of non-renewable natural resources]. *Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika*. 2012;(32):45–57. (In Russ.)

11. Jandieri G. A generalized model for assessing and intensifying the recycling of metal-bearing industrial waste: A new approach to the resource policy of manganese industry in Georgia. *Resources Policy*. 2022;75:102462. DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102462

12. Tandon A., Banerjee S., Jyotsna K. Forestry biomass and its role in controlling bronchitis in urban areas: a nonlinear modelling study. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2021;8(1):69–80. DOI: 10.1007/s40808-020-01071-7

13. Li M., Fu Q., Singh V.P., Liu D., Li T., Zhou Y. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty. *Agricultural Systems*. 2020;178:102685. DOI: 10.1016/j.agsy.2019.102685
14. Lata K., Misra A.K. The influence of forestry resources on rainfall: A deterministic and stochastic model. *Applied Mathematical Modelling*. 2020;81:673–689. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.009
15. Kuryshv N.I. [Model and method for assessing the ecological and economic state of regions]. *Proceedings in Cybernetics*. 2007;(6):138–149. (In Russ.)
16. Burtsev S.V. [Economic and mathematical model for evaluating the effectiveness of measures to restore the natural environment of closed coal enterprises]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2012;(1):357–359. (In Russ.)
17. Potravnyy I.M., Novoselova A.L., Alnykina E.M. [Models of natural resource depletion and estimates of past pollution damage]. *Plekhanovskiy nauchnyy byulleten'*. 2015;2(8):53–78. (In Russ.)
18. Solov'yeva N.V., Khudoshina M.Yu. [Integrated approach to resource and waste management modeling in the “nature – technosphere” system in order to minimize the impact on the environment]. *Life Safety*. 2012;2(134):33–40. (In Russ.)
19. Sirotina N.A., Kopoteva A.V., Zatonkiy A.V. Finite-Difference Models Application for Short-Term Forecasting of the Natural Resource Potential of the Perm Region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(2):154–166. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210215
20. Sirotina N.A. Natural resource potential short-term management using finite-difference models of the Perm region. *Modern Science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences*. 2021;(11):94–101. (In Russ.) DOI: 10.37882/2223-2966.2021.11.27

Информация об авторах

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; z Xenon@narod.ru.

Сиротина Наталья Александровна, старший преподаватель кафедры общенаучных дисциплин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; nsirotna117@mail.ru.

Information about the authors

Andrey V. Zatonkiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; z Xenon@narod.ru.

Natalia A. Sirotina, Senior Lecturer of the Department of General Scientific Disciplines, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; nsirotna117@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.03.2022

The article was submitted 20.03.2022

INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT OF STRATEGIC MANAGEMENT OF ENTERPRISES IN GLOBAL INSTABILITY CONDITIONS

O.V. Loginovskiy¹, loginovskiiiov@susu.ru

A.L. Shestakov¹, a.l.shestakov@susu.ru

K.A. Korennaya², kkris221@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Kuznetsk Ferroalloys, Novokuznetsk, Russia

Abstract. It is shown that the strengthening of the role of strategic management of industrial enterprises and corporations that has taken place in recent years requires the creation of new developments in the field of both improving the strategies for managing manufacturing companies themselves and the formation of appropriate information and analytical support for the mentioned process. **The aim of the work** was the need to develop an up-to-date information and analytical support for the strategic management of enterprises in the context of global instability in the world and a tough confrontation between Russia and the West. In this regard, the implementation of effective management of industrial enterprises and corporations is becoming an increasingly difficult task, the solution of which depends on an increasing number of factors, not only direct, but also increasingly significant indirect impact. **Materials and methods.** The study of the origin, formation and development of ideas of strategic management of industrial enterprises and organizations showed that the implementation of operational and strategic management of enterprises cannot be carried out, as was done in the very recent past, based on the experience of managers and simple unambiguous schemes development of management decisions. Based on the analysis of the development of scientific ideas, foreign and domestic approaches and conceptual provisions for the strategic and operational management of industrial companies and corporations, a set of scientific provisions for the formation of information and analytical support for the development of the strategy of Russian companies, based on the results of practical experience and scientific developments of the authors. **Results.** The proposed set of scientific provisions for the development of information and analytical support for the strategic management of enterprises in the context of global instability enables the leaders of these enterprises to increase the validity and effectiveness of their activities. **Conclusion.** Because foreign and domestic experience in managing enterprises and organizations, scientific research on the strategic and tactical management of companies of the past years, by now, has ceased to make it possible to effectively manage the development of companies. The complex of scientific provisions presented in the article and the algorithm of strategic management of industrial enterprises and corporations is a necessary element for improving the quality of strategic management of manufacturing companies in today's extremely tense and unstable conditions for doing business and business in our country.

Keywords: production corporation, strategic management, operational management, political and economic instability, information system

For citation: Loginovskiy O.V., Shestakov A.L., Korennaya K.A. Information and analytical support of strategic management of enterprises in global instability conditions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):107–121. DOI: 10.14529/ctcr220210

Научная статья
УДК 658.5
DOI: 10.14529/ctcr220210

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯМИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ

*О.В. Логиновский*¹, loginovskiiov@susu.ru

*А.Л. Шестаков*¹, a.l.shestakov@susu.ru

*К.А. Коренная*², kkris221@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Кузнецкие ферросплавы, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Показано что происходящее в последние годы усиление роли стратегического управления промышленными предприятиями и корпорациями требует создания новых разработок в области как совершенствования самих стратегий управления производственными компаниями, так и формирования соответствующего информационно-аналитического обеспечения упомянутого процесса. **Целью работы** явилась необходимость разработки актуального информационно-аналитического обеспечения стратегического управления предприятиями в условиях глобальной нестабильности в мире и жесткого противостояния России со странами Запада. В этой связи осуществление эффективного управления промышленными предприятиями и корпорациями становится все более сложной задачей, решение которой зависит от все большего количества факторов не только прямого, а все более значимого косвенного воздействия. **Материалы и методы.** Изучение вопросов зарождения, формирования и развития идей стратегического управления промышленными предприятиями и организациями показало, что осуществление оперативного и стратегического управления предприятиями нельзя проводить, как это делалось еще в совсем недавнем прошлом на основе имеющегося у руководителей опыта и простых однозначных схем выработки управленческих решений. На основе анализа развития научных идей, зарубежных и отечественных подходов и концептуальных положений по стратегическому и оперативному управлению промышленными компаниями и корпорациями предложен комплекс научных положений по формированию информационно-аналитического обеспечения развития стратегии российских компаний, базирующийся на результатах практического опыта и научных разработок авторов. **Результаты.** Предложенный комплекс научных положений по разработке информационно-аналитического обеспечения стратегического управления предприятиями в условиях глобальной нестабильности дает возможность руководителям этих предприятий повысить обоснованность и эффективность своей деятельности. **Заключение.** В связи с тем, что зарубежный и отечественный опыт управления предприятиями и организациями, научные исследования по стратегическому и тактическому управлению компаниями прошлых лет к настоящему времени перестали давать возможность эффективно управлять развитием компаний, представленный в статье комплекс научных положений и алгоритм стратегического управления промышленными предприятиями и корпорациями является совершенно необходимым элементом повышения качества стратегического управления производственными компаниями в современных крайне напряженных и нестабильных условиях ведения хозяйственной деятельности и бизнеса в нашей стране.

Ключевые слова: производственная корпорация, стратегическое управление, оперативное управление, политическая и экономическая нестабильность, информационная система

Для цитирования: Loginovskiy O.V., Shestakov A.L., Korennaya K.A. Information and analytical support of strategic management of enterprises in global instability conditions // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 107–121. DOI: 10.14529/ctcr220210

Introduction

The theory and practice of management in production companies and corporations show that for many years now the prevailing trend in the development of ideas and innovations in this field has been the consolidation of the role of strategic planning, actually from the zero point in the period of evolving capitalistic relations and through the prevailing positions in the modern era. However, the task on effi-

ciently performing both strategic and operational management in production companies and corporations is becoming more and more complicated since the conditions, in which modern industrial enterprises and corporations of various fields of activity are working, are characterized with surging uncertainty.

The military-and-political, social and economical situations in the world are extremely tense. The controlled chaos, local and hybrid wars, inter-ethnic and interreligious conflicts in different regions around the world, organized by the United States of America and supported by their NATO allies, have resulted in utter instability and created significant migration flows of refugees, as well as intensified social antagonism between different population groups, what entailed a whole number of other negative factors accompanying such actions. All of the that, over the recent years, has been contributing to the escalation of tension in the world, and the aggravation of contradictions between the major superpowers in their civilizational competition for the dominating influence in the international arena, for the possession or control over the strategic territories, oil reserves and other natural resources, and so on.

As a consequence, the conditions of efficient functioning and prospective development have become quite complicated for industrial enterprises and corporations. For Russian production companies and corporations, the situation gets aggravated also due to the fact that the U.S.-led western nations have imposed different sanctions on Russia aiming at creating various obstacles for Russian companies striving to enter foreign markets and signing long-term contracts on supplying goods produced for foreign consumers. As a result, the task on ensuring efficient activity of Russian companies has become more complicated as compared to that of their foreign competitors. This especially concerns the issues of strategic character, forming of medium-term and long-term development strategies for production companies and corporations, and their ability to survive in the context of the surging uncertainty.

Thus, the problems on strategic and tactical management at industrial enterprises in the modern conditions are becoming especially relevant; and the importance of scientific and methodological substantiation of this relevance is becoming extremely necessary in order to ensure the competitiveness of the Russian business. This article is devoted namely to the issues of such substantiation, as well as of forming modern management strategy for industrial enterprises and corporations functioning in the context of global instability.

1. Developing the ideas on strategic management in production companies and corporations

The issues on emerging, forming and development of the ideas on strategic management in industrial enterprises and organizations hold an important place in the scientific literature. This is explained by the fact that without the understanding of situations, factors and peculiarities of their occurrence and evolving, it is quite difficult to make sense of the trends of such dynamics, as well as of the already dated or still relevant approaches, concepts and technologies of managing the organization systems, including production enterprises and corporations, regardless of their fields of activity.

In this context, one should acknowledge that the methods and algorithms of strategic management aiming at improving the efficiency of operation of enterprises and organizations, as well as the quality of preparing the decision-making are the key ones among the complex of various measures and tasks on forming the goal-oriented activity of industrial enterprises, companies and firms, and the like, with regard to the evolution of the managerial approaches, starting from the school of scientific management, administrative school, schools of human relationships, behavioral sciences, quantitative analysis, and also the process-, system-, and situation-based approaches to management [10, 17, 26, 33, 41], and ending with various modern approaches and concepts [1–4, 6–8, 12, 16, 22, 23, 25, 28, 30, 32, 34, 35, 37, 40, 42–44].

The development of the directions of the western management is described significantly more comprehensively in scientific literature than that of the Russian ones. Nevertheless, the origination of scientific management (scientific labor organization) in Russia dates back to the very beginning of the 20th century [17]. After coming to power of Bolsheviks in the Soviet Russia, the new leaders of the country had to think over how to manage the work of industrial enterprises and organizations to meet the interests of a state of dictatorship of the proletariat. Thus, the Russian history of scientific management belongs already to this epoch. Back then, the Soviet government established several institutes of scientific labor organization, which started actively developing different directions of scientific management [17]. And since in those times industrial enterprises already became a state property, the main ideas and

developments on managing those were being formed as part of the centralized planning and management for various fields of industry, as well as improving the efficiency of manual labor, its standardization, etc. However, generally speaking, no smooth or profoundly substantiated concepts on improving the efficiency of strategic management at certain enterprises were created in that epoch. And the functions of strategic management of the country's enterprises at the industries level were being fulfilled by the Planning Bureau, as well as certain ministries. By the period of the decline of socialism in the USSR, the country's government included already about a hundred ministries, meanwhile those comprised several metallurgy ministries, several mechanical engineering industries, and so on, with regard to different sector groups. As a result, the authorities in our country began seriously speaking about the strategic management for certain industrial enterprises only after the restoration of capitalism in Russia, that is, starting from the 1990s.

And since the new Russia was influenced by the West in those years, the developments of the Russian scientists in the field of scientific management (including the strategic management at industrial enterprises and organizations) mostly repeated the scientific ideas and approaches of the well-known western schools and their most prominent representatives.

Let us give a number of most famous works by the Russian scientists and specialists in the field of strategic management of industrial enterprises, which are mostly based on the approaches and concepts of the western strategic management [3, 9, 35, 43]. We should also mention several more up-to-date Russian works on strategic management of industrial enterprises at the industries level: [5, 6, 14]. A significant contribution to the development of organizational management was made through the works by the scientists of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences [7, 8, 34]. For a number of years, the authors of this book were also studying the issues of managing (including the strategic managing) of production companies and corporations [18, 20–22, 24, 27–29, 31].

In the recent years (starting from the world economic crisis of 2008), many heads of Russian businesses have come to fully realize that the organization of a system of strategic planning and management is a vital necessity for industrial enterprises and corporations. The external environment, and the whole production-and-economic infrastructure of the society together with it, started changing even faster than before. In this context, even the best specialists on operational management at enterprises are not able to ensure the prospective development of those. Therefore, the Russian scientific basis of strategic management is in need of reinterpretation and further development.

As we have mentioned earlier, the western theoretical developments in the field of strategic and tactical management, same as the Russian ones, date back to the beginning of the past century, in the course of which they were being developed and amended. The names of the western predecessors and founders of scientific management are widely known: Robert Owen, Charles Babbage, Andrew Ure, Frederick Taylor, Mary Parker Follett, Elton Mayo, Henri Fayol, Henry Gantt, Frank and Lillian Gilbreth they were the first ones to point out the necessity of performing analytical preparation of any production operation, staff selection and training, resource support of works, as well as material incentives for the employees for better labor efficiency. Their contribution into the theory and practice of management, along with that by other classical authors, is described in details in [10, 23, 26]. The huge influence on the development of the management theory was made by Norbert Wiener, who wrote a well-known book on *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine* in 1948, as well as by C. Shannon and R. Ashby.

Among the outstanding theoreticians of the western management we must mention D. Aaker, R. Ackoff, I. Ansoff, S. Beer, T. Peters, P. Drucker, M. Porter, J. Womack, P. Gaughan, R. Johnson, R. Koch, H. Mintzberg, W. Rice-Johnston, P. Senge, A.-W. Scheer, J. Sheldrake, and others [1, 2, 4, 10, 11, 13, 15, 23, 30, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 41, 42, 44, 45].

We should note that the trends on using this or that idea, approach, concept and other theoretical developments on tactical and strategic management in the field of managing enterprises and corporations were constantly changing depending on the emerging of those approaches and concepts. The rise of every new school and approach to management, much as of other conceptual developments of similar kind, was being widely advertised in the western scientific literature, and the consulting firms with this regard were attracting lots of new clients and were making good money on them.

It is important to understand that the development of the theory of management was happening over the span of quite a long period of time, that is why the scientific ideas, provisions and results obtained

by those, who participated in this process and made their contribution to modern theoretical legacy of the management science, should be appreciated and assessed with consideration to the historical peculiarities, conditions of doing business in the time when they were formulated, as well as the goals and tasks, which this or that management theoretician or practice expert was setting before him-/herself.

Among the ideas on modern strategic management that are still relevant are the elaborations by R. Ackoff on the methods of interactive planning of the development of a corporation's future; by Christopher Bartlett and Sumantra Ghoshal on the meaning of transnational corporations and international companies, their structure and management peculiarities, development strategies, and more; by Raymond Miles and Charles Snow on pointing out the main aspects of a company's strategic development: the entrepreneurial, technical (engineering) and managerial (administrative) aspects, which in combination form an adaptive cycle, as well as on the interrelation between a company's structure, management process and development strategy. As to the ideas on improving the management efficiency in companies, we may mention those by J. Grayson and C. O'Dell, which demonstrate the importance of such factors as: flexibility in management, occupation of new markets, using all the possibilities to receive orders, new forms of labor control and organization, requirements to quality, and abrupt changing of the structure of production expenses. These people proved that it is necessary to make modern production more efficient by means of reducing the staff while attracting employees with higher qualifications; improving labor efficiency through monetary incentives; optimizing the vertical structure of management through using brigade forms of work and orienting the supply and assortment of products at the consumers' needs; minimizing the reserves of raw materials, etc.

As compared to the western corporate practices, the experience of Japanese companies is of interest. It is described, for example, by Masaaki Imai in his book on Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success [32]. In terms of this experience, the systems of relations between an individual and an organization are normally characterized, which form five "great systems":

1) system of lifetime employment (usually, this is not a legal system of obligations, but rather an a priori agreement, which an organization voluntarily and unilaterally assumes, and what is a first step to making an employer more devoted to the company);

2) system of workplace training (usually, the obtained education is never enough for efficient working, and the Japanese pay special attention to it; the continuous training becomes some sort of a part of the technological process);

3) system of rotation (transfer to a different subdivision is taken as something new in the employer's life; rotation broadens the mind, allows to get a grasp of the related productions and processes, build new connections, solve some conflict issues, and cultivate the process-wise thinking);

4) system of merits (attestation ruins a business, but getting hold of the information on what the employee's colleagues think about him/her helps him/her better understand his/her drawbacks and strengthen his/her merits);

5) system of bonuses (length of service is an important moment for the labor remuneration; the participative management or bonus, related to the successes and failures of the whole firm and the team, in which the employee works, allows to make him/her part of the family – the company).

Moreover, the collective mechanisms of decision-making and other similar measures are used. Ultimately, an integral mechanism of improvements to companies called "Kaizen" is generated, which is formed in the course of their many years of evolution.

In Japanese companies, each employee can contribute suggestions aimed at various improvements to work. This is a way to encourage creativity, which is the main essence of "Kaizen".

Thus, the emerging of "Kaizen" (1980–1990) replaced the epoch of expanding markets, constantly growing demand, possibility of using cheap resources and work force. Instead of increasing the sales volume, companies started using the methods and technologies of improving the quality of goods, increasing the assortment of the manufactured products, and more. With this regard, "Kaizen" is some kind of a system of improving the production efficiency and quality control.

Studies foreign developments in the field of strategic management show that currently the most widely spread and tested methods of analyzing an enterprise's strategic status include:

- SWOT analysis, STEP analysis (analysis of the macro-environment spheres: social, technical, economical, and political spheres);
- analysis of the "field of forces", as per I. Ansoff;

- marking out of competitive forces, as per Porter;
- comparing the growth ratios and the market share – BCG matrix;
- evolution analysis method – Hofer/Schendel model;
- analysis of sector attractiveness – Shell/DPM model;
- comparing the attractiveness of the market and competitiveness – GE/McKinsey model.

The Western specialists in the field of production management are actively promoting the mentioned developments in the process of rendering consulting services to industrial enterprises and corporations. However, where these managerial technologies might help achieve positive results at foreign production companies, they are often of little efficiency when it comes to Russian industrial enterprises [18–20, 22, 28, 29]. Moreover, the theoretical and methodological substantiations for the majority of the developments in the field of the western production consulting, and different concepts and recommendations on developing of companies and corporations, unfortunately, feature only in a verbal presentation in foreign scientific literature. Essentially, all of those have always been and still are nothing but trivial advices for various managerial links within a company. Therefore, the mentioned developments do not include all the technical, informational, and often organizational-and-methodological aspects of improving the efficiency of the activities of industrial enterprises and corporations.

All of the above leads us to a quite obvious conclusion: it is unlikely that the use of the theoretical provisions and developments in the field of production management, widely covered in foreign scientific literature, allows for positive results by ensuring the improved management efficiency even at foreign companies. For modern Russian industrial enterprises, the western theoretical developments on strategic and tactical management (as well as Russian analogues repeating their ideas) prove to be even less productive.

In this context, the main shareholders and heads of Russian industrial enterprises and corporations should realize that in the business conditions of our country they should not expect significant economic effect in management from using different concepts and methods of foreign management, such as the “new corporate strategy” by I. Ansoff, “lean manufacturing” by J.P. Womack [45], “balanced system of indicators” by M. Brown, or R. Kaplan, D. Norton [15], “7 laws of Chrysler” by R. Lutz [30], “six sigmas” by P. Pande, L. Holpp [36], “McKinsey method” by Ethan M. Rasiel [37], “fifth discipline” by P. Senge [39], as well as Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success by Masaaki Imai [32].

We should once again stress that the peculiarities of functioning of industrial enterprises and organizations in Russia are quite specific and fundamentally differ from the existing western practices. We have a different mentality, and our criteria of success in production, economic and financial activity are not like those in the West and they far from always coincide with foreign ideas on the methods and means of reaching the goal in a competition, technical re-equipment of productions, information support of a business, remunerations and incentives for the personnel labor, etc.

The difference from the western practice of managing the activities of industrial enterprises and corporations is that, as of today, to manage production companies in our country, we may use not one, but several organizational-and-economy ideologies (and sometimes a symbiosis of the two) given below. Among those, the classical ideology of doing business as per the Western model clearly stands out. Many Russian production companies and event major holdings have formed their management systems in full agreement with the classical recommendations of the western management. It is a different matter, that this does not always produce good results. An ideology that is still practiced by some Russian industrial enterprises (which may be characterized as authoritarian) implies the preservation of the principles and methods of the Soviet-era command and administration system in the system of an enterprise management (such a system still survives at some industrial enterprises, which did not perform serious production modernization, and are using outdated logistics and other methods of administration originating from the USSR of second half of the past century).

Nevertheless, the using of authoritarian approaches, methods of administration, means and methods of doing business at certain industrial enterprises allows to ensure relative stability of their operation. This becomes possible due to the following logic of the administration activity. In the cases when an authoritarian organizational-and-economy ideology is adopted for managing of an industrial enterprise, the efficient company management should not be performed by several leaders, even if they are vested with approximately equal authority. If orders are given by different management centers, they might contradict each other, and lead to misunderstanding and confusion. Within the authoritarian mana-

gement system, an industrial enterprise can have only one leader – a top manager who should hold the authority to make decisions on any issue of the company management at his/her sole discretion, and without any procedures on obtaining approval with this or that collegial body (board of directors, etc.), even if the enterprise's management structure features one. In case of an authoritarian management leaders of industrial enterprises have no need for any so-called “teams of fellow-thinkers”.

The “teams of fellow-thinkers”, heading enterprises and corporations, along with collegial bodies, might indeed be useful for managing western companies and corporations, but essentially are of no use for Russian production companies (even if these are managed as per the Western-model classical ideology of doing business), since those do not facilitate the elaboration of managerial decisions but rather hinder the formation of the latter.

If on the West, a team is a group of people working to improve a company's operation, in many other corporations (including Russian ones) such a “team” is nothing but a group of individuals, striving for personal gain at the expense of an enterprise and basically facilitating its collapse and bankruptcy. After all, the “team” members far from always pursue interests of the company as a whole, for the most part they are guided by their own interests and personal profit. “Teams” may be useful only in such organizational structures as, for instance, political parties, election campaign headquarters, and the like, which are created in the process of preparing to different kinds of elections. In these cases, those allow to produce new moves, means and a system of steps in the course of election campaigns.

Heads of industrial enterprises and corporations in the context of modern conditions in Russia should be fulfilling the following with regards to the management process:

- fixing all the strings of strategic and operational management of a company on him-/herself, its top leader should be in possession of complete and quality information on all the processes happening there. Meanwhile, s/he should be absolutely sure that no information is kept back by this or that subordinate employee. For all the cases of withholding the information on the business status at the subdivisions, the heads of these subdivisions should be subject to severe punishment, up to and including termination of employment. In this context, an enterprise should create such a procedure of providing data to the company leaders which would make it totally unacceptable to corrupt information on the current state of affairs. Without regular inspections, a company leader should not blindly believe the data being reported to him/her by the heads of the enterprise productions on an on-going, and especially, on an emergency basis;

- company's striving to achieve good results in strategic and tactical management is, first and foremost, related to ensuring total control, which the top leader should have over the financial flows, resources, documents, information databases, stock reserves, sales system, external relations, and more. This control should be in the hands of namely the company's top manager, and not in those of any of his/her deputies or other highly placed officials in the company's structure, since the “blurring” of the management, and consequently, of the responsibility, can significantly decrease the resulting quality of administration.

Thus, the authoritarian management system in a company is structured in such a way that only its head or top manager could made decisions at his/her sole discretion. And namely this person bears the responsibility for everything that is happening at the enterprise, while the management structure should be maximally convenient to ensure sole leadership.

It is worth reminding that the modern literature, touching upon the methodological aspects of managing enterprises and organizations, features a thesis stating that in the structure of a company, the functions of its departments, production subdivisions and other offices should not overlap or duplicate each other. However, the analysis of management practices at industrial enterprises in many cases shows a different thing – it is no good when the functions of an industrial enterprise's deputy heads, supervisors of workshops and other subdivisions do not overlap in any way at all. It is not only impossible, but is impractical as well. Otherwise, the company's top manager will be receiving information from all the subdivisions which is difficult to consolidate, and will not be able to see the true state of affairs at the enterprise, but what is more important, s/he will not be able to get a quality information grasp of the situation based on which s/he must make managerial decisions [22, 25, 29].

Company managers should also be realizing that in real practice there are extremely few enterprises at which the heads of line units, along with the majority of supervisors over the main and auxiliary productions, are not interested in stagnation of the procedures and rules at the workplaces and look forward

to changes in the company, its modernization and so on, feeling wary the new procedures might be more severe than the old ones, and their positions will go downhill. For quite many enterprises it is characteristic that the production workers fight for excessive norms of consumption of materials, electric energy, etc.

Today, the use of either classical, or authoritarian ideology of doing business does not allow production companies to ensure solving of the new tasks set before our country's industry with regard to creating breakthrough technologies within the frameworks of the new industrial revolution in Russia. As the most adequate to the modern conditions of doing business in our country, one may suggest a modernized organizational-and-economy ideology of managing enterprises and corporations. It orients a company's collective towards taking into consideration the influence of global social-and-economical processes, the forming international business environment and market dynamics, and the specifics and peculiarities of doing business in Russia [22].

2. Forming the strategy and tactics of managing production companies and corporations in modern conditions

When forming the strategy of their prospective development, as well as the tactics of achieving that and the operational management of company activity, certain industrial enterprises, big production corporations or holdings are naturally guided by the experience they have gained over the years of reforms in Russia. However, the conditions of doing business, which have changed in the several recent years, in a certain way cancel out this experience, possibly making it not quite suitable for development of such strategies (as well as of algorithms of managing current activity of industrial enterprises) in the currently unfolding uncertainty situations, both with regard to the issues of making forecasts on market development, competitors' behavior, etc., and to determining the complex of steps on company activity planning and management.

Given below are the relevant ideas and algorithms on strategic and operational management of company activity, elaborated based on many-years' scientific research by authors, and on practices of managing big industrial enterprises, which can help their main shareholders and heads organize efficient company operation.

In modern, very complicated, conditions of doing business, the successful management of the activities of industrial enterprises and corporations should be based on the fact that their heads are realizing that today they must not consider the managerial algorithms within any production structure apart from one another, that is, for this or that field of company activity. It is possible to ensure the efficient management at industrial enterprises and corporations provided the managerial, information, production, financial-and-economic, and all other technologies, including logistics, marketing research, etc. are only considered as interrelated and from the point of view of achieving the goals set before companies and the criteria of efficiency of reaching those. Only with such approach it becomes possible to ensure well-balanced company development, based on creating relevant advantages while fighting against competitors.

It is worth noting that, currently, the horizon of strategic planning for industrial enterprises has shrunk to very short time periods. In this context, industrial enterprises need to use such local management models, which would allow to achieve most acceptable results in the practical preparation to forming of managerial decisions.

It would be reasonable to form the strategy of managing big Russian industrial enterprises and production corporations, which are functioning in the context of growing international political, economical and financial instability and different sanctions, in the following way:

1. In compliance with the wishes of the main shareholders of a company, the strategic priorities, goals and tasks of its development are determined. In the course of this work, the main shareholders of the company along with its leadership come up with their vision of the company's future (if necessary, it is possible to differentiate the short-term, medium-term and long-term prospects). Meanwhile, it is important to represent the complex of different changes at all the company departments, workshops, warehouses, transport and other infrastructure elements, and in all the fields of activity. This work results in dynamic development of the logistics of the industrial enterprise, modernization of the technology park of the main and auxiliary productions, application of new industrial technologies (within the current and future technological setup), as well as improvement of the existing one or creation of a new integrated information-and-analytical system of preparation to making managerial decisions at the enterprise. There should be a place for changes related to the quality of the manufactured products, using of

the available resources of raw materials, as well as the sales markets' dynamics, etc. Thus, the basic foundation is formed for the managerial paradigm of the industrial enterprise's development.

2. In the process of work on creating an integral managerial paradigm of the company development it is also necessary to perform the analysis of the customary operational, tactical and strategic approaches, methods and models of company management, and reveal the bottlenecks decreasing the efficiency of operation in various fields. Based on this, new methods, models and technologies are created, which allow to improve the managerial algorithms and formulate relevant tasks on improving the system of support for making decisions on managing different fields of activity and company subdivisions. Within the frameworks of the chosen ideology of doing business, all of that should facilitate the growth of the operation efficiency at industrial enterprises and corporations.

The strategies of developing of an industrial enterprise or corporation can be formed based on several scenarios. The criteria of choosing the most acceptable scenario of company development may include the following ones:

- possibility of the best use of a company's competitive advantages;
- availability of a staff of most qualified specialists for successful strategy fulfillment;
- availability of all types of resources within the scenario under consideration;
- minimization of capital investments and expenses on developing the enterprise's material base, etc.

Thus, the choice the company development strategy should be based on the comparison of the technical-and-economical substantiations for the elaborated scenarios.

In the process of working out the development strategy for an industrial enterprise or organization it is possible to use the advanced innovations in the field of organizational management by V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences [7, 8, 34]. Among the most efficient developments on operational and strategic management at industrial enterprises and corporations, which give significant practical results, it would be reasonable to use the methodologies of operational and strategic management for industrial companies, which have proven their practical value, and which were created by the authors of this monography [18, 21, 22, 25, 28, 29, 31].

Within the mentioned methodologies, it is possible to use a number of the following mathematical models:

- integral assessment of the activity of an industrial enterprise [22, 29];
- managing the material resources of the industrial enterprise, while supporting its economical and ecological priorities [27, 29];
- optimization of cargo delivery from the manufacturers of raw materials [28, 29];
- development of the industrial enterprise on new territories [28, 29];
- improving the efficiency of managing the human resources at enterprises through perfecting the systems of labor remunerations and incentives for workers [28, 29];
- forming the production plan of goods manufacture [29];
- planning the preventive maintenance of the main production assets of the industrial enterprise [29], etc.

It would be reasonable to perform the process of current or operational management at an industrial enterprise using the model developed by the authors as part of the forecast-adaptive approach, the detailed description of which is given in [18, 19, 22, 29, 31].

3. To successfully fulfill paragraphs 1 and 2, the company structure should be brought into compliance with the changed conditions of doing business, and if necessary, it should undergo reformation. The structure that is being formed must, in the best way possible, meet the requirements of efficient enterprise management within the whole vertical administration. In such a structure, all the excessive managerial links must be eliminated, so that any orders and commands given by the leadership could reach the end executors (without unnecessary intermediaries) as quickly as possible. Meanwhile, the main managerial functions of the company's structural subdivisions must organizationally ensure the fulfillment of the enterprise's priority goals and tasks. Then again, reducing the excessive managerial links in the enterprise's management structure provides for additional saving on the financial resources.

As the research studies by the authors have shown, the structural scheme of management at an industrial enterprise should not be built on the basis of linear or divisional approaches. The matrix-divisional structure schemes are also inefficient for this purpose. In [25] a profound consideration is

given to the advantages and disadvantages of different schemes of management at enterprises and corporations.

4. The company's main shareholders and leadership should timely analyze the operation indicators for the enterprise as a whole, and for all of its subdivisions.

In the process of analyzing the enterprise's production-and-economy activity indicators it is very important to reveal their compliance or non-compliance with the current trend of the company's development. If the mentioned dynamics of the technical-and-economical indicators of the enterprise's development does not comply with the intentions and plans of the main shareholders and leadership, it would be necessary to correct the whole set of the relevant strategic imperatives of the enterprise's development. Such correction will allow to steer towards the positive dynamics of the technical-and-economical indicators of the company's development, long-term.

In this context, the development of the system of logistics, project management, as well as the assessment of the adequacy of the production and all other technologies used at the enterprise must comply with all the modern competition requirements and the necessity to transit to new technology setups. All of that should be fulfilled in a coordinated fashion, and on the basis of a complex technical-and-economical substantiation. Meanwhile, it is necessary to be taking into account the fact that the process of technical upgrade at industrial enterprises is a cost-demanding measure. The main shareholders and leadership of industrial enterprises must be absolutely sure that the transition to a new technology setup will be beneficial for the enterprise, and that customers will prefer more quality products (but at a higher price) to usual (but cheaper) products.

Creation of new projects of this kind should be guided by the assessment of the capacities available at the enterprise, its technological equipment, etc.

In the context of decline of productions around the world and the proprietors' lacking significant financial resources for the transition of enterprises to state-of-the-art industrial technologies, or in case a company's main shareholders are confident that the transit to such technologies will allow to achieve good results and undeniable advantages to fight competitors, it would be reasonable to make decision on taking time to wait before making such a transition, so that it could be performed only provided it is economically feasible and the risks are acceptable. The project management at the enterprise can be successfully fulfilled using modern methodologies, for instance such as those represented in [29].

5. The leader (top manager) of the industrial enterprise or corporation must suggest to and mandatorily obtain approval from its main shareholders for the system of preparing and making basic managerial decisions on the development of the company, as well as of the operational management of its functioning. Such work cannot be performed efficiently without a developed information-and-analytical system supporting the making of managerial decisions, which is part of the integrated information-computing system of the industrial enterprise or corporation. Meanwhile, the mathematical models and methods, used in the process of analyzing different indicators of the company activity and for other computations, must comply with the requirements of the analysts and other persons making managerial decisions at all the stages of preparation of these decisions. Therefore, the applicability of this or that model or method must be agreed upon with the persons making decisions.

Since any modern industrial enterprise or corporation today features a more or less developed set of information systems of various designation (accounting, economic, process automation, production management, warehousing facilities, stock reserves, and the like), which can function locally or within the integrated information-computing system of the company, it is crucial that the resulting indicators of functioning of these systems do not contradict each other and can be interconnected into a unified integral complex for managing the company activity. And the impossibility for the leadership of the company to receive non-contradictory information from its subdivisions, where such systems are installed, in many ways cancels out the use from operating those.

Heads of companies may face especially serious difficulties when elaborating their managerial decisions in case foreign ERPs and other information systems are used at an enterprise, since often those lack computation, analytical and other modules (for instance, modules of the flow of materials, semi-finished products and goods within the production workshops) required for the company's leadership. In such cases the enterprise has to order such modules, which are being created by Russian IT developers.

As a result, the elaboration of an efficient system of preparing the decision making in a company should be performed in coordination with the development of the enterprise's information-computing

infrastructure, creation of new or modernization of the available automated control systems, process control systems, computer-aided design systems, analytical and expert information systems, etc.

If a company does not create a modern information-computing infrastructure, which will be based on an automated system controlling all the enterprise's fields of activity and the processes of production-and-economy activity, and will be adequate to users' requirements and the level of business processes, it will be extremely difficult for such a company to sustain competition even on Russian markets, not speaking of the international ones.

We should also remember that in the current conditions of doing business in our country, the use of foreign equipment, computing machinery, as well as the software manufactured abroad, as part of the company's information-computing infrastructure does not give any guarantee that this equipment will not fail or stop functioning at all in case of deterioration of the political and military situation in the world. Successful development of the company's information-computing infrastructure and information-and-analytical systems of preparing the decision making is possible based on the methodological and technical developments presented in [18, 20, 22, 25, 28, 29].

6. The following should be fulfilled within the processes of creating the strategy of managing the industrial enterprise, as well as administration of its current activities [18, 22, 26, 29]:

- well-thought-out and non-contradicting division of functions, rights and obligations between and inside the subdivisions;
- forming an analytical forecast on the development of the competitive organizations, suppliers and consumers of the products, as well as the dynamics of various external environment factors influencing the enterprise;
- creating an efficient system of managing the human resources, selecting and appointing the personnel [18, 22, 29].

Conclusion

The foreign and Russian practices on management at enterprises and organizations, and scientific research on the strategic and tactical company management of the past years, by the present moment, have stopped providing a possibility for efficient management of company development. In the new conditions of doing business (growing political and economical instability, sanctions, etc.) there is a need for updated approaches, concepts or mechanisms of forming the development of industrial enterprises and corporations.

The complex of scientific provisions and the algorithm of forming the development strategy for production companies and corporations suggested in this article allow to take into account the existing drawbacks of many classical developments of the past and provide the owners and heads of big businesses with a mechanism of forming the corporate management strategy, that is adequate to modern conditions of economic activity and is oriented towards the needs of Russian entrepreneurs and managers.

References

1. Aaker D. *Strategic Market Management*. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2002. 544 p. (In Russ.)
2. Ackoff R.L. *Creating the Corporate Future*. Transl. from Engl. Moscow: Sirin; 2002. 255 p. (In Russ.)
3. Alekhina O.F., Voronov N.A., Udalov F.E. *Operativnoye i strategicheskogo upravleniye proizvodstvom na promyshlennykh predpriyatiyakh: monogr.* [Operational and Strategic Management of Production at Industrial Enterprises. Monography]. Nizhny Novgorod: Publ. house of Lovachevsky University; 2013. 295 p. (In Russ.)
4. Beer S. *Brain of the Firm*. Transl. from Engl. Moscow: Radio i svyaz; 1993. 408 p. (In Russ.)
5. Brazhnikov M.A., Safronov E.G., Melnikov M.A. et al. *Strategicheskiye prioritye mashinostroitel'nogo kompleksa: innovatsionnoye razvitiye predpriyatiy: monogr.* [Strategic Priorities of the Mechanical Engineering Complex: Innovative Development of Enterprises. Monography]. Moscow: Dashkov and C° Publishing and Trading Corporation; 2015. 212 p. (In Russ.)
6. Brykalov S.M., Yurlov F.F. *Strategicheskoye upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami atomnoy otrasli na osnove mnogourovnevnogo podkhoda: monogr.* [Strategic Management of the Nuclear In-

dustry Enterprises Based on the Multi-level Approach. Monography]. Moscow: Vash poligraficheskiy partnyor; 2014. 293 p. (In Russ.)

7. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A. *Vvedeniye v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Introduction into the Theory of Organization Systems Management]. Moscow: Librokom Book house; 2009. 264 p. (In Russ.)

8. Burkov V.N., Burkova I.V., Gubko M.V. *Mekhanizmy upravleniya: Upravleniye organizatsiyey: planirovaniye, organizatsiya, stimulirovaniye, kontrol'* [Management Mechanisms: Organization Management: Planning, Organizing, Stimulating, Controlling: Teaching Guide]. Moscow: Lenand; 2013. 216 p. (In Russ.)

9. Chudayev A.V. *Sovershenstvovaniye metodologii strategicheskogo upravleniya promyshlennym predpriyatiyem na osnove innovatsionno-orentirovannoy sistemy sbalansirovannykh pokazateley: monogr.* [Improving the Methodology of Strategic Management at an Industrial Enterprise Based on Innovatively-oriented System of Balanced Indicators. Monography]. Moscow: Paleotip; 2007. 268 p. (In Russ.)

10. *Classics of Management*. Edit. by M. Warner. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2001. 1168 p. (In Russ.)

11. Gaughan Patrick A. *Mergers, Acquisitions, and Corporate Restructurings*. Transl. from Engl. Moscow: Alpina Business Books; 2004. 741 p. (In Russ.)

12. Glazyev S.Yu. *Razvitiye rossiyskoy ekonomiki v usloviyakh global'nykh tekhnologicheskikh sdvigov: nauch. dokl.* [Development of Russian Economics in the Context of Global Technology Shifts. Scientific Report]. Moscow: NIR; 2007. 134 p. (In Russ.)

13. Hanke J.E., Wichern D.W., Reitsch A.G. *Business Forecasting*. Transl. from Engl. Moscow: Vilyams Publishing House; 2003. 656 p. (In Russ.)

14. Irikov V.A. *Strategicheskoye upravleniye dlya innovatsionnogo predpriyatiya: ucheb. posobiye* [Strategic Management for an Innovative Enterprise. Teaching Guide]. Moscow: MFTI (MIPT); 2016. 106 p. (In Russ.)

15. Kaplan Robert S., Norton David P. *Balanced System of Indicators. From Strategy to Action*. Transl. from Engl. Moscow: ZAO Olimp-Biznes; 2003. 304 p. (In Russ.)

16. Kondrat'yev N.D., Yakovets Yu.V., Abalkin L.I. *Bol'shiye tsikly kon'yunktury i teoriya predvideniya: izbrannyye trudy* [Big Cycles of Conjuncture and Anticipation Theory: Selected Works]. Moscow: Ekonomika, 2002; 767 p. (In Russ.)

17. Koritskiy E.B., Nintsiyeva G.V., Shetov V.Kh. *Nauchnyy menedzhment: rossiyskaya istoriya* [Scientific Management: Russian History]. St. Petersburg: Piter; 1999. 384 p. (In Russ.)

18. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. et al. *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations*. Kazakhstan, Kostanay: KSU, 2014. 230 p.

19. Korennaya, K.A., Hollay A.V., Loginovskiy O.V. Models of Managing Industrial Enterprises under an Unstable Environment and Technological Re-equipment. *Control Sciences*. 2021;(4):34–40. DOI: 10.25728/cs.2021.4.4

20. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Integrirovannyye informatsionnyye sistemy promyshlennykh predpriyatiy: monogr.* [Integrated Information Systems of Industrial Enterprises. Monography]. Chelyabinsk: South Ural State University; 2012. 314 p. (In Russ.)

21. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. [Information and Resource Support of Management at Industrial Enterprises Based on Forecast-adaptive Approach]. *Information Resources of Russia*. 2012;(2):16–20. (In Russ.)

22. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami v usloviyakh global'noy nestabil'nosti: monogr.* [Management at Industrial Enterprises in the Context of Global Instability. Monography]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2013. 403 p. (In Russ.)

23. Kokh R. *Strategiya. Kak sozdavat' i ispol'zovat' effektivnyuyu strategiyu* [Strategy. How to Create and Use Efficient Strategy]. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2003. 320 p. (In Russ.)

24. Loginovskiy O.V., Bolodurina I.P. *Gosudarstvennoye upravleniye promyshlennost'yu v regionakh RF: nauch. izd.* [Governmental Management of Industry in the Russian Federation Regions: Sci. Publ.]. Moscow: Mashinostroeniye; 2003. 368 p. (In Russ.)

25. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Korporativnoye upravleniye: nauch. izd.* [Corporate Management: Sci. Publ.]. Vol. 2. Moscow: Mashinostroeniye; 2007. 624 p. (In Russ.)

26. Loginovskiy O.V. *Upravleniye i strategii* [Management and Strategies]. Orenburg: Orenburg St. Univ. Publ., Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2001. 704 p. (In Russ.)
27. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Khaldin K.S. Managing material resources of an industrial enterprise in modern world. *Dynamics of Complex Systems – XXI Century*. 2016;10(2):33–38. (In Russ.)
28. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennym predpriyatiyem: nauch. izd.* [Management at an Industrial Enterprise. Sci. Publ.]. Moscow: Mashinostroyeniye; 2006. 603 p. (In Russ.)
29. Loginovskiy O.V., Burkov V.N., Burkova I.V. et al. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monogr.* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems. Monography]. Moscow: Infra-M; 2018. 410 p. (In Russ.)
30. Lutz Robert A. *7 Laws of Chrysler*. Transl. from Engl. Moscow: Alpina Publisher; 2003. 284 p. (In Russ.)
31. Maksimov A.A., Korennaya K.A., Loginovskiy O.V. Adaptive Management of Industrial Corporation in the Face of Uncertainty (The Case of Ferroalloy Productions). *Problemy teorii i praktiki upravleniya*. 2012;(9–10):145–150. (In Russ.)
32. Masaaki Imai. *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. Transl. from Engl. Moscow: Alpina Business Books, 2004. 274 p. (In Russ.)
33. Mintzberg H., Ahlstrand B., Lampel J. *Strategy Safari*. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2002. 336 p. (In Russ.)
34. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of Organization Systems Management]. Moscow: Fiz.-mat. lit. Publ.; 2012. 604 p. (In Russ.)
35. Paklin N.B., Oreshkov V.I. *Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam* [Business Analytics: From Data to Knowledge]. St. Petersburg: Piter; 2013. 704 p. (In Russ.)
36. Pande P., Holpp L. *Six sigma?*. Transl. from Engl. Moscow: Alpina Business Books; 2004. 158 p. (In Russ.)
37. Rasiel Ethan M. *The McKinsey Way: Using the Techniques of the World's Top Strategic Consultants to Help You and Your Business*. Transl. from Engl. Moscow: Alpina Business Books; 2004. 194 p. (In Russ.)
38. Rice-Johnston W. *Tactical Management*. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2001. 672 p. (In Russ.)
39. Senge P. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Transl. from Engl. Moscow: ZAS Olipm-Biznes; 2003. 408 p. (In Russ.)
40. Scheer A.-W. *Business Process Modeling*. Transl. from Engl. Moscow: Vest'-MetaTekhnologiya, 2000. 205 p. (In Russ.)
41. Sheldrake J. *Management Theory: From Taylorism to Japanization*. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2001. 352 p. (In Russ.)
42. Thompson A.A., Strickland A.J. *Strategic Management: Concepts and Cases*. Transl. from Engl. Moscow: Vil'yams, 2007. 928 p. (In Russ.)
43. Vinokurov V.A. *Organizatsiya strategicheskogo upravleniya na predpriyatii* [Organization of Strategic Management at an Enterprise]. Moscow: Tsentr ekonomiki i marketinga; 2007. 160 p. (In Russ.)
44. Wissema H. *Basics of Strategic Management and Entrepreneurship*. Transl. from Engl. Moscow: Infra; 2008. 347 p. (In Russ.)
45. Womack James P. *Lean Manufacturing: How to Avoid Losses and Achieve Prosperity for Your Company*. Transl. from Engl. Moscow: Alpina Business Books; 2004. 473 p. (In Russ.)

Список литературы

1. Аакер Д. Стратегическое рыночное управление: научное издание: пер. с англ. СПб.: Питер. 2002. 544 с.
2. Акофф Р.Л. Планирование будущего корпорации: пер. с англ. М.: Сирин. 2002. 255 с.
3. Алехина О.Ф., Воронов Н.А., Удалов Ф.Е. Оперативное и стратегическое управление производством на промышленных предприятиях: моногр. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2013. 295 с.
4. Бир С. Мозг фирмы: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
5. Стратегические приоритеты машиностроительного комплекса: инновационное развитие предприятий: моногр. / М.А. Бражников, Е.Г. Сафронов, М.А. Мельников и др. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2015. 212 с.

6. Брыкалов С.М., Юрлов Ф.Ф. Стратегическое управление промышленными предприятиями атомной отрасли на основе многоуровневого подхода: моногр. М.: Ваш полиграфический партнер, 2014. 293 с.
7. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами: науч. изд. М.: Кн. дом «Либроком», 2009. 264 с.
8. Механизмы управления: Управление организацией: планирование, организация, стимулирование, контроль / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, М.В. Губко, Д.А. Новиков М.: Ленанд, 2013. 216 с.
9. Чудаев А.В. Совершенствование методологии стратегического управления промышленным предприятием на основе инновационно-ориентированной системы сбалансированных показателей: моногр. М.: Палеотип, 2007. 268 с.
10. Классики менеджмента: пер. с англ. / под ред. М. Уорнера. СПб.: Питер, 2001. 1168 с.
11. Гохан Патрик А. Слияния, поглощения и реструктуризация компаний: пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 741 с.
12. Глазьев С.Ю. Развитие российской экономики в условиях глобальных технологических сдвигов: науч. докл. М.: НИР, 2007. 134 с.
13. Ханк Д.Э., Уичерн Д.У., Райтс А.Дж. Бизнес-прогнозирование: пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. 656 с.
14. Ириков В.А. Стратегическое управление для инновационного предприятия: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2016. 106 с.
15. Каплан Роберт С., Нортон Дейвид П. Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию: пер. с англ. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2003. 304 с.
16. Кондратьев Н.Д., Яковец Ю.В., Абалкин Л.И. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения: избранные труды. М.: Экономика, 2002. 767 с.
17. Корицкий Э.Б., Нинциева Г.В., Шетов В.Х. Научный менеджмент: российская история. СПб.: Питер, 1999. 384 с.
18. Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations / К.А. Korennaya, O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.V. Zimin. Kostanay: KSU, 2014. 230 p.
19. Korennaya K.A., Hollay A.V., Loginovskiy O.V. Models of Managing Industrial Enterprises under an Unstable Environment and Technological Re-equipment // Control Sciences. 2021. No. 4. P. 34–40. DOI: 10.25728/cs.2021.4.4
20. Коренная К.А., Логиновский О.В., Максимов А.А. Интегрированные информационные системы промышленных предприятий: моногр. Челябинск: ЮУрГУ, 2012. 314 с.
21. Коренная К.А., Логиновский О.В., Максимов А.А. Информационно-ресурсное обеспечение управления промышленными предприятиями на основе прогнозно-адаптивного подхода // Информационные ресурсы России. 2012. № 2. С. 16–20.
22. Управление промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности: моногр. / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов и др. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. 403 с.
23. Кох Р. Стратегия. Как создавать и использовать эффективную стратегию: пер. с англ. СПб.: Питер, 2003. 320 с.
24. Логиновский О.В., Болодурина И. Государственное управление промышленностью в регионах РФ: науч. изд. М.: Машиностроение, 2003. 368 с.
25. Логиновский О.В., Максимов А.А. Корпоративное управление: науч. изд. М.: Машиностроение, 2007. Т. 2. 624 с.
26. Логиновский О.В. Управление и стратегии. Оренбург: Изд-во Оренбург. гос. ун-та; Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. 704 с.
27. Логиновский О.В., Максимов А.А., Халдин К.С. Управление материальными ресурсами промышленного предприятия в современных условиях // Динамика сложных систем – XXI век. 2016. Т. 10, № 2. С. 33–38.
28. Логиновский О.В., Максимов А.А. Управление промышленным предприятием: науч. изд. М.: Машиностроение, 2006. Т. 1. 603 с.
29. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, В.Н. Бурков, И.В. Буркова и др. М.: Инфра-М, 2018. 410 с.
30. Лутц Роберт А. 7 законов Крайслера: пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2003. 284 с.

31. Максимов А.А., Коренная К.А., Логиновский О.В. Адаптивное управление промышленной корпорацией в условиях неопределенности (на примере ферросплавных производств) // Проблемы теории и практики управления. 2012. № 9–10. С.145–150.
32. Масааки Имаи. Кайдзен: ключ к успеху японских компаний: пер. с англ. М.: Альпина-Бизнес Букс, 2004. 274 с.
33. Минцберг Г., Альстрэнд Б, Лэмпел Дж. Школы стратегий: пер. с англ. СПб.: Питер, 2002. 336 с.
34. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. 604 с.
35. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. СПб.: Питер, 2013. 704 с.
36. Панде П., Холп Л. Что такое «Шесть сигм»? : пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 158 с.
37. Расиел Итан М. Метод McKinsey: Использование техник ведущих стратегических консультантов для решения ваших личных задач и задач вашего бизнеса: пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 194 с.
38. Райс-Джонстон У. Тактический менеджмент: пер. с англ. СПб.: Питер, 2001. 672 с.
39. Сенге П. Пятая дисциплина: искусство и практика самообучающейся организации: пер. с англ. М.: ЗАС «Олимп-Бизнес», 2003. 408 с.
40. Шеер А.-В. Моделирование бизнес-процессов: пер. с англ. М.: Весть-МетаТехнология, 2000. 205 с.
41. Шелдрейк Дж. Теория менеджмента: от тейлоризма до японизации: пер. с англ. СПб.: Питер, 2001. 352 с.
42. Томпсон А.А., Стрикленд А.Дж. Стратегический менеджмент: концепции и ситуации для анализа: пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 928 с.
43. Винокуров В.А. Организация стратегического управления на предприятии. М.: Центр экономики и маркетинга, 2007. 160 с.
44. Виссема Х. Основы стратегического менеджмента и предпринимательства: пер. с англ. М.: Инфра, 2008. 347 с.
45. Вумек Джеймс. П. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании: пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2004. 473 с.

Information about the authors

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

Aleksandr L. Shestakov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; admin@susu.ru.

Kristina A. Korennaya, Cand. Sci. (Eng.), General Director, Kuznetsk Ferroalloys, Novokuznetsk, Russia; kkris221@mail.ru.

Информация об авторах

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

Шестаков Александр Леонидович, д-р техн. наук, проф., ректор, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; admin@susu.ru.

Коренная Кристина Александровна, канд. техн. наук, генеральный директор, Кузнецкие ферросплавы, Новокузнецк, Россия; kkris221@mail.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted 12.03.2022

Статья поступила в редакцию 12.03.2022

DEVELOPMENT OF A DECISION SUPPORT SYSTEM OF CITY'S SOCIAL INFRASTRUCTURE ACCESSIBILITY BASED ON GIS-TECHNOLOGIES

A.O. Tashkin^{1,2}, anozer_sky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8231-8703>
A.V. Hollay¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² ANO "Public Initiatives Center "MIR", Khanty-Mansiysk, Russia

Abstract. There are three main problems of interaction people with limited mobility with social infrastructure facilities (SIF): the first is physical, the second is the inaccessibility of information about the SIF, and the third is social. The accessibility of SIF and information about it can be ensured through use electronic maps of urban areas and SIF (digital city). These circumstances determine the relevance of the development and creation of a geoinformation support system for decision support in the field of social infrastructure accessibility for people with limited mobility. An original approach to the development and creation of technology to meet the needs for obtaining formalized spatial data, as a social tool for geographic orientation, an information and reference system for supporting decision-making in the field of social development is proposed. **The purpose of the study** is to develop a system for managing and monitoring the city's social infrastructure facilities. **Materials and methods.** The conceptual model of the system was developed using GIS technologies and the theory of formal concept analysis (FCA). The online version is implemented using PHP, JavaScript. **Results.** The paper presents a methodology for implementing a decision support system. An Internet version of the system has been implemented. The system functionality and interface were tested with the involvement focus groups of people, interested in using the development. **Conclusion.** A system for managing and monitoring city's social infrastructure facilities has been developed and implemented. The work is useful in the field of municipal management of social infrastructure, as well as for people with disabilities and researchers.

Keywords: DSS, GIS, management, support, decision-making, map, accessibility, territory, LMGP, SIF, geoinformation, system

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation as part of a scientific project No. 22-11-20031.

For citation: Tashkin A.O., Hollay A.V. Development of a decision support system of city's social infrastructure accessibility based on GIS-technologies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):122–131. DOI: 10.14529/ctcr220211

Научная статья
УДК 519.816
DOI: 10.14529/ctcr220211

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ДОСТУПНОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

A.O. Tashkin^{1,2}, anozer_sky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8231-8703>
A.B. Голлай¹, alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² АНО «Центр общественных инициатив «МИР», Ханты-Мансийск, Россия

Аннотация. Существуют три основные проблемы взаимодействия маломобильных групп населения (МГН) с объектами социальной инфраструктуры (ОСИ): первая – физическая, вторая заключается в недоступности информации об ОСИ, а третья – социальная. Данная категория граждан

ограниченна в перемещении и испытывает трудности при взаимодействии с социальной инфраструктурой: в первую очередь, это лица с ограниченными возможностями (инвалиды), составляющие более 15 % населения мира, а также лица, перемещающиеся, например, с багажом или коляской. В мире уделяется значительное внимание формированию безбарьерной среды и улучшению качества жизни МГН, реализуются федеральные законы и целевые программы, направленные на управление процессом обеспечения доступности ОСИ для МГН. Доступность ОСИ и информации о них может быть обеспечена за счет использования электронных карт городских территорий и ОСИ (цифровой город). Указанные обстоятельства обуславливают актуальность разработки и создания геоинформационной системы поддержки принятия решений в сфере обеспечения доступности социальной инфраструктуры цифрового города. Предложен оригинальный подход к разработке и созданию технологии удовлетворения потребностей в получении формализованных пространственных данных, в качестве социального инструмента географического ориентирования, информационно-справочной системы поддержки принятия решений в области социального развития. **Целью исследования** является разработка системы управления и мониторинга объектов социальной инфраструктуры города. **Материалы и методы.** Концептуальная модель системы разработана с использованием ГИС-технологий и теории анализа формальных понятий (АФП). Онлайн-версия реализована с использованием PHP, JavaScript. **Результаты.** В работе представлена методика реализации системы поддержки принятия решений. Реализована интернет-версия системы. Функционал и интерфейс системы протестирован с привлечением фокус-групп, заинтересованных в использовании разработки. **Заключение.** Разработана и реализована система управления и мониторинга объектов социальной инфраструктуры города. Работа полезна в сфере муниципального управления социальной инфраструктурой, а также для людей с ограниченными возможностями и научных работников.

Ключевые слова: СППР, ГИС, управление, поддержка, принятие решений, карта, доступность, территория, МГН, ОСИ, геоинформационная, система

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-11-20031.

Для цитирования: Tashkin A.O., Hollay A.V. Development of a decision support system of city's social infrastructure accessibility based on GIS-technologies // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 122–131. DOI: 10.14529/ctcr220211

Introduction

A significant part of modern society is made up of low-mobility groups of the population (LMGP), these are people with disabilities as well as people moving, for example, with luggage or a stroller. Researchers identify three main problems of the interaction LMGP with social infrastructure: the first is related to the physical barriers of social infrastructure facilities (SIF), the second is the inaccessibility of information about SIF, and the third includes a number of social problems caused by the attitude towards LMGP within society [1]. Information support for the issue of SIF accessibility for LMGP can be increased through the use of urban areas and the SIF electronic maps (digital city) [2]. The problem of developing and improving methods for obtaining and processing information about objects of the social infrastructure of a digital city to ensure the availability of LMGP requires systematization and development of an approach in terms of processing geospatial and socio-economic data [3].

In Russia, for the purpose and execution of laws and state programs, public authorities are taking measures to disclose information regarding the physical accessibility of the SIF in order to increase the awareness of citizens, as well as the passportization of SIF and the introduction of standards to simplify the provision and use of information. To manage this process, tools and systems for managing such information are needed, which justifies the need to develop a decision support system (DSS) in the field of territorial administration. One of the most important problems for the developers of such systems is the problem of technical implementation due to the heterogeneity and weak structure of the initial data, which is one of the main areas of research in this work [4, 5]. At the moment, information portals operate in many municipalities of Russia, the tasks of which include meeting the information needs in the field of SIF accessibility for LMGP. However, often such resources do not have data analysis tools and solve a limited set of problems. The paper describes the tools for expanding the possibilities of analyzing socially-oriented data in order to obtain formalized information about SIF accessibility level.

Methods

Often there are tasks related to the analysis of attributive data, for example, information about the area, length, number and other parameters of objects in the information space. The paper uses a combined approach to the process of processing and combining unstructured disparate data, which implements various algorithms, methods and approaches, thanks to which an original method was obtained for solving the problem of information support in the field of SIF accessibility for LMGP. The main idea of the proposed decision support method is to solve two main tasks:

1. Consideration and search of social infrastructure objects on the map and sorting by accessibility levels and other parameters. This problem is solved by means of GIS and spatial analysis.
2. The study of structured arrays of attributive, spatial and socio-economic data regarding the accessibility of the SIF. The problem is solved with the help of mathematical methods and algorithms for processing semantic and numerical data.

The initial data for providing information support in the field of SIF accessibility for LMGP have different nature and forms of presentation. The legally established requirements for the accessibility of BSI, maps and city plans, as well as arrays of spatial and attributive data of the existing system of urban social infrastructure form the parameters of models for presenting and structuring data. The scheme of the decision-making process is shown in Fig. 1. Arrays of spatial objects of areal, linear, point information are used to build models for presenting accessibility data using city plans and maps, as well as models for structuring socially-oriented data using the accessibility requirements of SIF [6].

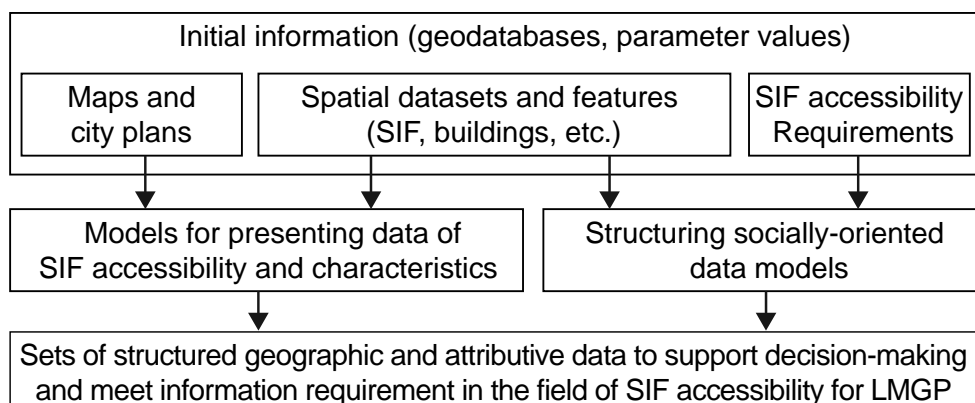


Fig. 1. Decision making process diagram

The processes of information provision, processing and analysis of data aimed at supporting decision-making in the field of managing the SIF accessibility for LMGP are laborious and require a long processing time due to the large volume, and are also difficult to identify and compare due to receipt from several sources, which leads to errors and incorrect management decisions.

The presence of a decision support system will reduce time and labour costs, reduce uncertainty and increase the speed of the decision-making process due to the implementation of the possibility of storing and processing a large amount of socio-economic spatial data about the SIF. Fig. 2 shows the decision-making process in the area of managing SIF accessibility.

Providing federal and municipal authorities with decision support systems is one of the key tasks in the transition to a digital economy. Large volumes of semi-structured arrays of socio-economic data, their diverse structure and fragmentation make them impossible for manual processing and making reasonable management decisions of social processes. In this way, DSS are aimed at improving the efficiency of decisions and it is customary to use them as the main tool for developing effective management decisions in the field of public administration.

The qualitative difference and peculiarity of the proposed method of spatial analysis lies in the unified representation of SIF, their characteristics, properties and attributives in the form of geoinformation objects and structured arrays of attributive, semantic socially oriented data.

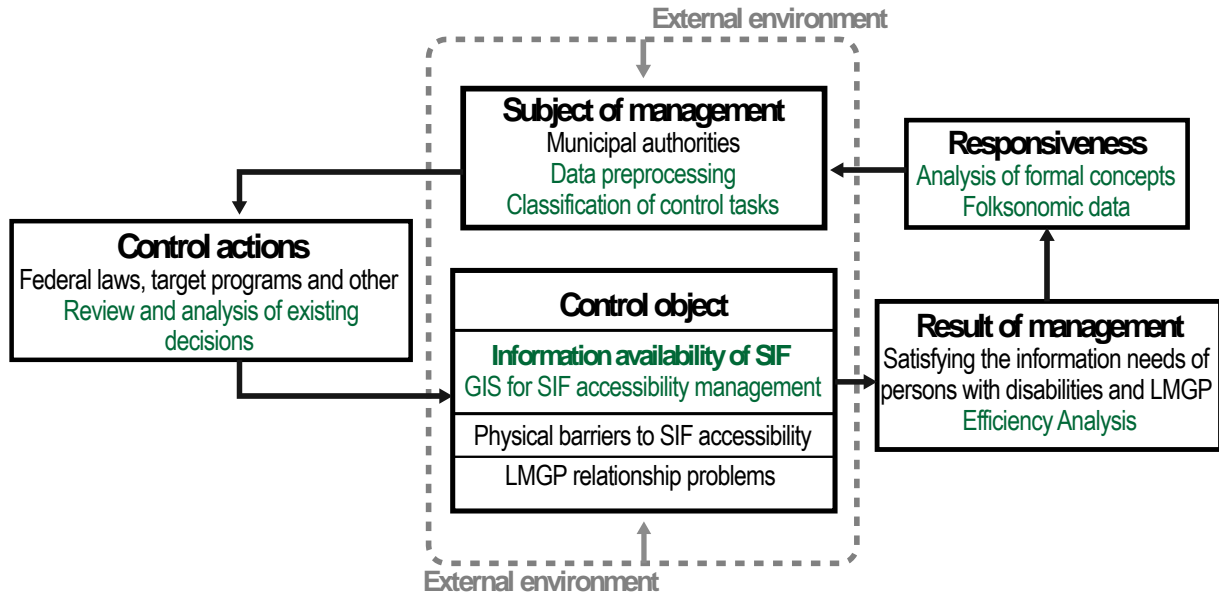


Fig. 2. Scheme of SIF accessibility management control

For the analysis and structuring of socio-economic data, the object-attribute representation is not enough. Methods are needed that take into account the folksonomic data structure, usually consisting of three arrays: $O = \{o_i\}_{i=1}^I$ – array of objects; $P = \{p_j\}_{j=1}^J$ – array of attributives of objects; $U = \{u_n\}_{n=1}^N$ – array of GIS users generating arrays of objects and attributives. Such data structures can be organized using the theory of formal concept analysis (FCA) [2, 7]. The tasks of classifying spatial objects in the digital environment, as well as the structuring of socio-economic data from LMGP, organized according to the principle of folksonomy, are considered to be one of the key tasks for ensuring decision-making in the field of ensuring SIF accessibility for LMGP [3, 8].

The development of mathematical models for structuring data of decision support systems is due to the need to improve the quality of information retrieval, processing and presentation of results. Often, methods are used aimed at building an ontology of the information space of a decision support system. Ontology is a knowledge model that can be used to describe the semantics of IS objects. Based on various definitions, ontology is a logical theory that uses the capabilities of a formal language to represent a domain model in the form of a network hierarchical structure of concepts and relationships between them. The ontology can be represented as follows:

$ON = \langle C, R, L, P_C, P_{LC}, P_{LR} \rangle$, where

$C = \{c_1, \dots, c_m\}$ – array of concepts in the ontology;

$R = \{r_1, \dots, r_m\}$ – array of binary relations $r_i(c_x, c_y)$ between concepts;

$L = \{l_1, \dots, l_m\}$ – array of lexical labels (ontology dictionary).

As a result of the analysis of socially oriented Internet services, it was revealed that the data structure of such services can be interpreted in the form of the arrays mentioned above, which have the following properties:

array of objects $O = \{o_i\}_{i=1}^I$;

array of objects attributives $P = \{p_j\}_{j=1}^J$;

array of users $U = \{u_n\}_{n=1}^N$;

the first two array O, P are generated by the third array U $O, P, U = \{o_i, p_j, u_n\}_{i=1, j=1, n=1}^{I, J, N}$.

Approaches to the classification of such data structures are commonly called folksonomy. The main problem of folksonomy is the problem of the lack of interconnectedness of data. The solution to this problem can be achieved by combining the folksonomic and taxonomic approaches to data classification, for which the key characteristics of objects and attributives of the information space were determined and a system of relationships between them was implemented. For the first time, a combined classification system was proposed, namely, the main classification table was supplemented with tables of typical values formed during the classification by the folksonomic approach [9].

One of the possible means of extracting ontological concepts and their hierarchies is the theory of formal concept analysis (FCA) (F. Simiano and A. Hotho, 2005) [9, 10]. On the basis of data consisting of three arrays (folksonomic data), it is possible to build a lattice of formal concepts, extract concepts and ontology classes, hierarchical structuring, identify dependencies, and so on. FCA, as a method of replenishing knowledge bases, can be used to build ontologies of a subject area in the form of a sematic multidimensional network.

A method for organizing the ontology of the subject area is proposed by using the GIS for LMGP database of SIF. As before, $O = \{o_i\}_{i=1}^I$ is the array of SIF, $P = \{p_j\}_{j=1}^J$ is the array of attributives of the SIF, and to denote the relationship between them, we introduce the array $Y = \{\langle o_i, p_j \rangle\}_{i=1, j=1}^{IJ}$, which contains information about which array of attributives each object from the array of SIF is endowed with, $Y \subseteq O \times P$, relation $\langle o_i, p_j \rangle$ means that object o_i has attribute p_j . The formal context can be expressed as $\mathbb{K} = (O, P, Y)$ and represented as a binary matrix (Table 1).

Table 1
Binary matrix of objects of their attributes

	p_1	p_2	p_3	...	p_j
o_1	1	1	0	...	1
o_2	0	1	1	...	0
o_3	1	1	1	...	1
...	1
o_i	1	0	1	1	1

Based on two arrays (objects and their attributes) and a known binary relation between them, using Galois operators, one can obtain formal concepts. For arbitrary $A \subseteq P$ and $B \subseteq O$ the Galois operators are defined:

$$A' = \{p \in P \mid \forall o \in A: (o Y p)\};$$

$$B' = \{o \in O \mid \forall p \in B: (o Y p)\}.$$

A' is the array of attributives that all objects represented in array A . B' is the array of attributives that all objects represented in array B . The formal concept (A, B) includes the array of objects $A \subseteq O$ and the array of attributes $B \subseteq P$ satisfying the condition $B' = A$ and $A' = B$. A is the volume of a formal concept, which includes a array of objects endowed with certain attributives of the array B . B is the content of a formal concept, which includes a array of attributives, one or more objects of the array A .

In Fig. 3, the arrays of objects and attributives, as well as the areas of formal concepts, marked with a stroke, are graphically represented as planes. It is customary to visualize the formed lattices of formal concepts using Hasse diagrams, which are a graph covering the relation “to be a more general concept” (Fig. 4). Each lattice vertex is a formal concept [3, 7, 11].

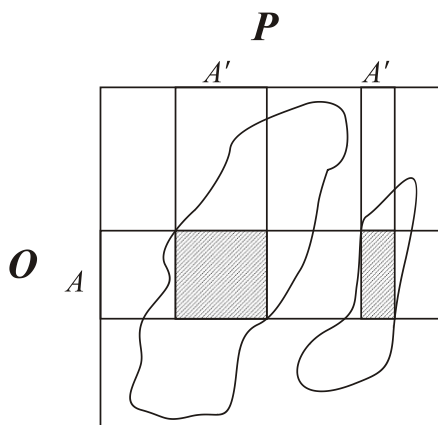


Fig. 3. Areas of Formal Concepts

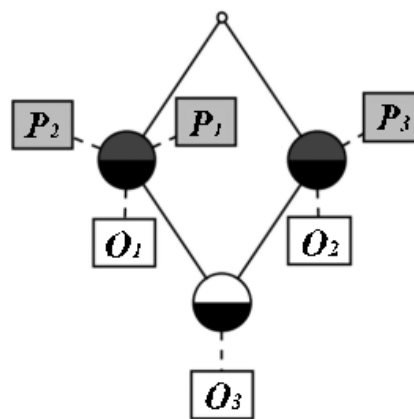


Fig. 4. Formal concept lattice

Results

Let us consider the construction of a lattice of formal concepts using the example of SIF array and its attributives of a GIS, aimed at meeting the information needs of the LMGP (Table 2).

A special case of a binary matrix (SIF and their attributives)

Table 2

No.	<i>O</i> – array of objects <i>P</i> – array of attributives	<i>p</i> ₁ Building	<i>p</i> ₂ Road	<i>p</i> ₃ Social	<i>p</i> ₄ Residential	<i>p</i> ₅ Accessible for LMGP
<i>o</i> ₁	District Hospital	1	0	1	0	1
<i>o</i> ₂	UGRASU	1	0	1	0	1
<i>o</i> ₃	Shopping center “Gostiny Dvor”	1	0	1	0	0
<i>o</i> ₄	Mira street	0	1	1	0	1
<i>o</i> ₅	Mira st., 100	1	0	1	1	0
<i>o</i> ₆	Traffic light Krasnoarmeiskaya st. / Chekhov st.	0	1	1	0	1
<i>o</i> ₇	Kalinina st., 26	1	0	0	1	1

As a result of the accumulation of a sufficient base of social infrastructure objects and their attributives, it is possible to build a graph using Hasse diagrams to visualize lattices of formal concepts (Fig. 5).

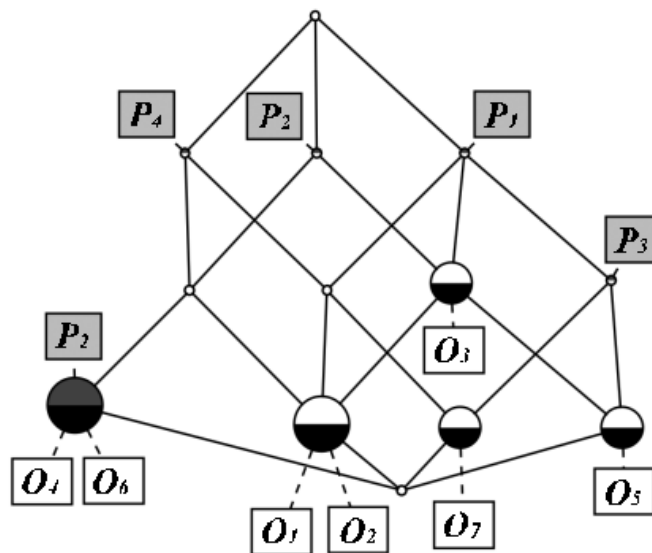


Fig. 5. A special case of a Formal concept lattice (SIF and their attributives)

Formal concepts formed as a result of graph construction are nodes with the largest number of connections. With regard to the case under consideration of SIF and their attributives can assign the formal concepts names as follows [12]:

- (*o*₃) – Not accessible SIF for LMGP;
- (*o*₁, *o*₂) – Accessible SIF for LMGP;
- (*o*₅) – residential buildings not accessible for LMGP;
- (*o*₇) – residential buildings accessible for LMGP;
- (*o*₄, *o*₆) – places accessible for LMGP.

The result of method application is maps with highlighted areas, reflecting the accessibility level of SIF and a detailed SIF description, containing the base parameters of objects [9, 11].

Regarding the software and hardware implementation, due to the social orientation of the system, a client-server architecture was chosen. The modularity of the software implementation is provided by PHP tools, the client application is an object wrapper over a relational database [13, 14]. The decomposition of the system architecture can be represented as five main components [15, 16] (Fig. 6):

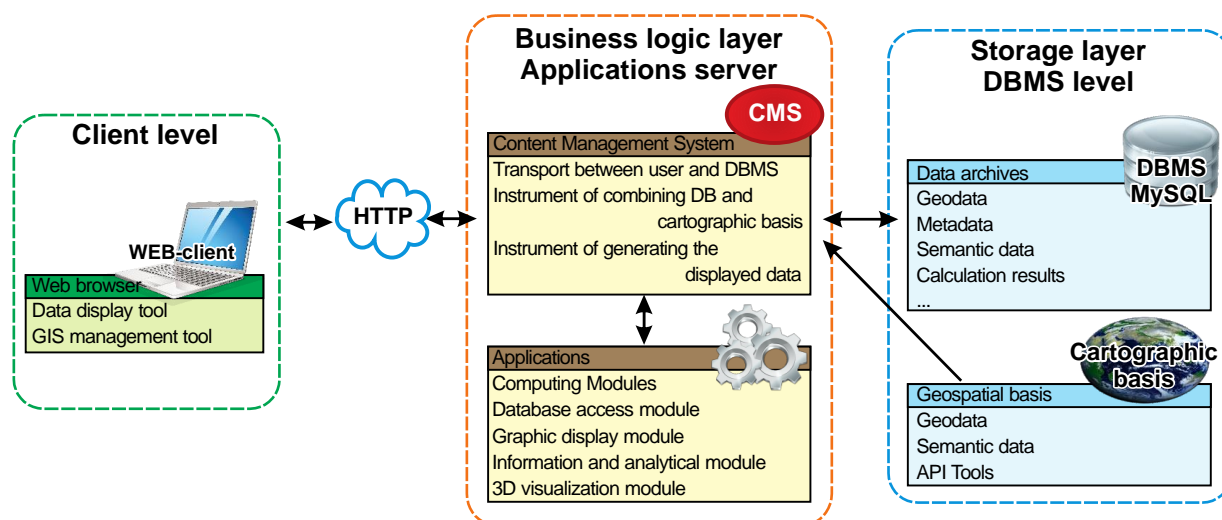


Fig. 6. System architecture

1. DB. Structured archives of spatially-referenced cartographic and semantic data, provided with appropriate metadata, stored in the database.

2. Cartographic basis. A geospatial field responsible for the interactive presentation of cartographic data using API services.

3. CMS. Content management system (platform for publishing Internet sites), which implements the application logic, communication with API mapping services and provides work with the data warehouse.

4. Applications. A set of software modules implemented in PHP.

5. Web Client. Graphical user interface implemented as a Web application (Internet resource).

The study regarding the implementation of GIS for LMGP is designed as an Internet resource at geowheel.ru (Fig. 7).

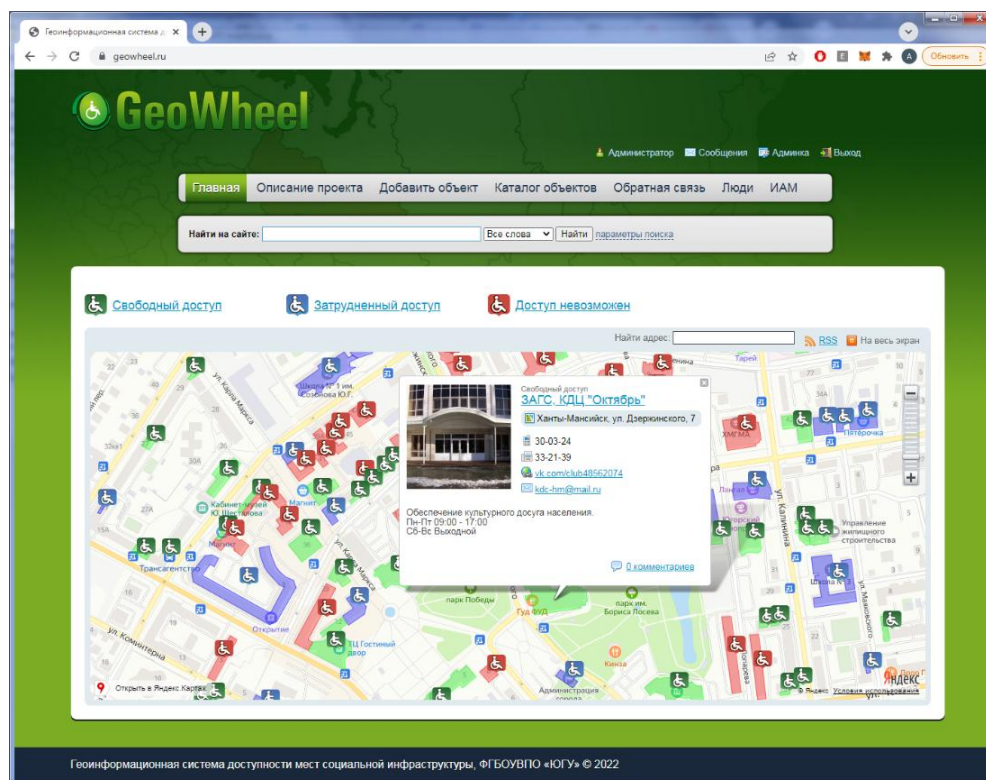


Fig. 7. Screenshot of the created system

Discussions and Conclusions

A new method of automatic analysis and folksonomic data extraction using formal concepts analysis theory, aimed at supporting the decision-making process, has been proposed and tested. A model for the folksonomic data classification based on the FCA theory has been developed, that is provides information support process for decision-making in the field of ensuring SIF accessibility for LMGP.

A decision support system has been created that implements the developed models and methods to support the decision-making process in the field of SIF accessibility managing state for LMGP. A software and hardware complex based on geoinformation technologies has been implemented, that makes possible to accumulate, systematize, and effectively use folksonomic data to support managing process of SIF accessibility for LMGP and research tasks.

The system is used by LMGP as a tool for spatial orientation, as well as by municipal authorities to make managerial decisions regarding informational provision and physical accessibility of social infrastructure facilities. In particular, it has been introduced into the work of wheelchair users regional public organisation "Preobrazovanie" and to the Khanty-Mansiysk branch of the Federal Autonomous Organisation "Main State expertise of Russia" as a decision support system in the field of SIF accessibility for LMGP.

References

1. Tashkin A.O., Semenov S.P. Methodology for the development of a geographic information system for people with limited mobility. *Modern Problems of Science and Education*. 2014;(1). Available at: <http://www.science-education.ru/115-12206> (accessed 05.10.2021). (In Russ)
2. Semenov S.P., Tashkin A.O. [Interactive geographic information system for people with limited mobility]. In: *Collection of scientific articles of the international conference "Lomonosov readings in Altai: fundamental problems of science and education"*. Barnaul: Altai University; 2015. P. 1007–1010. (In Russ)
3. Semenov S.P., Slavsky V.V., Tashkin A.O. The analysis of the information resources directed on satisfaction in information needs of physically disabled people. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2016;14(1):83–102. (In Russ)
4. Bulygin Yu.E. *Organization of social management (basic concepts and categories)*. Reference dictionary. Ed. Prof. I.G. Bezuglov. Moscow: Kontur; 2002. 234 p. (In Russ)
5. Vdovin V.M., Surkova L.E., Valentinov V.A. *Systems theory and systems analysis: textbook*. Moscow: Dashkov i K; 2010. 640 p. (In Russ)
6. Rakesh Kumar Sharma, Durga Prasad Sharma. Review of spatial decision support systems in resource management. *Review of Business and Technology Research*. 2012;6(1):167–174.
7. Belkacem L., Hadda D., Akakba A. Gis-based multicriteria spatial decision support system model to handle health facilities resources. Case of crisis management in Batna, Algeria. *Geographia Technica*. 2020;15(1):173–186. DOI: 10.21163/GT_2020.151.16
8. Sultani R.M., Soliman A.M., Al-Hagla K.S. The Use of Geographic Information System (GIS) Based Spatial Decision Support System (SDSS) in Developing the Urban Planning Process. *APJ, Architecture & Planning Journal*. 2009;20:97–115.
9. Cimiano P., Hotho A., Staab S. Learning Concept Hierarchies from Text Corpora using Formal Concept Analysis. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2005;24:305–339. DOI: 10.1613/jair.1648
10. Cimiano P. *Ontology Learning and Population from Text: Algorithms, Evaluation and Applications*. Springer, New York; 2006. 312 p. DOI: 10.1007/978-0-387-39252-3
11. Semenov S.P., Slavsky V.V., Tashkin A.O. [Mathematical model of a socially oriented geoinformation system for people with limited mobility]. In: *International conference "Mathematics and information technologies in the oil and gas complex" dedicated to the birthday of the great Russian mathematician, academician P.L. Chebysheva: Abstracts*. Surgut: Scientific Center of SurGU; 2016. P. 146–149. (In Russ)
12. Semenov S.P., Slavskiy V.V., Tashkin A.O., Tyakunov A.S. Mathematical model of social infrastructure based on the theory of formal concept analysis (FCA). *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*. ISSN: 2321-0869 (O) 2454-4698 (P). 2017;8(1):1–3.
13. Arampatzis G., Kiranoudis C.T., Scaloubacas P., Assimacopoulos D. A GIS-based decision support system for planning urban transportation policies. *European Journal of Operational Research*. 2004;152:465–475. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00037-7

14. Tashkin A.O., Semenov S.P., Slavsky V.V. [Socially-oriented geoinformation systems, models and methods of implementation]. In: *Geoinformation technologies in solving problems of rational nature management: Proceedings of the III All-Russian scientific-practical conference of "URIT"*. Khanty-Mansiysk; 2017. P. 62–68. (In Russ)
15. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [The theory of management of organizational systems]. 3rd ed. Moscow: Publishing house of physical and mathematical literature; 2012. 604 p. (In Russ)
16. Xia J., Lin L., Lin J., Nehal L. Development of a GIS-Based Decision Support System for Diagnosis of River System Health and Restoration. *Water*. 2014;6:3136–3151. DOI: 10.3390/w6103136

Список литературы

1. Ташкин А.О., Семенов С.П. Методика разработки геоинформационной системы для маломобильных граждан // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 1. URL: <http://www.science-education.ru/115-12206>.
2. Семенов С.П., Ташкин А.О. Интерактивная геоинформационная система для маломобильных граждан // *Сборник научных статей международной конференции «Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования»*. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2015. С. 1007–1010.
3. Семенов С.П., Славский В.В., Ташкин А.О. Анализ информационных ресурсов, направленных на удовлетворение информационных потребностей людей с ограниченными возможностями // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2016. Т. 14, № 1. С. 83–102.
4. Булыгин Ю.Е. Организация социального управления (основные понятия и категории): слов.-справ. / под общ. ред. проф. И.Г. Безуглова. М.: Контур, 1999. 254 с.
5. Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ: учеб. М.: ИТК «Дашков и К», 2010. 640 с.
6. Rakesh Kumar Sharma, Durga Prasad Sharma. Review of spatial decision support systems in resource management // *Review of Business and Technology Research*. 2012. Vol. 6, no. 1. P. 167–174.
7. Belkacem L., Hadda D., Akakba A. Gis-based multicriteria spatial decision support system model to handle health facilities resources. Case of crisis management in Batna, Algeria // *Geographia Technica*. 2020. Vol. 15, iss. 1. P. 173–186. DOI: 10.21163/GT_2020.151.16
8. Sultani R.M., Soliman A.M., Al-Hagla K.S. The Use of Geographic Information System (GIS) Based Spatial Decision Support System (SDSS) in Developing the Urban Planning Process // *APJ, Architecture & Planning Journal*. 2009. Vol. 20. P. 97–115.
9. Cimiano P., Hotho A., Staab S. Learning Concept Hierarchies from Text Corpora using Formal Concept Analysis // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2005. Vol. 24. P. 305–339. DOI: 10.1613/jair.1648
10. Cimiano P. *Ontology Learning and Population from Text: Algorithms, Evaluation and Applications*. Springer, New York, 2006. 312 p. DOI: 10.1007/978-0-387-39252-3
11. Семенов С.П., Славский В.В., Ташкин А.О. Математическая модель социально-ориентированной геоинформационной системы для маломобильных групп населения // *Международная конференция «Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе», посвящённой дню рождения великого русского математика академика П.Л. Чебышёва: тез. докл.* Сургут: ИЦ СурГУ, 2016. С. 146–149.
12. Mathematical model of social infrastructure based on the theory of formal concept analysis (FCA) / S.P. Semenov, V.V. Slavskiy, A.O. Tashkin, A.S. Tyakunov // *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*. ISSN: 2321-0869 (O) 2454-4698 (P). 2017. Vol. 8, no. 1. P. 1–3.
13. A GIS-based decision support system for planning urban transportation policies / G. Arampatzis, C.T. Kiranoudis, P. Scaloubacas, D. Assimacopoulos // *European Journal of Operational Research*. 2004. Vol. 152. P. 465–475. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00037-7
14. Ташкин А.О., Семенов С.П., Славский В.В. Социально-ориентированные геоинформационные системы, модели и методы реализации // *Геоинформационные технологии в решении задач рационального природопользования: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции АУ «ЮНИИИТ»*. Ханты-Мансийск, 2017. С. 62–68.

15. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. 3-е изд. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. 604 с.

16. Development of a GIS-Based Decision Support System for Diagnosis of River System Health and Restoration / J. Xia, L. Lin, J. Lin, L. Nehal // Water. 2014. Vol. 6. P. 3136–3151. DOI: 10.3390/w6103136

Информация об авторах

Artem O. Tashkin, applicant for the degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; general director, ANO “Public Initiatives Center “MIR”, Khanty-Mansiysk, Russia; anozer_sky@mail.ru.

Aleksandr V. Hollay, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; alexander@hollay.ru.

Information about the authors

Ташкин Артём Олегович, соискатель степени канд. техн. наук при кафедре информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; генеральный директор, АНО «Центр общественных инициатив «МИР», Ханты-Мансийск, Россия; anozer_sky@mail.ru.

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; alexander@hollay.ru.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted 22.02.2022

Статья поступила в редакцию 22.02.2022

КОНЦЕПЦИЯ ТРЕХФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ЖКХ

Т.А. Аверина, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

Ю.С. Лаврова, yulya_vrn08@mail.ru

В.Н. Мельничук, elena-h@mail.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В настоящее время значение индекса развития информационно-коммуникационных технологий в России увеличивается с каждым годом, но пока еще значительно отстает от значений мировых лидеров. Специфика отечественного опыта цифровой трансформации всех сфер экономики свидетельствует о том, что основные изменения чаще осуществляются по отдельным векторам, а не комплексно. Это является определенной проблемой для развития цифровой экосистемы отрасли – сложной системы взаимосвязанных между собой объектов, конкурирующих на единой цифровой платформе и предназначенных для решения конкретных задач, поставленных под отраслевые потребности. И рассматривать ее следует не только на уровне государственной поддержки, но и на уровне объединения сил государства с наукой и частным бизнесом. Для этого необходимо создание стимулирующих факторов с целью привлечения инвестиций, что особенно актуально в отрасли жилищно-коммунального хозяйства. **Целью данного исследования** является анализ факторов, составляющих архитектуру цифровой экосистемы ЖКХ, а также оценка их взаимного влияния друг на друга. В работе были применены **методы** анализа и синтеза, экономико-статистический и сравнительный методы, а также математическое моделирование. Авторы анализировали актуальные зарубежные и отечественные научные публикации по теме исследования, электронные сборники аналитико-исследовательских центров, официальные статистические отчеты государственных органов. **В качестве результатов** приводится описание трехфакторной модели цифровой экосистемы ЖКХ, состоящей из показателей эффективности цифровых сервисов, компетентностных характеристик человеческих ресурсов и набора функциональных цифровых сервисов для ЖКХ. **Заключение.** Рассматривая цифровую экосистему ЖКХ в комплексе трех взаимосвязанных факторов, можно повысить качество принятия управленческих решений в вопросах модернизации цифрового управления ЖКХ. Более того, математически описывая зависимости факторов цифровой экосистемы, можно перейти на уровень определения конкретных пороговых значений, после достижения которых экосистема ЖКХ будет приобретать оптимальную конфигурацию элементов и более высокий цифровой потенциал.

Ключевые слова: цифровые сервисы, цифровые компетенции, цифровая экосистема, жилищно-коммунальное хозяйство

Для цитирования: Аверина Т.А., Лаврова Ю.С., Мельничук В.Н. Концепция трехфакторной модели цифровой экосистемы ЖКХ // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 132–140. DOI: 10.14529/ctcr220212

Original article
DOI: 10.14529/ctcr220212

THE CONCEPT OF A THREE-FACTOR MODEL OF THE DIGITAL ECOSYSTEM OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES

T.A. Averina, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

Yu.S. Lavrova, yulya_vrn08@mail.ru

V.N. Melnichuk, elena-h@mail.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Currently, the value of the information and communication technology development index in Russia is increasing every year, but it still lags far behind the values of world leaders. The specifics of the domestic experience of digital transformation of all spheres of the economy indicates that the main

changes are more often carried out in separate vectors, rather than in a complex. This is a definite problem for the development of the digital ecosystem of the industry – a complex system of interconnected objects competing on a single digital platform and designed to solve specific tasks set for industry needs. And it should be considered not only at the level of state support, but also at the level of combining the forces of the state with science and private business. To do this, it is necessary to create stimulating factors in order to attract investment, which is especially important in the housing and communal services sector. **The purpose of this study** is to analyze the factors that make up the architecture of the digital ecosystem of housing and communal services, as well as to assess their mutual influence on each other. **Methods** of analysis and synthesis, economic-statistical and comparative methods, as well as mathematical modeling were used in the work. The authors analyzed current foreign and domestic scientific publications on the research topic, electronic collections of analytical research centers, and official statistical reports of state bodies. **The results** are a description of a three-factor model of the digital ecosystem of housing and communal services, consisting of performance indicators of digital services, competence characteristics of human resources and a set of functional digital services for housing and communal services. **Conclusion.** Considering the digital ecosystem of housing and communal services in a complex of three interrelated factors, it is possible to improve the quality of managerial decision-making in matters of modernization of digital management of housing and communal services. Moreover, mathematically describing the dependencies of the factors of the digital ecosystem, it is possible to move to the level of determining specific thresholds, after reaching which, the housing and communal services ecosystem will acquire an optimal configuration of elements and a higher digital potential.

Keywords: digital services, digital competencies, digital ecosystem, housing and communal services

For citation: Averina T.A., Lavrova Yu.S., Melnichuk V.N. The concept of a three-factor model of the digital ecosystem of housing and communal services. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):132–140. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220212

Введение

Сегодня ключевым направлением развития отрасли является совершенствование управления ее цифровой экосистемой – сложной системой взаимосвязанных между собой объектов, конкурирующих на единой цифровой платформе и предназначенных для решения конкретных задач, поставленных под отраслевые потребности.

31 мая 2021 года на V Всероссийской конференции «Интернет вещей и цифровая трансформация жилищно-коммунального хозяйства – IoT в ЖКХ 2021» была подчеркнута особая актуальность вопроса развития цифровых сервисов на базе интернета вещей [1–3]. Это означает, что ключевым фактором развития цифровой экосистемы в настоящее время становится сеть физических объектов, которые имеют встроенные технологии, позволяющие осуществлять взаимодействие с внешней средой, передавать сведения о своем состоянии и принимать данные извне.

Целью данной работы является анализ факторов, в комплексе составляющих архитектуру цифровой экосистемы ЖКХ и их влияния друг на друга. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: дать четкие определения понятиям «цифровая экосистема» и «цифровые сервисы», выделить основные показатели эффективности цифровых сервисов, проанализировать роль компетентностных характеристик человеческих ресурсов в рамках цифровой экосистемы, рассмотреть влияние каждого набора элементов трехфакторной модели цифровой экосистемы друг на друга, а также проанализировать перспективные направления использования модели для дальнейшего исследования цифровой экосистемы.

Концепция трехфакторной цифровой экосистемы ЖКХ

Под единой цифровой экосистемой ЖКХ в данном исследовании подразумевается сложная система, состоящая:

1) из взаимосвязанных между собой цифровых сервисов, действующих в рамках единой цифровой платформы и предназначенных для решения конкретных пользовательских задач, вы-

полнение которых способствует как поддержанию и развитию всей экосистемы, так и удовлетворению конкретных запросов пользователей;

2) определенного набора компетентностных характеристик человеческих ресурсов – участников рынка жилищно-коммунальных услуг, способствующих поддержанию и развитию экосистемы, а также ее непрерывному совершенствованию;

3) системы показателей эффективности для определения актуальных проблем или имеющихся возможностей для работающих в экосистеме цифровых сервисов, позволяющей оперативно реагировать на внешние и внутренние изменения [4].

Схематично архитектура цифровой экосистемы приведена на рис. 1.



Рис. 1. Трехфакторная модель цифровой экосистемы ЖКХ
Fig. 1. Three-factor model of the digital ecosystem of housing and communal services

Перейдем к детальному рассмотрению каждого из факторов цифровой экосистемы и начнем с определения цифровых сервисов. Проанализируем существующие в научной литературе понятия по направлению от простого к сложному.

- Цифровые сервисы – это сайты, которые предоставляют всевозможные услуги онлайн [5].
- Цифровые сервисы – специальные программы, предназначенные для оперативного решения проблем и вопросов пользователя в режиме онлайн [6].
- Цифровые сервисы – это технические продукты, которые физически находятся в сети и предлагают пользователям определенные возможности интерактивного взаимодействия [7].
- Цифровые сервисы – полноценное программное обеспечение с широким функционалом, предназначенное для оперативного выполнения задач в любой нише и деятельности, понятное и прозрачное для вовлеченного пользователя [8].

Таким образом, на их основе можно сформулировать такое определение, которое наиболее точно и ёмко описывает объект исследования.

Цифровые сервисы – сложные цифровые системы с высоким потенциалом, представляющие собой сайты, специальные программы, технические продукты, а также полноценное ПО, физически находящиеся в сети и призванные закрыть актуальную потребность в получении определённых услуг у вовлечённых пользователей в любой точке, независимо от их местонахождения и времени обращения к сервису.

В табл. 1 приведен список функциональных цифровых сервисов для ЖКХ.

Говоря о цифровых сервисах для ЖКХ, важно отметить, что у многих компаний в данной отрасли есть интерес к мобильным приложениям, специфическим программным продуктам и другим технологиям искусственного интеллекта, способным принести значимый экономический эффект, однако в настоящее время пока большинство проектов находится на стадии пилота и только 14 % организаций в настоящий момент смогли масштабировать использование таких решений [9].

Для того чтобы их масштабировать, необходимо уделить особое внимание компетентностным характеристикам участников рынка жилищно-коммунальных услуг. Понимая, какие знания, умения и навыки на данном этапе требуются от человеческих ресурсов, можно вести работу в направлении совершенствования цифровой экосистемы.

Таблица 1

Функциональные цифровые сервисы для ЖКХ

Table 1

Functional digital services for housing and communal services

№ п/п	Название сервиса	Функционал
1	Сайт	Веб-страница, обычно созданная для взаимодействия с управляющими и ресурсоснабжающими организациями, ТСЖ, а также органами власти различных уровней
2	Мобильное приложение	Современная цифровая платформа для работы на смартфонах, предназначенная для управления многоквартирным домом, оплаты коммунальных услуг и передачи показаний, участия в общедомовых собраниях, а также для контроля за элементами системы «умный дом»
3	Чат-бот	Виртуальный текстовый помощник, как правило, размещенный в диалоговом окне стартовой страницы сайта или мобильного приложения, который при первом контакте выясняет потребности пользователей в виде переписки и помогает их качественно удовлетворить
4	Программное обеспечение	Множество программ, работающих на базе облачных технологий, призванных обеспечить управляющим или ресурсоснабжающим компаниям алгоритмы обработки больших объемов информации для произведения расчетов
5	Специфические программные продукты	Цифровые сервисы, разрабатываемые в индивидуальном порядке под конкретные запросы и процессы

Сегодня компетентностный подход является одним из перспективных направлений развития потенциала человеческих ресурсов. Особое значение применения такого подхода и определения конкретного набора компетенций участников цифровой экосистемы под конкретный этап ее развития подтверждается потребностями цифровой экономики и технологическими трендами [5, 6].

Под компетентностными характеристиками в данной работе понимается определенный набор знаний, умений и навыков, так или иначе связанных с использованием функциональных цифровых сервисов [10]. Предлагается объединить их в пять блоков – базу, личность, управление, культуру и безопасность.

Наглядно данный подход представлен на рис. 2.

Однако этих двух факторов – функциональных цифровых сервисов для ЖКХ и компетентностных характеристик человеческих ресурсов – для описания цифровой экосистемы ЖКХ недостаточно. Необходим показатель, который бы связывал их и выявлял эффективность работы цифровых сервисов в частности, а значит, и экосистемы в целом.

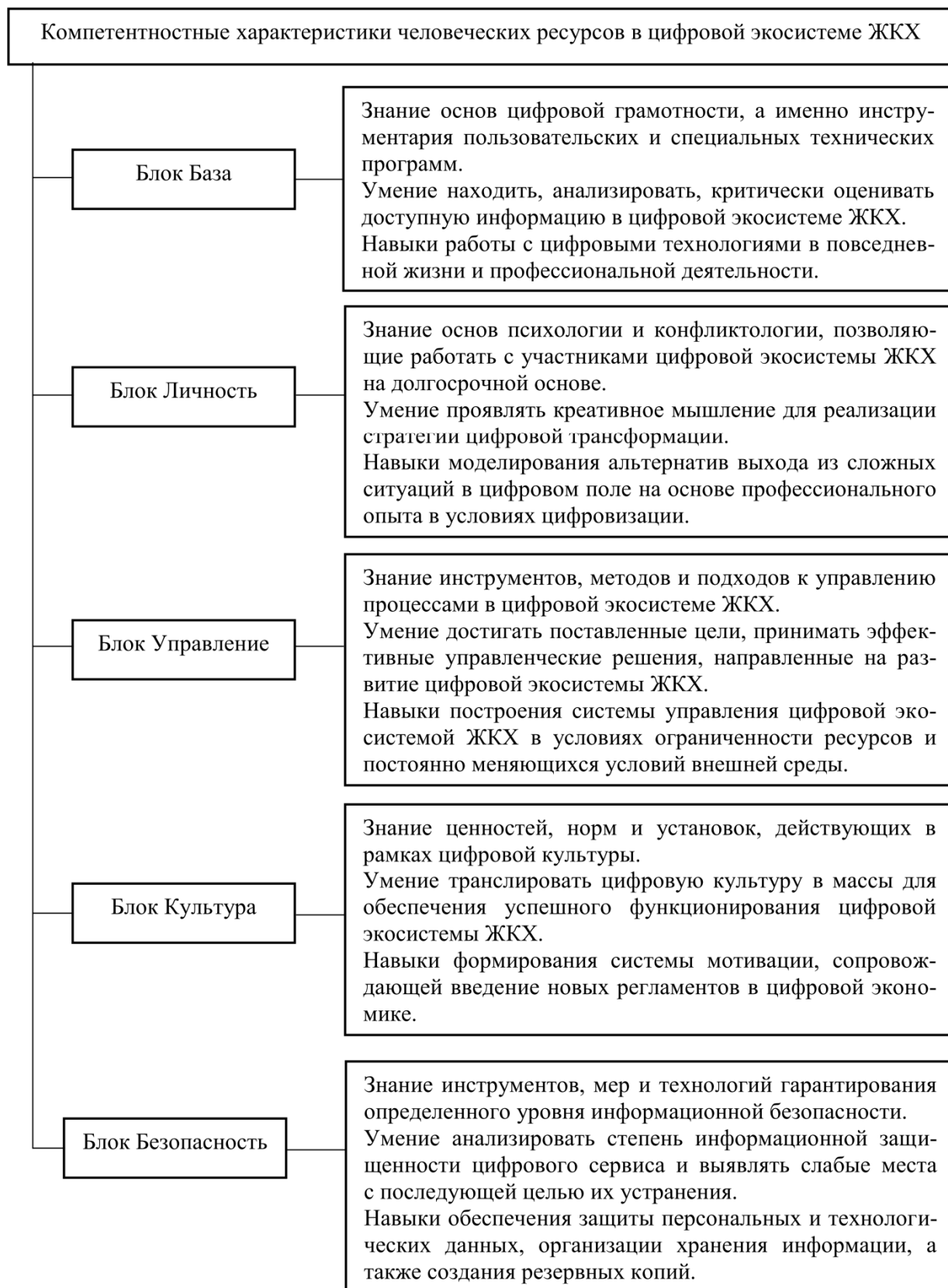


Рис. 2. Компетенции человеческих ресурсов в рамках цифровой экосистемы ЖКХ
Fig. 2. Competencies of human resources within the digital ecosystem of housing and communal services

Рассмотрим показатели эффективности цифровых сервисов, представленные в табл. 2 [11].

Основные показатели эффективности цифровых сервисов

Таблица 2

Key performance indicators of digital services

Table 2

№ п/п	Показатель	Характеристика и расчет показателя
1	Стоимость запуска функционального цифрового сервиса	Для определения оптимальной доли пользователей рассчитывается показатель путем деления затрат на продвижение на количество установивших приложение, посетивших сайт, использовавших онлайн-сервис
2	Уровень вовлеченности пользователей за месяц функционирования	Для определения полезности и интереса рассчитывается временной показатель путем деления количества ежедневных посещений на количество запусков цифрового продукта за месяц, умноженный на 100 %
3	Средняя продолжительность сессии	Для определения количества времени, проведенного пользователем на сервисе, рассчитывается показатель путем деления суммарной продолжительности сессий на их общее количество
4	Коэффициент удержания вовлеченных пользователей	Для определения процента вернувшихся на сервис повторно рассчитывается показатель путем деления количества вернувшихся пользователей на общее количество установивших приложение, посетивших сайт, использовавших онлайн-сервис, умноженный на 100 %
5	Коэффициент оттока вовлеченных пользователей	Для определения доли прекративших использовать функционал цифрового продукта рассчитывается показатель путем вычитания из 100 % значения коэффициента удержания
6	Средний доход с одного вовлеченного пользователя	Для определения успешности монетизации рассчитывается показатель путем деления выручки от приложения, сайта, онлайн-сервиса на количество запусков приложения, посетивших сайт, использовавших онлайн-сервис
7	Стоимость привлечения одного пользователя	Для определения эффективности вложений в продвижение рассчитывается показатель путем деления суммы расходов на рекламную кампанию на число привлеченных пользователей
8	Окупаемость рекламных вложений	Для определения рентабельности инвестиций в рекламу рассчитывается показатель путем деления доходов от рекламы на маркетинговые расходы, умноженный на 100 %

Производить расчет таких показателей можно самостоятельно, но удобнее и быстрее использовать специальные системы аналитики, такие как сервис от Яндекс – AppMetrica или сервис от Google – Firebase Analytics [12, 13].

Таким образом, детально рассмотрев элементы трехфакторной модели, предлагается описать зависимости между ними следующим образом [4, 14, 15].

Влияние набора компетенций человеческих ресурсов в цифровой экосистеме ЖКХ на показатели эффективности работы цифровых сервисов можно представить в виде

$$DSE = f(HC), \quad (1)$$

где DSE (digital services efficiency) – эффективность цифровых сервисов;

HC (human competencies) – компетентностные характеристики человеческих ресурсов.

Аналогично влияние создания и функционирования цифровых сервисов в цифровой экосистеме ЖКХ на формирование набора компетенций человеческих ресурсов можно представить в виде

$$HC = f(DS), \quad (2)$$

где HC (human competencies) – компетентностные характеристики человеческих ресурсов,

DS (digital services) – функциональные цифровые сервисы.

В перспективе, описывая зависимости факторов цифровой экосистемы таким образом, можно перейти на уровень определения конкретных пороговых значений, после достижения которых экосистема будет приобретать оптимальную конфигурацию элементов и более высокий цифровой потенциал.

Выводы

В данной работе были проанализированы основные проблемные зоны в определении набора факторов цифровой экосистемы ЖКХ, детально описаны их характеристики, приведена математическая интерпретация зависимости между этими факторами, а также обозначена перспектива дальнейшего использования трехфакторной модели цифровой экосистемы для установления пороговых значений.

Список литературы

1. Аверина Т.А., Лаврова Ю.С., Мышовская Л.П. Анализ возможностей цифровой трансформации управления жилищно-коммунальным хозяйством на примере онлайн-сервисов // Теория активных систем – 50 лет. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 290–297. DOI: 10.25728/tas.2019.50.3.1
2. Current Problems of Digitalization of Housing and Utilities Management in the Context of a Pandemic / S. Barkalov, T. Averina, E. Avdeeva, Y. Lavrova // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2020. P. 722–726. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280829
3. Основы цифровой грамотности для экономики будущего [Электронный ресурс]. URL: <https://nafi.ru/projects/sotsialnoe-razvitie/tsifrovaya-gramotnost-dlya-ekonomiki-budushchego/> (дата обращения: 29.03.2022).
4. Авдеева Е.А., Аверина Т.А., Лаврова Ю.С. Интерактивные карты как элемент цифровой инфраструктуры жилищно-коммунального хозяйства // Теория и практика экономики и предпринимательства. Труды XVIII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. Симферополь, 2021. С. 199–201.
5. Механизмы принятия решений в цифровой экономике / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, О.С. Перевалова, Т.А. Аверина // Тенденции развития интернет и цифровой экономики. Труды III Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. 2020. С. 12–16.
6. Попов Е.В., Симонова В.Л. Потенциал цифровизации экосистемы фирмы // Вопросы управления. 2022. № 1 (74). С. 34–46. DOI: 10.22394/2304-3369-2022-1-34-46
7. Рубрика: онлайн-сервисы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.inetgramotnost.ru/online-servisy> (дата обращения: 28.03.2022).
8. Портал малого и среднего предпринимательства [Электронный ресурс]. URL: <http://mbrk.ru/pages/onlainservisy/> (дата обращения: 28.03.2022).
9. Зараменских Е.П. Цифровые сервисы: их атрибуты и взаимосвязь с архитектурой предприятия // Вестник университета. 2018. № 10. С. 36–42. DOI: 10.26425/1816-4277-2018-10-36-42
10. Цифровой сервис: перспективный ориентир современного образования / И.Г. Павельев, В.Г. Минченко, Т.Н. Поддубная, Е.Л. Заднепровская // Компетентность. 2021. № 4. С. 5–9.
11. Доклад НИУ ВШЭ «Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты» [Электронный ресурс]. URL: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf> (дата обращения: 29.03.2022).
12. Можаяева Г.В., Александрова Л.Д., Пуляева В.Н. Цифровые компетенции в модели актуальных компетенций управленческих кадров // Гуманитарные науки. Вестник Финансового университета. 2020. Т. 10, № 6. С. 49–55. DOI: 10.26794/2226-7867-2020-10-6-49-55
13. Примеры использования системы аналитики AppMetrica [Электронный ресурс]. URL: <https://appmetrica.yandex.ru/docs/mobile-sdk-dg/conce> (дата обращения: 29.03.2022).
14. Критерии эффективности сайта [Электронный ресурс]. URL: <https://crystal-digital.ru/blog/kriterii-effektivnost> (дата обращения: 29.03.2022).
15. Ниворожкина Л.И., Арженовский С.В. Многомерные статистические методы в экономике. М.: ИНФРА-М, 2017. 203 с.

References

1. Averina T.A., Lavrova Yu.S., Myshovskaya L.P. [Analysis of the possibilities of digital transformation of housing and communal services management on the example of online services]. In: *Teoriya aktivnykh sistem – 50 let. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory of active systems – 50 years. Materials of the international scientific and practical conferences]; 2019. P. 290–297. (In Russ.) DOI: 10.25728/tas.2019.50.3.1
2. Barkalov S., Averina T., Avdeeva E., Lavrova Y. Current Problems of Digitalization of Housing and Utilities Management in the Context of a Pandemic. In: *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*; 2020. P. 722–726. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280829
3. *Osnovy tsifrovoy gramotnosti dlya ekonomiki budushchego* [Fundamentals of digital literacy for the economy of the future]. Available at: <https://nafi.ru/projects/sotsialnoe-razvitiye/tsifrovaya-gramotnost-dlya-ekonomiki-budushchego/> (accessed 29.03.2022). (In Russ.)
4. Avdeeva E.A., Averina T.A., Lavrova Yu.S. [Interactive maps as an element of the digital infrastructure of housing and communal services]. In: *Teoriya i praktika ekonomiki i predprinimatel'stva. Trudy XVIII Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of economics and entrepreneurship. Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]. Simferopol'; 2021. P. 199–201. (In Russ.)
5. Barkalov S.A., Burkov V.N., Perevalova O.S., Averina T.A. [Decision-making mechanisms in the digital economy]. *Tendentsii razvitiya internet i tsifrovoy ekonomiki. Trudy III Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiyem nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Trends in the development of the Internet and digital economy. Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation]; 2020. P. 12–16. (In Russ.)
6. Popov E.V., Simonova V.L. Potential of a company's ecosystem digitalization. *Management Issues*. 2022;1(74):34–46. (In Russ.) DOI: 10.22394/2304-3369-2022-1-34-46
7. *Rubrika: onlayn-servisy* [Heading: online services]. Available at: <https://www.inetgramotnost.ru/online-servisy> (accessed 28.03.2022) (In Russ.)
8. *Portal malogo i srednego predprinimatel'stva* [Portal of small and medium-sized enterprises]. Available at: <http://mbrk.ru/pages/onlaynservisy/> (accessed 28.03.2022). (In Russ.)
9. Zaramenskikh E.P. Digital services: their attributes and interconnection with the architecture of the enterprise. *Vestnik universiteta*. 2018;(10):36–42. (In Russ.) DOI: 10.26425/1816-4277-2018-10-36-42
10. Pavel'ev I.G., Minchenko V.G., Poddubnaya T.N., Zadneprovskaya E.L. Digital service: promising reference point of modern education. *Competency (Russia)*. 2021(4):5–9. (In Russ.)
11. *Doklad NIU VShE "Tsifrovaya transformatsiya otrasley: startovyye usloviya i priority"* [Report of the HSE "Digital Transformation of Industries: starting conditions and priorities"]. Available at: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf> (accessed 29.03.2022) (In Russ.)
12. Mozhaeva G.V., Alexandrova L.D., Pulyaeva V.N. [Digital competencies in the model of actual competencies of managerial personnel]. *Gumanitarnie nauki. Vestnik Finansovogo universiteta*. 2020;10(6):49–55. (In Russ.) DOI: 10.26794/2226-7867-2020-10-6-49-55
13. *Primery ispol'zovaniya sistemy analitiki AppMetrica* [Examples of using the AppMetrica analytics system]. Available at: <https://appmetrica.yandex.ru/docs/mobile-sdk-dg/conce> (accessed 29.03.2022). (In Russ.)
14. *Kriterii effektivnosti sayta* [Criteria for the effectiveness of the site]. Available at: <https://crystal-digital.ru/blog/kriterii-effektivnost> (accessed 29.03.2022) (In Russ.)
15. Nivorozhkina L.I., Arzhenovskiy S.V. *Mnogomernyye statisticheskiye metody v ekonomike* [Multidimensional statistical methods in economics]. Moscow: INFRA-M; 2017. 203 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ta_averina@mail.ru.

Лаврова Юлия Сергеевна, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; yulya_vrn08@mail.ru.

Мельничук Владимир Николаевич, аспирант кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; elena-h@mail.ru.

Information about the authors

Tatiana A. Averina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta_averina@mail.ru.

Yulia S. Lavrova, Postgraduate Student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; yulya_vrn08@mail.ru.

Vladimir N. Melnichuk, Postgraduate Student of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; elena-h@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 03.04.2022

The article was submitted 03.04.2022

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение

УДК 338.1

DOI: 10.14529/ctcr220213

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОРЫВЫ КАК ОСНОВОПОЛАГАЮЩИЙ ФАКТОР ГЛОБАЛЬНОЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

Е.А. Авдеева, avdeeva_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5736-6175>

Т.А. Аверина, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

Н.А. Балашова, butyrinanatalya@gmail.com

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Целью работы является исследование новых мировых тенденций промышленного развития и скорости реакции национальных правительств, компаний и работников на технологические изменения. В качестве методов исследования применены анализ и синтез текущих мировых тенденций, а также использованы специальные методы: проанализированы экспертные оценки международных организаций, проведены сравнительный и экономико-статистический анализ. В результате выделены отличительные черты Индустрии 5.0 – это сосуществование промышленности и новых социально-экологических тенденций и потребностей. Изменения неизбежны: зеленая энергия и устойчивые продукты изначально будут монопольным фактором и принесут преимущества инсайдерам. Подчеркнуто, что для достижения глобальной конкурентоспособности компаниям необходимо трансформировать устоявшиеся бизнес-модели и инвестировать в технологии и сетевые формы бизнеса с учетом социальных целей: помимо создания новых рабочих мест и обеспечения гибкой занятости речь идет о персонализации товаров и экологизации. Рассмотрены политические и экономические цели пятой промышленной революции, направления технологических инноваций. Подчеркивается, что техника, согласно новому подходу, должна служить людям и обществу, а это означает, что технология, используемая в производстве, адаптируется к потребностям и разнообразию работников отрасли. Лидирующими признаются искусственный интеллект, квантовая информация и полупроводники. Технологическая трансформация базируется на развитии следующих направлений: индивидуальные технологии взаимодействия человека и машины, биотехнологии и интеллектуальные материалы, искусственный интеллект, цифровые двойники, технологии передачи, хранения и анализа данных, а также энергоэффективности, возобновляемых источников энергии, хранения и автономности. Это экосистемно-ориентированная инновационная политика с гибкой ориентацией на результат. Отмечено, что технологическая трансформация поможет решить ряд уникальных общественных проблем. Она делает смелый акцент с отдельных технологий на системный подход, что позволяет отрасли достигать социальных целей помимо создания рабочих мест и роста, и ставит благополучие работников отрасли в центр производственного процесса. В заключении раскрыт техносциальный характер пятой революции с технологиями как инструментами и социальными потребностями в качестве конечной цели.

Ключевые слова: пятая промышленная революция, зелёная энергия, устойчивые продукты, глобальная конкурентоспособность, персонализация, экологизация

Для цитирования: Авдеева Е.А., Аверина Т.А., Балашова Н.А. Технологические прорывы как основополагающий фактор глобальной конкурентоспособности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 141–147. DOI: 10.14529/ctcr220213

TECHNOLOGICAL BREAKTHROUGHS AS A FUNDAMENTAL FACTOR IN GLOBAL COMPETITIVENESS

E.A. Avdeeva, avdeeva_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5736-6175>

T.A. Averina, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

N.A. Balashova, butyrinanatalya@gmail.com

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The research objective of the present article is to study new world trends in industrial development and the reaction speed of national governments, companies and workers to technological changes. As research methods, analysis and synthesis of current world trends were applied, as well as special methods were used: expert assessments of international organizations were analyzed, a comparative and economic-statistical analysis was carried out. As a result, the distinctive features of Industry 5.0 are highlighted – this is the coexistence of industry and new social and environmental trends and needs. Change is inevitable: green energy and sustainable products will initially be a monopoly factor and benefit insiders. It is emphasized that in order to achieve global competitiveness, companies need to transform established business models and invest in technology and network forms of business, taking into account social goals: in addition to creating new jobs and ensuring flexible employment, we are talking about personalization of goods and greening. The political and economic goals of the fifth industrial revolution and the direction of technological innovations are considered. It is emphasized that technology, according to the new approach, should serve people and society, which means that the technology used in production adapts to the needs and diversity of industry workers. The leaders are artificial intelligence, quantum information and semiconductors. Technological transformation is based on the development of the following areas: individual technologies for human-machine interaction, biotechnology and smart materials, artificial intelligence, digital twins, data transmission, storage and analysis technologies, as well as energy efficiency, renewable energy sources, storage and autonomy. It is an ecosystem-based innovation policy with a flexible focus on results. It is noted that technological transformation will help solve a number of unique social problems. It puts a bold focus from individual technologies to a system approach that allows the industry to achieve social goals beyond job creation and growth, and puts the well-being of industry workers at the center of the production process. In conclusion, the techno-social nature of the fifth revolution is revealed, with technology as tools and social needs as the ultimate goal.

Keywords: fifth industrial revolution, green energy, sustainable products, global competitiveness, personalization, greening

For citation: Avdeeva E.A., Averina T.A., Balashova N.A. Technological breakthroughs as a fundamental factor in global competitiveness. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):141–147. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220213

Введение

Участники Всемирного экономического форума в 2020 году акцентировали внимание на климатическом кризисе, отражающемся на экономике и финансах. Следует отметить, что в 2019 году больше компаний из списка Fortune 500 опубликовали обязательства по защите окружающей среды, чем за 2005–2015 годы вместе взятые [1]. С середины 2019 года количество поисковых запросов в Google по этой теме возросло в геометрической прогрессии, а глобальные демонстрации по защите окружающей среды стали одними из крупнейших протестов в истории. Инвесторы объявили, что они будут участвовать в проектах с высокой степенью устойчивости. Можно выделить и положительные моменты перестройки: 82 % опрошенных менеджеров считают, что инвестиции в защиту климата помогают справиться с последствиями коронакризиса; «зеленая экономика», в свою очередь, также предлагает большие возможности для экспорта, особенно для технологий обезуглероживания [2].

Методы

Методологическую основу исследования составляют общенаучные и специальные научные методы. К общим относятся индукция и дедукция, анализ и синтез текущих мировых тенденций.

Также были применены специальные методы: проанализированы экспертные оценки международных организаций, проведен сравнительный анализ и экономико-статистический анализ.

Результаты

Компьютеры и Интернет проникают во все аспекты человеческой жизни, изменение климата меняет наш мир. Мы можем назвать это 5-й промышленной революцией.

Технологии создания живых существ путем анализа генов и манипулирования ими становятся все проще и доступнее. Предполагается, что результатом пятой промышленной революции должно стать **решение глобальных проблем**. Она является результатом стратегического подхода, способом определения того, как будут сосуществовать промышленность и новые социальные тенденции и потребности [3]. Таким образом, Индустрия 5.0 *дополняет и расширяет* отличительные черты Индустрии 4.0

С точки зрения устойчивого развития бизнеса выделяются три модели поведения компаний.

1. «Преобразуйся или погибни»: бизнес-модели этих компаний находятся на перепутье. Компании должны вкладывать значительные средства в новые технологии и сети, чтобы сделать свои предыдущие действия более эффективными и перспективными.

2. «Трансформируйтесь, чтобы победить»: бизнес-модели этих компаний предлагают потенциал для дифференциации. Новые идеи и создание экологически нейтральной ценности обеспечивают конкурентное преимущество.

3. «Преобразование для развития»: пользуются спросом так называемые средства трансформации, которые делают новые технологии, процедуры и процессы доступными в первую очередь для всех остальных компаний.

Изменения неизбежны, и некоторые краеугольные камни уже ясны: зеленая энергия и устойчивые продукты изначально будут монопольным фактором и принесут преимущества. Однако затем, в обозримом будущем, они проникнут на глобальный массовый рынок – и прежние решения исчезнут [4, 5].

Экономики многих стран-лидеров желают иметь конкурентное преимущество. К примеру, японское правительство считает, если расширить рынок, связанный с IoT, где искусственный интеллект, роботы и все остальное связано через Интернет, он станет катализатором для японской экономики, потенциальный темп роста которой вялый. Министерство экономики, торговли и промышленности, которое стало центром разработки стратегии, уже начало движение к осуществлению «пятой промышленной революции». Далее идет биотехнология. Необходимо поддерживать базу данных биологических и генетических ресурсов, хранящихся в компаниях, государственных научно-исследовательских институтах, университетах с целью развития «биоиндустрии», производящей лекарства, топливо, продукты питания и прочее с использованием биохимической технологии.

Историю замены человеческого труда машинами можно проследить по хронологии научных революций. Если мы посмотрим на время, то увидим, что скорость прогресса увеличивается. Промышленная революция началась с того, что машины помогали человеку в производстве текстиля, и, наконец, достигла уровня, когда машина может взять на себя большую часть человеческого труда [6]. Ярким примером является Китай. Из 69 заводов по всему миру, которые в настоящее время считаются лидерами, использующими технологии четвертой промышленной революции, в настоящее время в Китае находится 20, за ними следуют 19 заводов в Европейском союзе, семь в США и пять в Японии. «Китай достиг стадии, когда его фирмы могут конкурировать со своими коллегами в развитом мире во многих секторах, в таких как смартфоны и электромобили», — сказал Живэй Чжан, главный экономист Pinpoint Asset Management. И Китай, и США признают, что эти технологические прорывы могут привести к изменению ландшафта мировой экономики. Чжан предсказал, что основная конкуренция в технологиях четвертой промышленной революции будет между Китаем и США, поскольку Европа и Япония могут развивать опыт в конкретных областях, но могут не набрать масштабов, чтобы конкурировать в широком спектре технологий [7].

В новом пятилетнем плане Китая семь ключевых областей развития, известных как «пограничные технологии», перечислены в качестве главных приоритетов национальной политики, а искусственный интеллект, квантовая информация и полупроводники входят в тройку лидеров.

Китай активно стремится к энергетической независимости. Китаю потребуется потратить 6,4 триллиона долларов США на строительство новых мощностей по производству зеленой энер-

гии, необходимых для достижения его цели по достижению углеродной нейтральности в 2060 году, но, по мнению энергетического аналитика Вуда Маккензи, ему может не хватить поставок ключевого сырья: в основном меди, алюминия, никеля, кобальта и лития.

Таким образом, элементы, относящиеся к Индустрии 5.0, уже являются частью основных политических инициатив (рис. 1) [8, 9].

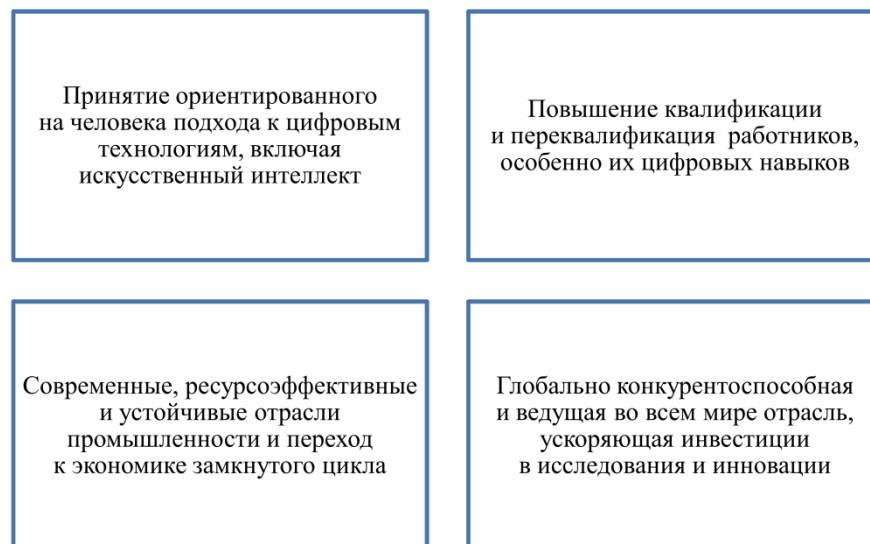


Рис. 1. Политические и экономические инициативы Индустрии 5.0
Fig. 1. Political and economic initiatives Industry 5.0

Индустрия 5.0 – это не технологическая революция, а ценностная инициатива, которая стимулирует технологическую трансформацию с определенной целью. Она базируется на развитии следующих направлений (рис. 2)



Рис. 2. Основные направления технологических прорывов
Fig. 2. Main directions of technological breakthroughs

Отраслевая революция обусловлена трансформационными технологическими достижениями, которые привели к фундаментальным изменениям в функционировании отрасли. Эти изменения имеют экономические и социальные последствия. Некоторые из них очевидны и желательны, другие непреднамеренные и нежелательные [10, 11].

Важно отметить, что технологическая трансформация поможет решить ряд уникальных общественных проблем. Индустрия 5.0 делает смелый акцент с отдельных технологий на системный подход. Этот подход позволяет отрасли достигать социальных целей помимо создания рабочих мест и роста и ставит благополучие работников отрасли в центр производственного процесса (рис. 3). Это может помочь объяснить, почему Индустрия 5.0 считается типом промышленной революции, отличным от других промышленных революций [12, 13].



Рис. 3. Социальные ценности пятой промышленной революции
Fig. 3. Social values of the fifth industrial revolution

Заключение

Индустрия 5.0 дополняет и расширяет отличительные черты Индустрии 4.0. Это предполагает, что их следует рассматривать совместно, т. е. как сосуществование технологической Промышленности 4.0 и Промышленности 5.0, ориентированной на социальные ценности. В интересах упрощения терминологии, можно сказать, мы являемся свидетелями техно-социальной революции с технологиями как инструментами и социальными потребностями в качестве конечной цели [14].

Подобные продукты могут производиться только при участии человека. Этот индивидуальный подход прежде всего является тем, что потребители стремятся выразить свою идентичность через продукты, которые они покупают. Потребители принимают технологии – они не возражают, например, если автоматизация является частью производственного процесса. Но они жаждут личного участия дизайнеров и мастеров, которые своими личными усилиями создают что-то особенное и уникальное. Это ощущение роскоши – персонализация, за которой будущее компаний.

Эта тенденция Индустрии 5.0 является скорее антииндустриальной, чем индустриальной. Это возврат к чему-то более раннему, к временам до индустриализации, когда подарком, например, было что-то, что кто-то из ваших знакомых месяцами вязал, вырезал или создавал вручную. Это было именно для вас, потому что человек, который сделал подарок, знал вас лично и, следовательно, знал, как сделать подарок для вас и больше ни для кого.

Но как современные дизайнеры и ремесленники создают продукты, которые соответствуют стандартам качества, которых ожидают люди? Как они производят продукты по цене, которую люди могут себе позволить? Коллаборативные роботы – большая часть ответа.

Коллаборативные роботы – это, по сути, электроинструменты, которые наделяют мастеров-операторов сверхчеловеческими способностями с точки зрения скорости и точности. Это то, что нужно, чтобы производить промышленные продукты с человеческим прикосновением [15].

Возвращая людей в центр промышленного производства с помощью таких инструментов, как коботы, Индустрия 5.0 не только дает потребителям продукты, которые они хотят сегодня, но и создает рабочие места.

Человекоцентричный подход ставит основные человеческие потребности и интересы в основу производственного процесса, переходя от технологического прогресса к полностью ориентированному на человека и общество подходу. В результате по мере смещения ценности у промышленных рабочих разовьются новые роли. Работников уже рассматривают не как «издержки», а как «инвестиции». Технология должна служить людям и обществу, а это означает, что технология, используемая в производстве, адаптируется к потребностям клиентов.

Список литературы/References

1. *World Economic Forum*. Available at: <https://www.weforum.org/our-impact/advanced-manufacturing-factories-light-the-way-as-learning-beacons>.
2. Avdeeva E.A., Davydova T.E., Makeeva T.I., Korovkina A. Conceptual features of the circular economy and the possibilities of its formation using smart systems. *E3S Web of Conferences*. 2021;244(3):10012. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410012
3. Zilian Stella, Zilian Laura. Die vierte Industrielle Revolution – eineneue Hoffnung? Technologischer Fortschritt und Ungleichheit. In: *Luks, Fred (Hrsg.): Chancen und Grenzen der Nachhaltigkeits-transformation*. Wiesbaden: Springer; 2019.
4. Avdeeva E.A., Averina T.A., Butyrina N. Study of the Development Trajectory of the Status Indicator in Employment in the Context of Digital Transformation. *E3S Web of Conferences*. 2021;244(1):10001. DOI: 10.1051/e3sconf/202124410001
5. Obermaier, Robert: Industrie 4.0 und Digitale Transformation als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. In: *Obermaier, Robert (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation*. Wiesbaden: Springer; 2019.
6. Karen Yeung. China Making Strides in Industry 4.0 Revolution as Advanced Manufacturing Outpaces EU, US, Japan; 2021. Available at: <https://www.scmp.com/economy/china-economy/article/3125986/china-making-strides-industry-40-revolution-advanced>.
7. Avdeeva E.A., Averina T.A., Butyrina N.A., Perevalova O.S. Transformation of the industrial sector into an information-networked environment within industry 4.0: prospects and challenges. *AIP Conference Proceedings*. 2021;2402:040024. DOI: 10.1063/5.0071718
8. Lu Y., Xu X., Wang L. Smart Manufacturing Process and System Automation – a Critical Review of the Standards and Envisioned Scenarios. *J Manuf Syst*. 2020;56:312–325.
9. Röben Andreas. Industrie 4.0: Eine Revoultionmit Ankündigung. In: *Spöttl, Georg, Windelband, Lars (Hrsg.): Industrie 4.0 Risiko und Chancenfür die Berufsbildung*, 2. Auflage, Bielefeld; 2019.
10. Barkalov S., Dorofeev D., Fedorova I., Polovinkina A. Application of Digital Twins in the Management of Socio-economic Systems. *E3S Web of Conferences*. “22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies, EMMFT 2020”. 2021:11001. DOI: 10.1051/e3sconf/202124411001
11. Bin Chen, Tao Liu, Yingqi Wang: Volatile Fragility: New Employment Forms and Disrupted Employment Protection in The New Economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5):1531 (2020). DOI:10.3390/ijerph17051531
12. Vogler-Ludwig Kurt, Dürr Nicola, Kriechel Ben. *Arbeitsmarkt 2030 – Wirtschaft und Arbeitsmarktindigitalen Zeitalter – Prognose 2016*; 2016.
13. McKinsey: *Jobs Lost, Jobs Gained: Workforce Transitions in a Time of Automation*. McKinsey Global Institute, McKinsey & Company: New York City; 2017.
14. Barkalov S.A., Averina T.A., Avdeeva E.A. Opportunities of Digital Education for Sustainable Development of Society Technology. In: *Enhanced Learning in Higher Education (TELE)*; 2021. P. 17–19. DOI: 10.1109/TELE52840.2021.9482550
15. Stephen H. Dover, CFA. *Kurze Überlegungen: Der Weltraum und die vierte industrielle Revolution*. Aktien&Perspektiven; September 03, 2020.

Информация об авторах

Авдеева Елена Александровна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; avdeeva_ea@mail.ru.

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ta_averina@mail.ru.

Балашова Наталья Андреевна, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; butyrinanatalya@gmail.com.

Information about the authors

Elena A. Avdeeva, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; avdeeva_ea@mail.ru.

Tatiana A. Averina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Management Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta_averina@mail.ru.

Natalya A. Balashova, Postgraduate Student of the Management Department, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; butyrinanatalya@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022

The article was submitted 11.04.2022

УПРАВЛЕНИЕ ЗНАНИЯМИ НА ПРИМЕРЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ И ВУЗА

А.Ю. Сапожников¹, axl_mail_box@mail.ru
Г.Г. Куликов², grisha@molniya-ufa.ru
А.А. Кузнецов¹, kuznecovopkr@gmail.com
М.В. Юрлов¹, lvefunc@icloud.com

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

² Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Уфа, Россия

Аннотация. В настоящей статье рассматривается проблема управления знаниями. Значение роли человеческих ресурсов, организационного управления и информационных технологий в повышении эффективности современных компаний явилось причиной того, что со второй половины 90-х годов началось активное исследование проблематики управления знаниями (knowledge management). Основная цель управления знаниями – превратить знания и опыт сотрудников в капитал компании. Информационные технологии сегодня являются одним из основных драйверов при трансформации современного бизнеса, определяющим фактором четвертой промышленной революции INDUSTRY 4.0. Поэтому сегодня целевая модель предприятия наукоемкой отрасли все чаще содержит задачу по созданию ИТ-решения для управления знаниями. **Цель исследования:** построение метамоделей системы управления знаниями (СУЗ) с применением методологии TOGAF, разработка архитектуры СУЗ для использования на промышленном предприятии и вузе. **Методы исследования,** использованные в работе: комплексный подход и структурный анализ процесса системного проектирования по методологии SADT (Structured Analysis and Design Technique) и по методологии TOGAF (The Open Group Architecture Framework). **Результаты.** Разработанная метамоделю архитектуры СУЗ демонстрирует на выделенной предметной области применение методологии SADT и TOGAF для создания системы управления знаниями крупного машиностроительного предприятия и вуза. Разработанная функциональная модель описывает механизм накопления и формализации знаний в форме гипертекстовых и продукционных баз знаний при реализации совместных проектов и их передачу в СУЗ отрасли. **Заключение.** Разработанные продукционные правила позволяют интегрировать организационно-функциональную структуру предприятия и вуза с точки зрения повышения эффективности ИТ, создать единую интеллектуальную среду при реализации совместных проектов, обеспечить накопление знаний в локальных СУЗ и их трансфер в отраслевые базы знаний.

Ключевые слова: система управления знаниями, метамоделю TOGAF, цифровой двойник, базовая кафедра, цифровая трансформация

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-проекта № 20-37-90061.

Для цитирования: Управление знаниями на примере машиностроительного предприятия и вуза / А.Ю. Сапожников, Г.Г. Куликов, А.А. Кузнецов, М.В. Юрлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 148–157. DOI: 10.14529/ctcr220214

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr220214

KNOWLEDGE MANAGEMENT ON THE EXAMPLE OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE AND A HIGHER EDUCATION INSTITUTION

A.Yu. Sapozhnikov¹, axl_mail_box@mail.ru

G.G. Kulikov², grisha@molniya-ufa.ru

A.A. Kuznetsov¹, kuznecovopkr@gmail.com

M.V. Yurlov¹, lvefunc@icloud.com

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

² Ufa Scientific and Production Enterprise "Molniya", Ufa, Russia

Abstract. The article discusses the problem of knowledge management. Meaning of the role of human resources, organizational management and information technologies in efficiency advancement of modern companies is the reason why active research of the knowledge management problem got started in the second half of 1990s. Main aim of knowledge management is to transform knowledge and experience of employees into company capital. Information technologies today are the main drive for transformation of modern businesses which is the main factor for the fourth industrial revolution INDUSTRY 4.0. This is why today's goal model of knowledge-intensive industry enterprises contains task of IT solution creation that handles knowledge management. Aim: creating a metamodel of knowledge management system (KMS) using TOGAF methodology. Developing a KMS architecture for it to be used on industrial enterprise and higher education institution. Research methods used: complex approach and structural analysis of the process of system design using SADT (Structured Analysis and Design Technique) and TOGAF (The Open Group Architecture Framework) methodologies. Results. Developed metamodel of KMS architecture shows application of SADT and TOGAF methodologies on a given subject area in order to create knowledge management system of industrial enterprise and higher education institution. Developed functional model describes mechanism of how knowledge is collected and formalized in form of hypertext and productional knowledge bases when conducting collaborative projects and their transfer to industries KMS. Conclusion. Developed productional rules allow integration of organizational and functional structure of enterprise and higher education institution from point of advancing IT efficiency, to create a central intelligent sphere when conducting collaborative projects, to allow knowledge collection at local knowledge management systems and to transfer this knowledge in industry enterprises.

Keywords: knowledge management system, TOGAF metamodel, digital twin, base department, digital transformation

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-37-90061.

For citation: Sapozhnikov A.Yu., Kulikov G.G., Kuznetsov A.A., Yurlov M.V. Knowledge management on the example of a machine-building enterprise and a higher education institution. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(2):148–157. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220214

Ключевой задачей управления знаниями является использование знаний для получения конкурентного преимущества [1]. Очевидно, что повышение эффективности при реализации наукоемких проектов на предприятиях может достигаться за счет привлечения научного потенциала вузов, в том числе с использованием базовых кафедр [2, 3]. Основным инструментом, обеспечивающим взаимодействие участников научно-производственной среды, выступает цифровой двойник корпоративной информационной среды (ЦД КИС) предприятия, реализуемый в составе КИС университета. Данный цифровой двойник реализуется как предметно-ориентированное слабоструктурированное информационное пространство (среда) с правилами исчисления, отвечающими теории категории множеств, обеспечивающее поддержку жизненного цикла продукции выпускаемой отраслью. Современные информационные технологии, реализующие цифровые двойники [4–6] объектов, процессы и их взаимодействие в процессах управления также являются основой трансформации INDUSTRY 4.0 [7–9].

В [10] показано, что формализации логических составляющих в моделях ЦД процессов, отвечающих требованиям ГОСТ [11, 12], в общем случае соответствуют точкам принятия решений в форме продукций: «если – то» (условным операторам) внутри ЦД. Соответственно, если какая-либо композиция ЦД соответствует обобщенному процессу, то и правила продукций исходных процессов будут образовывать композицию продукций (базы знаний) обобщенного процесса.

Важная роль в составе научно-производственной среды отводится процессам выявления, накопления и обмена знаниями, в том числе знаний по работе в прикладном программном обеспечении (ПО), входящем в состав цифрового двойника.

В качестве методологии для разработки СУЗ может служить методология TOGAF (The Open Group Architectural Framework) как наиболее универсальная и часто применяемая для разработки корпоративных архитектурных решений, регламентирующих использование ИТ на предприятиях и корпорациях [13].

Одним из ключевых понятий в TOGAF является точка зрения (viewpoint), определяющая текущее состояние предприятия и аспект, в котором будет происходить его трансформация в целевое. В данной работе будет рассмотрен аспект цифровой трансформации, актуальный как для предприятий, так и для опорных учебных вузов.

Поставленные на предприятии актуальные задачи являются новыми вызовами, их решение позволит перейти предприятию в новое (целевое) состояние [14, 15].

На рис. 1 приведена мнемосхема по реализации подобного рода производственных задач в виде совместных проектов с привлечением научно-технического задела (НТЗ) вуза. Важным элементом при этом становится ЦД КИС в составе университета, выполняющий роль обратной связи по воздействию на научно-производственную среду. Только при его наличии становится возможным трансфер технологии от предприятия к вузу, реализация проектов с использованием НТЗ университета, как следствие – ИТ-трансформация университета, возможность передачи новых знаний преподавательскому составу и внедрения этих знаний в учебный процесс.

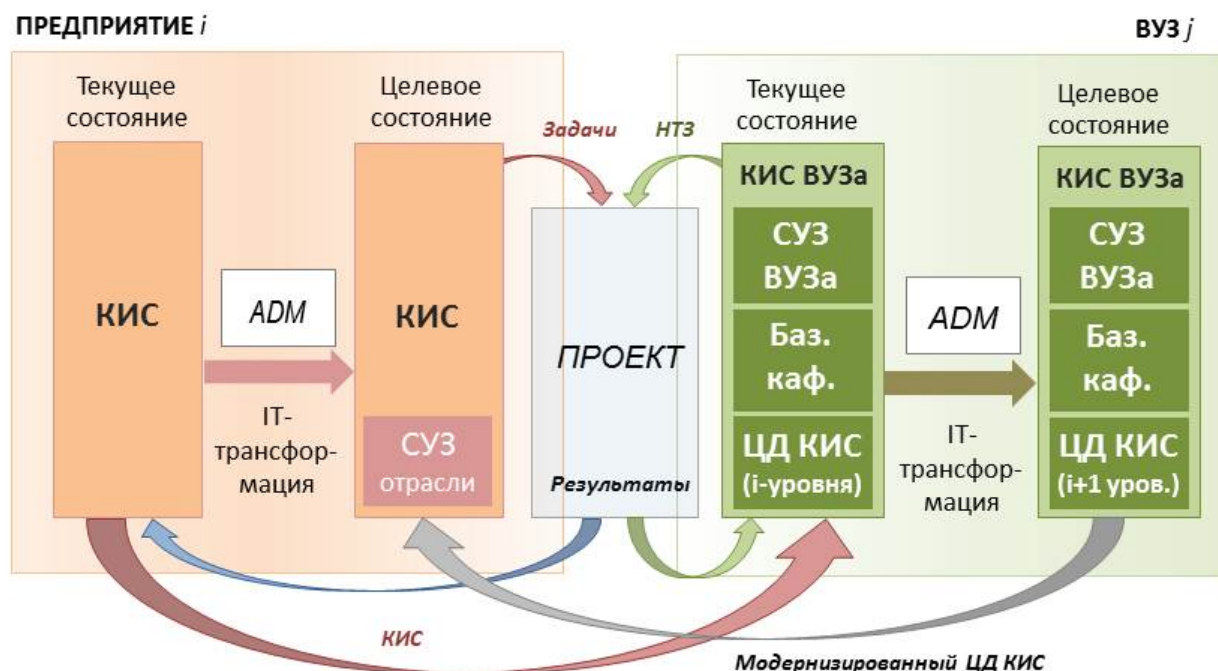


Рис. 1. Цифровое интегрирование и трансформация КИС и СУЗ вузов и предприятий отрасли в результате выполняемых проектов и использования ЦД КИС

Fig. 1. Digital integration and transformation of corporate information systems and knowledge management system of Higher Educational Institutions and enterprises of industry as a result of projects that use digital twins and corporate information systems

При этом можно зафиксировать ряд следующих особенностей.

Для предприятия выполнение проектов:

- 1) приближает текущее состояние предприятия к целевому;
- 2) обеспечивает появление новых знаний, полученных как в виде результатов проекта, так и в виде НТЗ вуза;
- 3) модернизация ЦД КИС в университете формирует облик КИС в целевом состоянии предприятия.

Для вуза выполнение проектов:

- 1) требует наличия ЦД КИС в составе университета, является необходимым условием для работы базовых кафедр;
- 2) инициирует модернизацию ЦД КИС и, как следствие, оказывает влияние на ИТ-трансформацию университета;
- 3) обеспечивает накопление знаний в университете.

ADM (Architecture Development Method), показанный на рис. 1, – это метод в составе TOGAF, который позволяет осуществить переход от текущего к целевому состоянию через 10 фаз архитектурного цикла.

Построение системной модели процесса взаимодействия «вуз – предприятие» (рис. 2) и ее дальнейший анализ позволяет выявить следующие недостатки, являющиеся неформализованными ранее резервами по повышению эффективности.

1. Отсутствует механизм, обеспечивающий непрерывное и системное взаимодействие персонала вуза и предприятия по решению актуальных задач отрасли. Обсуждение проблем и потребностей отрасли происходит в рамках совещаний, носящих разовый характер, при этом в реальную работу передается незначительное количество задач, реализация которых требует привлечения научного потенциала вуза.

2. Слабое или полное отсутствие привлечения обучающихся в вузе для решения актуальных задач отрасли. Студенты знакомятся с производственной средой, ее задачами и потребностями только при прохождении практик.

3. Задачи, решаемые в рамках курсовых и выпускных квалификационных работ, не содержат практической ценности для производственной среды.

4. Отсутствует общая программно-аппаратная среда, обеспечивающая информационное взаимодействие персонала вуза и предприятия при совместном решении актуальных задач. Коллективы с предприятия и университета, задействованные в решении одной задачи, выполняют работу в различных КИС. Обмен информацией происходит в бумажном виде или путем обмена съемными носителями информации при личных встречах или путем обмена через общедоступные каналы связи, такие как почта, яндекс-диск и др.

5. Отсутствует единая целевая база знаний с результатами выполнения совместных проектов. В БД НИЧ хранится только общая, атрибутивная информация о выполненных научно-исследовательских работах (НИР), в то время как практические результаты НИР хранятся в архивах отдельных кафедр или научных коллективов. Результаты выпускных квалификационных работ в университете хранятся в отдельных архивах кафедр, а пояснительные записки к ним хранятся в бумажном виде в центральном архиве вуза. Не организован процесс сбора и консолидации в единую базу научных и практических результатов работ, выполненных в вузе, а также не отлажен процесс доступа к этим данным, их передача в производственную среду.

6. Не формализованы процедуры, обеспечивающие полноценное функционирование базовых кафедр (БК) в составе вуза. В настоящий момент организация работы с ними осуществляется без учета их специфики и направленности на взаимодействие с предприятием.

Другими ключевыми элементами, представленными в описании, являются СУЗ вуза и СУЗ отрасли. На рис. 3 представлен механизм наполнения СУЗ отрасли в результате выполнения совместных проектов. При этом отражена главная идея, заложенная в корпоративных СУЗ: каждое предприятие обеспечивает наполнение общей отраслевой базы знаний, которая является распределенной. Таким образом, путем применения ЦД КИС, на которой выполняются проекты «вуз – предприятие», всем предприятиям отрасли становится доступен НТЗ университетов, обеспечивая скорейший рост отраслевых технологий.

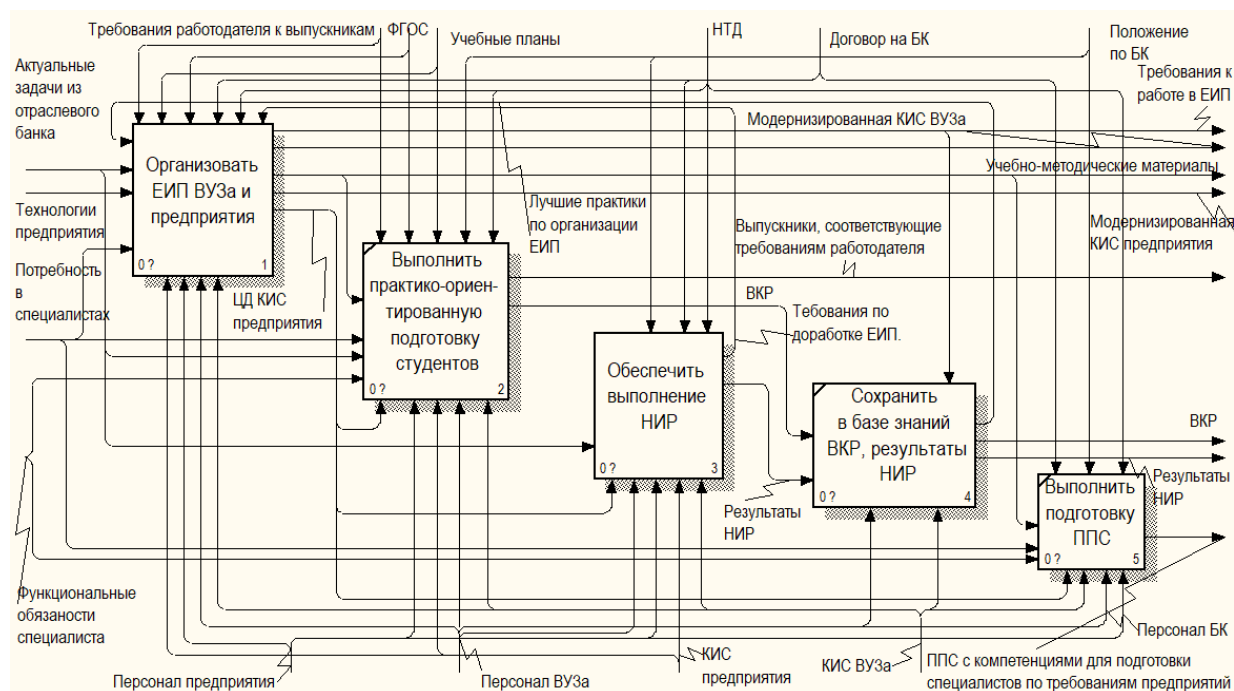


Рис. 2. Функциональная диаграмма взаимодействия «вуз – предприятие» с использованием ЦД и механизма базовых кафедр (1-й уровень)
Fig. 2. Functional diagram of “Higher Educational Institution – Enterprise” interaction using digital twins and base department mechanisms

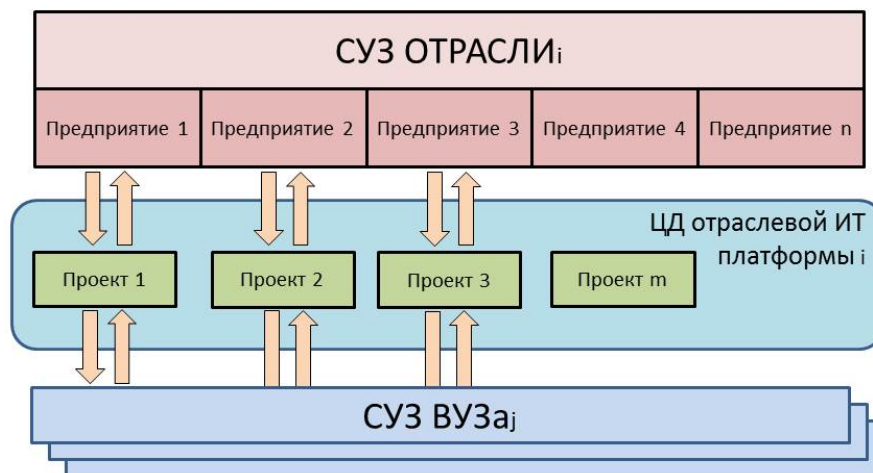


Рис. 3. Схема пополнения отраслевой СУЗ в результате выполнения локальных проектов
Fig. 3. Model of knowledge management system refill as a result of local projects

Отметим важное свойство СУЗ университетов, которая в отличие от СУЗ предприятий пополняется результатами проектов, но при этом остается автономной.

Как отмечалось в [3], развитие ЦД КИС на основе методологии TOGAF происходит итерационно и базируется на одном из основных процессов, например, для конструкторского бюро машиностроительной отрасли основным процессом является разработка новых изделий, что возможно только при одновременной реализации перспективных НИР и внедрении новейших технологий. Очевидно, что любое проведение работ в условиях INDUSTRY 4.0 происходит с привлечением ИТ, а также организации процессов технического сопровождения специалистов из различных областей при использовании программного и аппаратного обеспечения.

При этом у большинства предприятий продолжается использование традиционных текстовых документов, описывающих различные процедуры и технологии, в том числе и при работе с программным обеспечением (ПО).

Данный подход показал свою неэффективность при разработке программных документов.

Во-первых, существенным недостатком является значительная продолжительность разработки, оформления, согласования, а также проведения изменений в программных документах (ПД), что неприемлемо в условиях частого обновления как самого ПО, так и меняющихся подходов его применения.

Во-вторых, ярким недостатком является «отрыв» ПД от прикладной области, в которой оно применяется. Различные классы крупных информационных систем, таких как CAD, CAM, PLM, MRP, ERP и т. д., используются с учетом методологий, разработанных в прикладных областях и принятых в отрасли. Таким образом, для корректного и полного описания работы в ПД требуется консолидация знаний IT-специалистов и экспертов предметной области, в которой используется ПО.

В-третьих, недостаточная степень информативности программных документов. В ряде случаев вместо текстового документа для конечного потребителя более понятной является информация, представленная в форматах видео, как интерактивное руководство и т. п.

На рис. 4 приведен фрагмент целевой метамодели TOGAF, отражающий цифровую трансформацию предприятия в виде появления СУЗ на примере следующих процессов:

- техническая поддержка пользователей информационных систем;
- разработка конструкторской документации (КД) с использованием САПР и PLM-систем;
- проведение НИР;
- внедрение новых технологий.

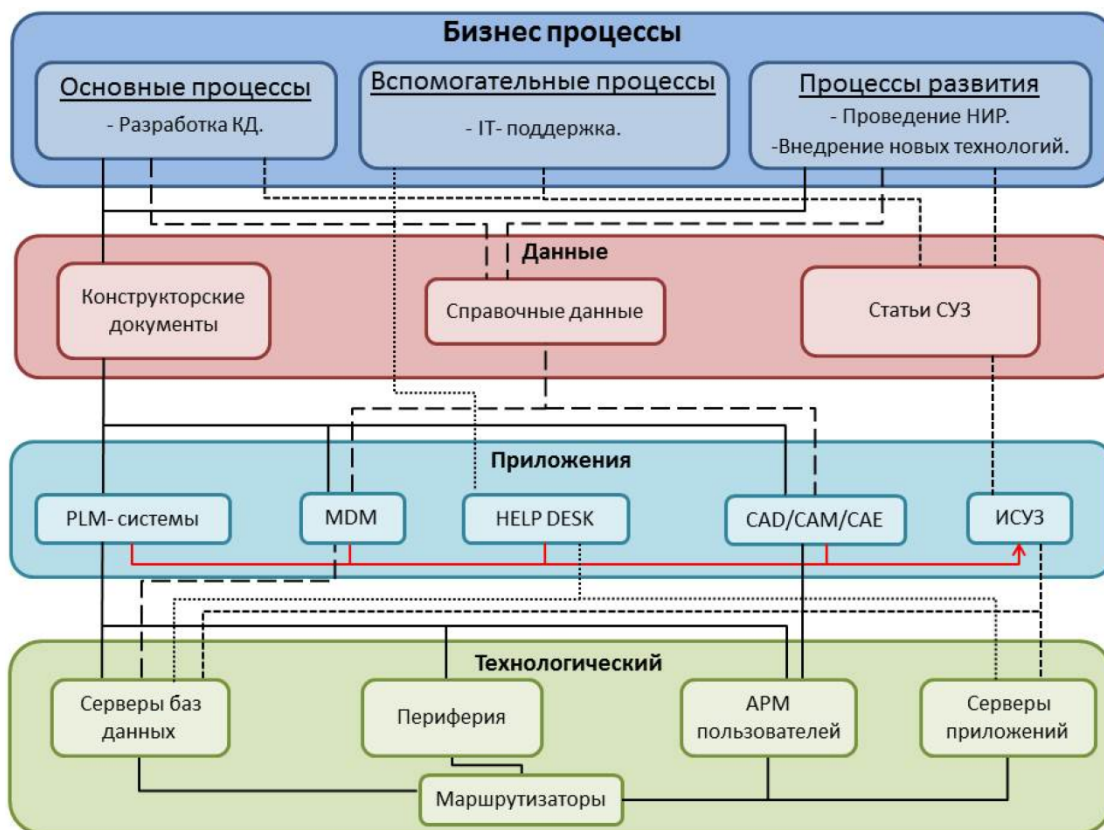


Рис. 4. Фрагмент целевой метамодели
Fig. 4. Fragment of target metamodel

Новизной разработанной метамодели является связь между ПО на слое приложений. Данная связь обеспечивает аккумулирование знаний в виде взаимоувязанных статей в СУЗ при реализации в информационных системах выбранных бизнес-процессов, затрагивающих различные предметные области.

В качестве примера применения предложенной целевой метамодели TOGAF рассмотрим процесс IT поддержки пользователей информационных систем (рис. 5). В качестве основного

решения для построения СУЗ было выбрано свободно распространяемое программное обеспечение MediaWiki [16] и поисковая система полнотекстового поиска и анализа данных с веб-интерфейсом elasticsearch [17].

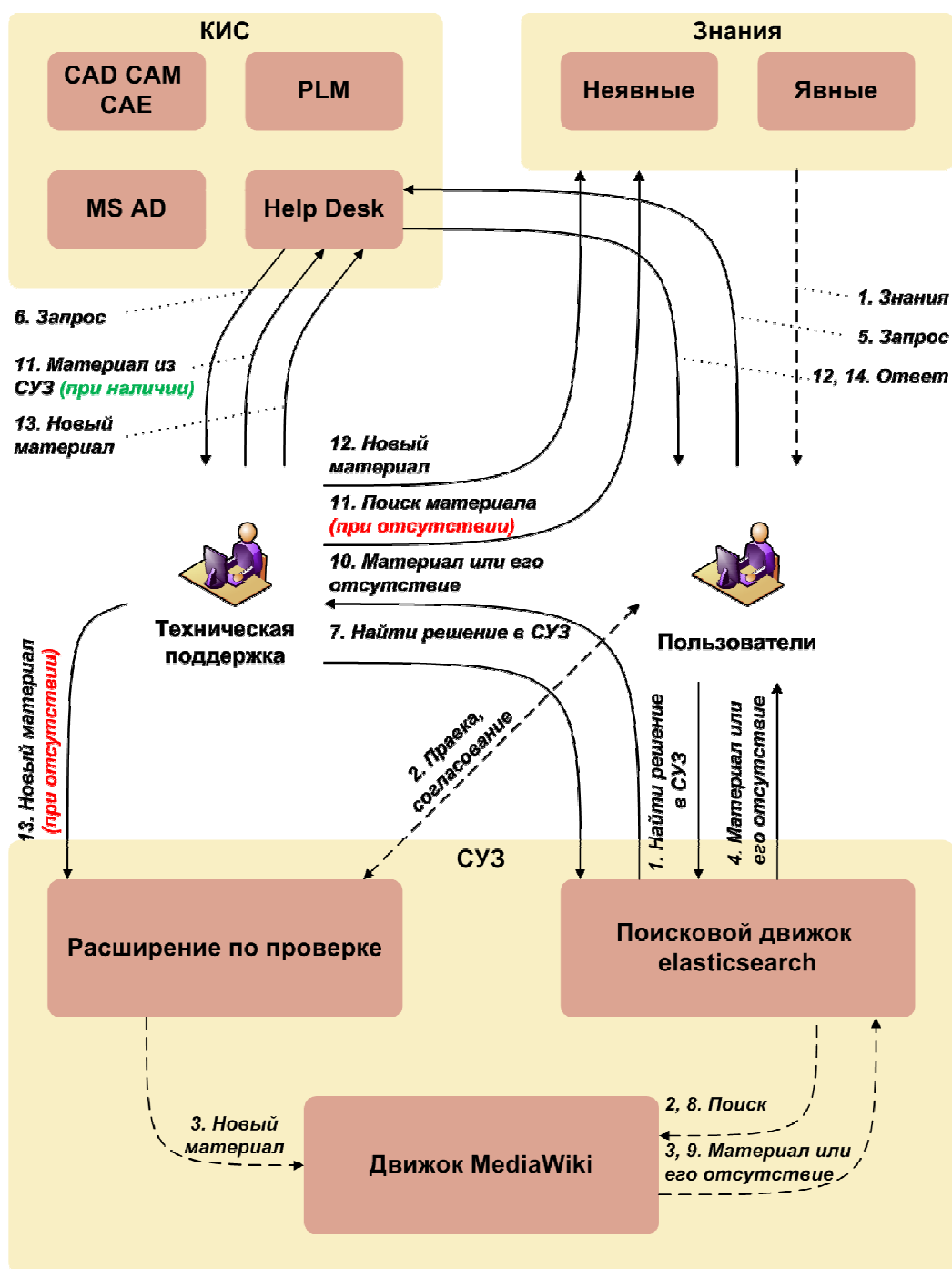


Рис. 5. Мнемосхема предлагаемого процесса техподдержки с использованием СУЗ
Fig. 5. Mnemonic scheme of proposed process of tech support using knowledge management system

При возникновении проблемы по использованию информационных систем пользователь сначала пытается найти решение проблемы лично в СУЗ. Если нужная информация не найдена, то он составляет заявку в техническую поддержку.

Сотрудники технической поддержки, убедившись, что решение действительно отсутствует, приступают к решению проблемы пользователя, обращаясь в том числе и к внешним, по отношению к СУЗ, источникам знаний. Ими могут являться неявные знания, такие как личный опыт

экспертов, либо явные знания, представленные в качестве конкретных текстовых, графических, видеоматериалов, которые можно найти в сети Интернет. После того как новое решение проблемы было сформировано оператором технической поддержки, оно предоставляется пользователю, а также заносится в систему управления знаний в качестве новой статьи (правки), которую требуется утвердить.

В рамках процесса пополнения СУЗ рассматривается проблема приведения различной информации к формализованному удобному виду для работы пользователей. Для этого предлагается использовать привычный функционал MediaWiki, которая предоставляет возможность создания статей, определения их в различные категории, добавления ключевых слов, позволяющих группировать и искать статьи различным критериям.

При разработке принято решение об обязательной привязке каждой статьи к категориям, а также назначении к каждой категории компетентных специалистов (экспертов) для проверки.

Предложенный подход оказания IT-поддержки позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с использованием традиционных текстовых ПД:

- наличие поисковой навигации по базе программных документов на портале предприятия;
- снижение нагрузки на службу технической поддержки за счет возможности самостоятельного решения проблемы пользователем путем обращения в СУЗ;
- уменьшение количества одинаковых запросов в help desk;
- повышение информативности предоставляемой информации по сравнению с текстовыми документами.

Выводы

1. Предложена архитектура системной цифровой трансформации СУЗ исследуемой предметной области (проектов) производственного предприятия и вуза на основе методологии TOGAF, обеспечивающая синергетический эффект при совместной реализации проектов инновационных, наукоемких изделий по разработке с использованием ЦД КИС.

2. Разработана схема взаимодействия между отраслевыми СУЗ предприятий и СУЗ вузов, обеспечивающая обмен знаниями между производственной и научно-образовательной средой.

3. Предложена целевая метамоделю процессов разработки КД и выполнения НИР, обеспечивающая накопление знаний в СУЗ.

4. Приведен пример реализации и использовании СУЗ для процесса технической поддержки.

Список литературы

1. Зимова Н.С. Особенности внедрения системы управления знаниями в российских компаниях // Научный результат. Социология и управление. 2019. Т. 5, № 3. С. 100–116. DOI: 10.18413/2408-9338-2019-5-3-0-7

2. Архитектура структуры цифрового двойника интегрированной IT-платформы для распределенного, многовариантного проектирования объектов машиностроения / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов, А.С. Маврина // Вестник УГАТУ. 2021. Т.25, № 2 (92). С. 86–92. DOI: 10.54708/19926502_2021_2529286

3. Подход к формированию виртуальной метаструктуры цифрового проектного двойника корпоративной информационной системы машиностроительного предприятия / А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов, А.С. Маврина, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 2. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr210201

4. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Изд. первое, испр. и доп. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.

5. Цифровой двойник (digital twin) // IT Enterprise. URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvojniki-digital-twin> (дата обращения: 12.03.2022).

6. Фролов Е.Б. MES – базис для создания «цифрового двойника». URL: <https://www.e-executive.ru/management/practices/1989564-mes-bazis-dlya-sozdaniya-tsifrovogo-dvojnika> (дата обращения: 15.03.2022).

7. Шваб К. Четвертая промышленная революция: пер. с англ. М.: Эксмо, 2016. 136 с.

8. Липкин Е. Индустрия 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции. М.: ООО «Остек-СМТ», 2017.

9. Хузмиев И.К. Информационные технологии – инфраструктура четвертой промышленной революции // Россия: тенденции и перспективы развития. 2017. Вып. 12, ч. 3. С. 274–277.
10. Концепция системного представления предметной области при формировании цифрового двойника производственного процесса машиностроительного предприятия / А.В. Речкалов, А.В. Артюхов, Г.Г. Куликов, В.Н. Новиков // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26, № 1 (95). С. 120–135. DOI: 10.54708/19926502_2022_26195120
11. ГОСТ Р ИСО 15531-1–2008. Промышленные автоматизированные системы и интеграция. Данные по управлению промышленным производством. Часть 1. Общий обзор. М.: Стандартинформ, 2008. 20 с.
12. ПНСТ 429–2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2020. 8 с.
13. Темненко В. Быть или не быть TOGAF: распространение архитектуры предприятия за границы RUP. URL: <http://eam-news.blogspot.com/2007/12/togaf-rup.html> (дата обращения: 15.04.2022).
14. Балашов А.И. Производственный менеджмент (организация производства) на предприятии. СПб.: Питер, 2009. 160 с.
15. The Future of the Future: Cognitive Artificial Intelligence. URL: <https://www.infor.com/resources/the-future-of-the-future-cognitive-artificial-intelligence> (дата обращения: 15.04.2022).
16. Почему строить базу знаний компании на основе mediawiki – недурная затея. URL: <https://habr.com/ru/post/437568> (дата обращения: 16.04.2022).
17. Elasticsearch – поисковая система и аналитическая СУБД в облаке. URL: <https://cloud.yandex.ru/blog/posts/2021/08/managed-elasticsearch-overview> (дата обращения: 17.04.2022).

References

1. Zimova N.S. Implementation features of knowledge management systems in Russian companies. *Research result. Sociology and Management*. 2019;5(3):100–116. (In Russ.) DOI: 10.18413/2408-9338-2019-5-3-0-7
2. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S. Distributed design of engineering facilities using the digital twin of the industry IT platform. *Vestnik UGATU*. 2021;25(2):86–92. (In Russ.) DOI: 10.54708/19926502_2021_2529286
3. Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Kulikov G.G. An approach to the transformation of a virtual metastructure of a digital design twin of a machine-building enterprise corporate information system. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(2): 5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210201
4. Prokhorov A., Lysachev M. Borovkov A. (ed.). *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Digital twin. Trend analysis, worldwide experience.]. Moscow: ООО “Al’yans-Print”; 2020. 401 p. (In Russ.)
5. *Tsifrovoy dvoynik (digital twin)* [Digital twin]. Available at: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvoynik-digital-twin> (accessed 12.03.2022). (In Russ.)
6. Frolov E.B. *MES – bazis dlya sozdaniya “tsifrovogo dvoynika”* [MES – basis for creation of “digital twin”]. Available at: <https://www.e-executive.ru/management/practices/1989564-mes-bazis-dlya-sozdaniya-tsifrovogo-dvoynika> (accessed 15.03.2022). (In Russ.)
7. Schwab, Klaus. *The fourth industrial revolution*. Transl. from Engl. Moscow: Eksmo; 2016. 136 p. (In Russ.)
8. Lipkin E. *Industriya 4.0: Umnyye tekhnologii – klyuchevoy element v promyshlennoy konkurentsii* [Industry 4.0: Smart technologies – key component in enterprise competition]. Moscow: ООО “Ostek-SMT”; 2017. (In Russ.)
9. Khuzmiyev I.K. [Information technologies – infrastructure of fourth industrial revolution]. *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya*; 2017;12(3):274–277. (In Russ.)
10. Rechkalov A.V., Artyukhov A.V., Kulikov G.G., Novikov V.N. The concept of transformation of the model of planning and management processes based on the digital twin of the production system in the industrial model of a machine-building enterprise. *Vestnik UGATU*. 2022;26(1):110–119. (In Russ.) DOI: 10.54708/19926502_2022_26195120
11. *GOST R ISO 15531-1–2008. Promyshlennyye avtomatizirovannyye sistemy i integratsiya. Dannyye po upravleniyu promyshlennym proizvodstvom. Chast’ 1. Obshchiy obzor* [State Standard

R ISO 15531-1–2008. Industrial automation systems and integration. Industrial manufacturing management data. Part 1. General overview]. Moscow: Standartinform; 2008. 20 p. (In Russ.)

12. *PNST 429–2020. Umnoye proizvodstvo. Dvoyniki tsifrovyye proizvodstva. Chast' 1. Obshchiye polozheniya* [Preliminary National Standard 429–2020. Smart manufacturing. Digital manufacturing twins. Part 1. General principles]. Moscow: Standartinform; 2020. 8 p. (In Russ.)

13. Temnenko V. *Byt' ili ne byt' TOGAF: rasprostraneniye arkhitektury predpriyatiya za granitsy RUP* [To be or not to be for TOGAF: distribution of architectures abroad RUP]. Available at: <http://eam-news.blogspot.com/2007/12/togaf-rup.html> (accessed 15.04.2022). (In Russ.)

14. Balashov A.I. *Proizvodstvennyy menedzhment (organizatsiya proizvodstva) na predpriyatii* [Enterprise production management]. St. Petersburg: Piter; 2009. 160 p. (In Russ.)

15. The Future of the Future: Cognitive Artificial Intelligence. Available at: <https://www.infor.com/resources/the-future-of-the-future-cognitive-artificial-intelligence> (accessed 15.04.2022).

16. *Pochemu stroit' bazu znaniy kompanii na osnove mediawiki – nedurnaya zateya* [Why building a company's knowledge base based on mediawiki is not a bad idea.]. Available at: <https://habr.com/ru/post/437568> (accessed 16.04.2022). (In Russ.)

17. *Elasticsearch – poiskovaya sistema i analiticheskaya SUBD v oblake* [Elasticsearch – search engine and analytical database in the cloud] Available at: <https://cloud.yandex.ru/blog/posts/2021/08/managed-elasticsearch-overview> (accessed 17.04.2022). (In Russ.)

Информация об авторах

Сапожников Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, доц. кафедры ИТ в машиностроении, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия; axl_mail_box@mail.ru.

Куликов Григорий Геннадьевич, технический директор, Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», Уфа, Россия; grisha@molniya-ufa.ru.

Кузнецов Александр Андреевич, аспирант кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия; kuznecovopkr@gmail.com.

Юрлов Михаил Викторович, магистрант кафедры автоматизированных систем управления, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия; lvefunc@icloud.com.

Information about the authors

Alexey Yu. Sapozhnikov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of IT in Mechanical Engineering, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; axl_mail_box@mail.ru.

Grigory G. Kulikov, Technical Director, Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russia; grisha@molniya-ufa.ru.

Alexander A. Kuznetsov, Postgraduate Student of the Department of Automated Control Systems, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; kuznecovopkr@gmail.com.

Mikhail V. Yurlov, Master's student of the Department of Automated Control Systems, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; lvefunc@icloud.com.

Статья поступила в редакцию 17.04.2022

The article was submitted 17.04.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Д.Э. Цибулис, inz.radio25k10@gmail.com

А.Н. Рагозин, ragozinan@susu.ru

С.Н. Даровских, darovskikhsn@susu.ru

А.З. Кулганатов, kulganatov97@gmail.com

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты исследования, а также структурные схемы и параметры составляющих генеративно-сопоставительной нейронной сети. Приведены графические изображения результатов фильтрации радиотехнических сигналов. Сделаны выводы о возможностях применения данных нейронных сетей. **Цель исследования:** обоснование возможностей использования генеративно-сопоставительных искусственных нейронных сетей для решения задач цифровой обработки радиотехнических сигналов. **Материалы и методы.** Для оценки результатов цифровой фильтрации зашумленных сигналов использовался метод математического моделирования в среде MATLAB. В качестве тестовых сигналов были взяты: синусоида, сигнал в виде суммы синусоид, модель реального радиотехнического информационного сигнала. В качестве шумовой составляющей используется белый гауссовский шум. Также проводится фильтрация сигнала, в котором отсутствует фрагмент определенной длины. Была сгенерирована обучающая выборка для нейронной сети генератора, состоящая из зашумленных тестовых сигналов. Была также сгенерирована обучающая выборка нейронной сети дискриминатора, состоящая из тестовых сигналов, не содержащих шума. **Результаты.** На основе проведенного моделирования сделан вывод о том, что генеративно-сопоставительная нейронная сеть успешно решает задачи выделения полезного сигнала в смеси его с шумом различной физической природы. Такая нейросетевая структура способна также восстановить полезный сигнал, если в нем отсутствует какая-либо часть в результате воздействия внешних помех. **Заключение.** Существующие методы цифровой фильтрации радиотехнических сигналов требуют определенных трудовых и временных затрат, связанных с расчетом цифровых фильтров. Также при проектировании фильтров высоких порядков возникает сложность при проведении расчета данных фильтров. Идея использования нейронной сети в задачах фильтрации позволяет значительно уменьшить время проектирования фильтра, упростив, таким образом, процесс его реализации. Нейронная сеть, являющаяся самообучаемой системой, может находить решения, недоступные для обычных алгоритмов цифровой фильтрации. Результаты данной работы могут найти свое применение в области цифровой обработки сигналов и в развитии программно-конфигурируемого радио.

Ключевые слова: генеративно-сопоставительная сеть, генератор, дискриминатор, цифровой фильтр, информационный сигнал, радиотехнический сигнал

Для цитирования: Исследование нелинейной цифровой фильтрации сигналов с использованием генеративно-сопоставительной нейронной сети / Д.Э. Цибулис, А.Н. Рагозин, С.Н. Даровских, А.З. Кулганатов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 158–167. DOI: 10.14529/ctcr220215

Brief report

DOI: 10.14529/ctcr220215

STUDY OF NONLINEAR DIGITAL FILTERING OF SIGNALS USING GENERATIVE COMPETITIVE NEURAL NETWORK

D.E. Tsibulis, *inz.radio25k10@gmail.com*

A.N. Ragozin, *ragozinan@susu.ru*

S.N. Darovskikh, *darovskikhsn@susu.ru*

A.Z. Kulganatov, *kulganatov97@gmail.com*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article presents the results of the study, as well as the structural schemes and parameters of the components of the generative-adversarial neural network. Graphical images of the results of filtering radio signals are given. Conclusions are drawn about the possibilities of using these neural networks. The purpose of the study. Substantiation of the possibilities of using generative-sensory artificial neural networks to solve problems of digital processing of radio signals. **Materials and methods.** To evaluate the results of digital filtering of noisy signals, the method of mathematical modeling in the Matlab environment was used. As test signals, the following were taken: a sine wave, a signal in the form of a sum of sinusoids, a model of a real radio-technical information signal. White Gaussian noise is used as the noise component. Also, filtering of the signal is carried out, in which there is no fragment of a certain length. A training sample was generated for the neural network of the generator, consisting of noisy test signals. A training sample of the discriminator neural network was also generated, consisting of test signals that do not contain noise. **Results.** Based on the simulation, it is concluded that the generative-adversarial neural network successfully solves the problems of isolating a useful signal in a mixture of it with noise of various physical nature. Such a neural network structure is also able to restore a useful signal if any part of it is missing as a result of external interference. **Conclusion.** The existing methods of digital filtering of radio signals require certain labor and time costs associated with the calculation of digital filters. Also, when designing high-order filters, it becomes difficult to calculate these filters. The idea of using a neural network in filtering tasks makes it possible to significantly reduce the filter design time, thus simplifying the process of its implementation. A neural network, which is a self-learning system, can find solutions that are inaccessible to conventional digital filtering algorithms. The results of this work can find their application in the field of digital signal processing and in the development of software-configurable radio.

Keywords: generative adversarial network, digital filter, information signal

For citation: Tsibulis D.E., Ragozin A.N., Darovskikh S.N., Kulganatov A.Z. Study of nonlinear digital filtering of signals using generative competitive neural network. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2): 158–167. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220215

Введение

Информационные сигналы в процессе их обработки, при передаче и приеме по каналу связи подвержены различного рода искажениям. Например, наложение шума на сигнал, нелинейные искажения сигнала или потеря какого-либо фрагмента сигнала, что приводит к неправильной передаче сообщения и ухудшению качества связи в целом.

С развитием цифровой обработки сигналов такие процессы, как фильтрация, кодирование, декодирование, возможно реализовать при помощи программных средств. Также стало возможным применить в этой сфере технологии машинного обучения. Ниже представлен вариант цифрового нелинейного фильтра, реализованный на генеративно-сопоставительной искусственной нейронной сети (ГС ИНС).

1. Краткие сведения о генеративно-сопоставительных нейронных сетях

ГС ИНС – модель в области машинного обучения, позволяющая имитировать заданное распределение данных. Такая модель состоит из двух нейронных сетей: генератора (Г) и дискриминатора (Д) [1–4].

Генератор формирует объекты из скрытого пространства признаков, а дискриминатор, обученный на реальных объектах, стремится найти расхождения между настоящим и сгенерированным объектом. При этом генератор пытается повысить процент ошибок дискриминатора, а тот, в свою очередь, старается увеличить точность распознавания [5].

Генеративно-сопоставительная модель обучения нейронной сети отлично подходит для различных типов данных и специфических задач. Все, что приходит на вход, а именно: изображение, текст или аудиосигнал, в дальнейшем представимо в виде вектора значений, называемого цифровым изображением. Представление информационных сигналов в виде цифровых изображений делает возможным использовать ГС ИНС для задач цифровой обработки сигналов, к примеру нелинейной цифровой фильтрации [6–9].

Идея применения ГС ИНС состоит в том, чтобы обучить генератор восстанавливать сигнал из некоего шума [10]. При этом дискриминатор, обученный на чистых сигналах, будет отбрасывать изображения, далекие от действительных. Ожидается, что генератор сможет подобрать такие весовые коэффициенты, что на выходе он будет выдавать сигнал без шума [10, 11].

2. Описание исследуемой нейронной сети

Исследование нелинейного фильтра с использованием ГС ИНС разбито на несколько этапов:

- сборка ГС ИНС в среде MATLAB;
- тренировка ГС ИНС на незашумленных данных (набор синусоид, набор сумм синусоид, модель реального сигнала);
- моделирование тестовых сигналов;
- добавление в тестовый сигнал шумовой составляющей, такой как белый гауссовский шум;
- удаление из тестового сигнала небольшого фрагмента;
- проверка работы сети на зашумленных данных и оценка результатов фильтрации.

Структура генератора данной сети представлена на рис. 1.

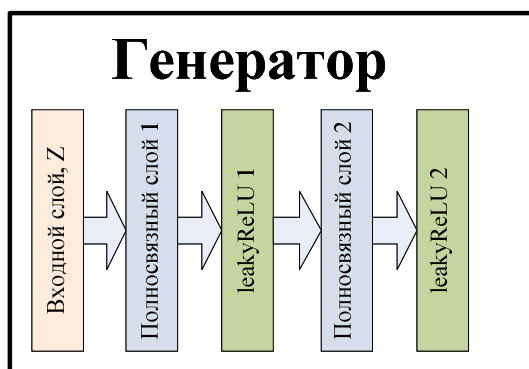


Рис. 1. Структурная схема генератора
Fig. 1. Block diagram of the generator

Структура дискриминатора представлена на рис. 2.

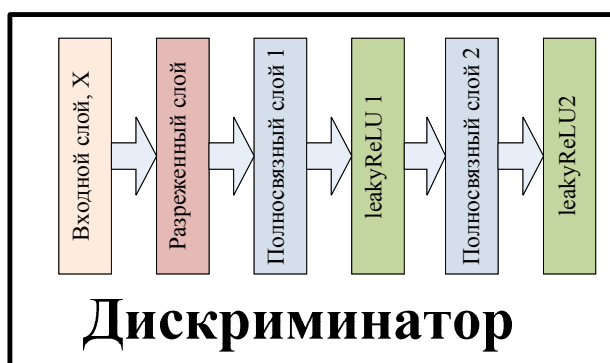


Рис. 2. Структурная схема дискриминатора
Fig. 2. Block diagram of the discriminator

В таблице представлены параметры генератора и дискриминатора.

Параметры генератора и дискриминатора
Parameters of the generator and discriminator

Параметр	Генератор	Дискриминатор
Количество слоев	5	6
Функции активации последнего слоя	$\text{leakyReLU}(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ \alpha x, & x \leq 0 \end{cases}$	$\text{leakyReLU}(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ \alpha x, & x \leq 0 \end{cases}$
Величина входного слоя	1001	1001
Наличие DropOut слоев	Нет	Есть

3. Результаты моделирования

Сначала исследование проводилось на простых модельных сигналах. На вход генератора подавались синусоиды с добавлением белого гауссовского шума. Фрагмент обучающей выборки генератора представлен на рис. 3.

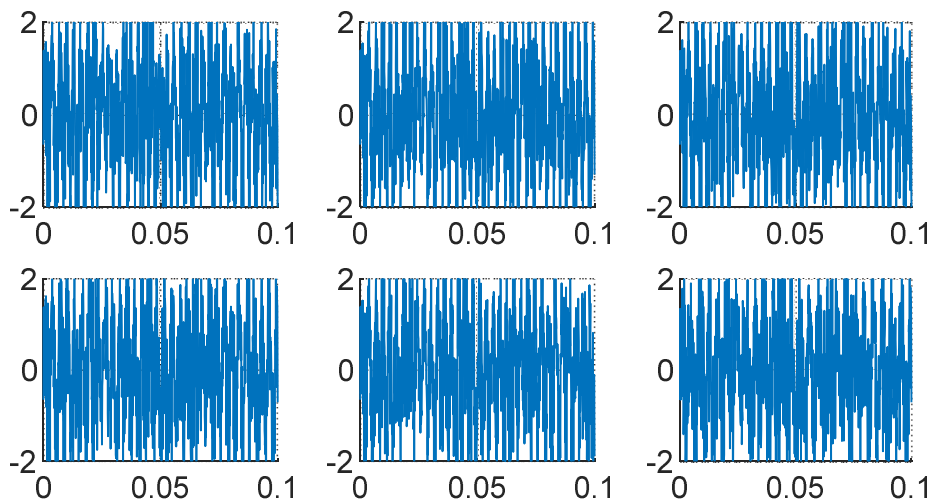


Рис. 3. Фрагмент обучающей выборки генератора
Fig. 3. Fragment of the training sample of the generator

Для обучения дискриминатора использовались чистые модельные сигналы. Фрагмент обучающей выборки дискриминатора представлен на рис. 4.

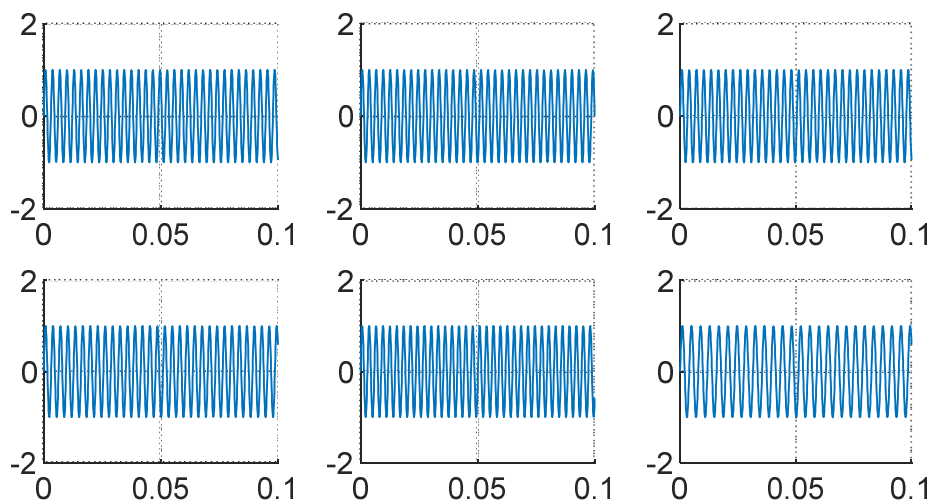


Рис. 4. Фрагмент обучающей выборки дискриминатора
Fig. 4. A fragment of the training sample of the discriminator

Результат работы нелинейного фильтра с использованием ГС ИНС на элементарной синусоиде с добавлением белого гауссовского шума представлен на рис. 5.

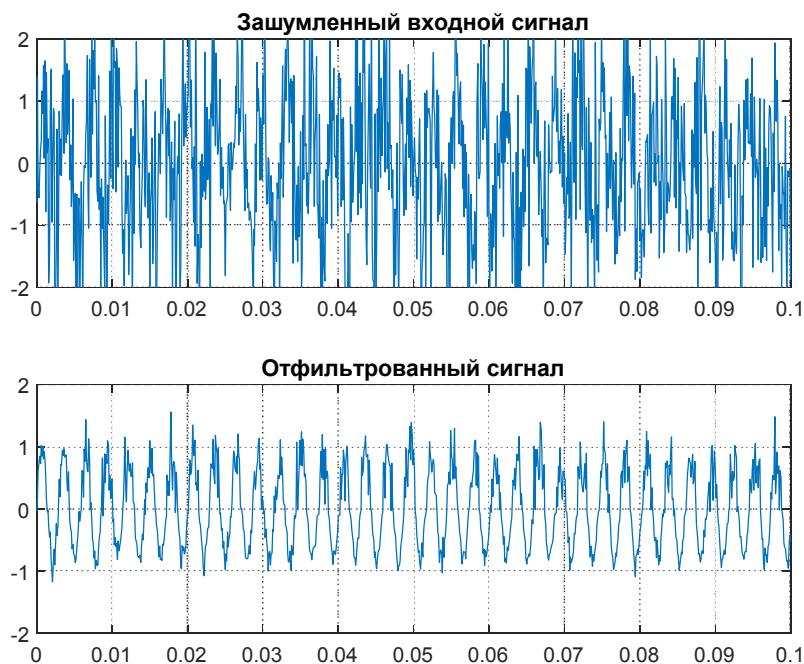


Рис. 5. Работа генеративно-сопоставительной сети на простом сигнале
Fig. 5. The work of the generative adversarial network on a simple signal

Результат работы генеративно-сопоставительной сети в ситуации, когда из синусоиды пропадает фрагмент сигнала, представлен на рис. 6.

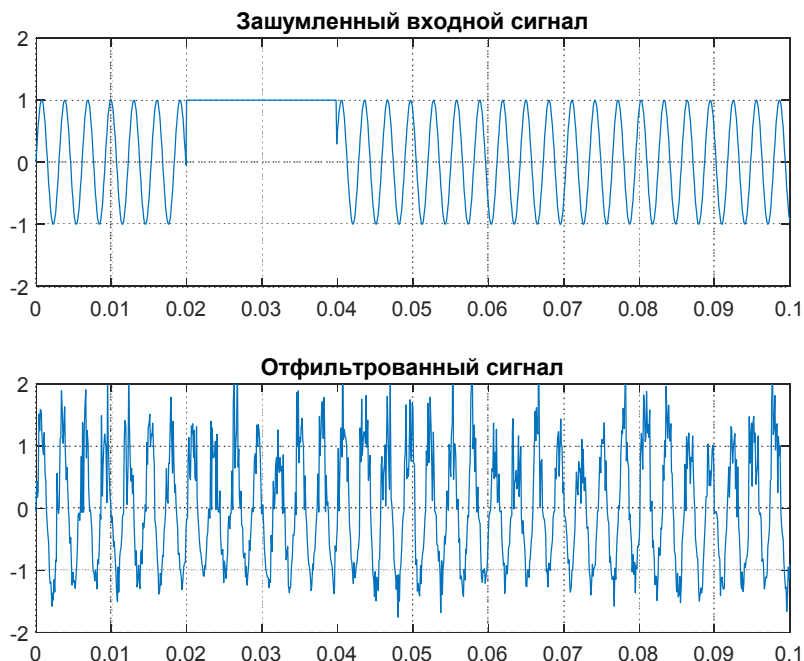


Рис. 6. Восстановление фрагмента синусоиды генеративно-сопоставительной сетью
Fig. 6. Reconstruction of a fragment of a sinusoid by a generative adversarial network

Затем ГС ИНС обучалась на сложном сигнале, представляющем сумму синусоид. Результат работы генеративной сети на сложном сигнале, в который был добавлен белый шум, изображен на рис. 7.

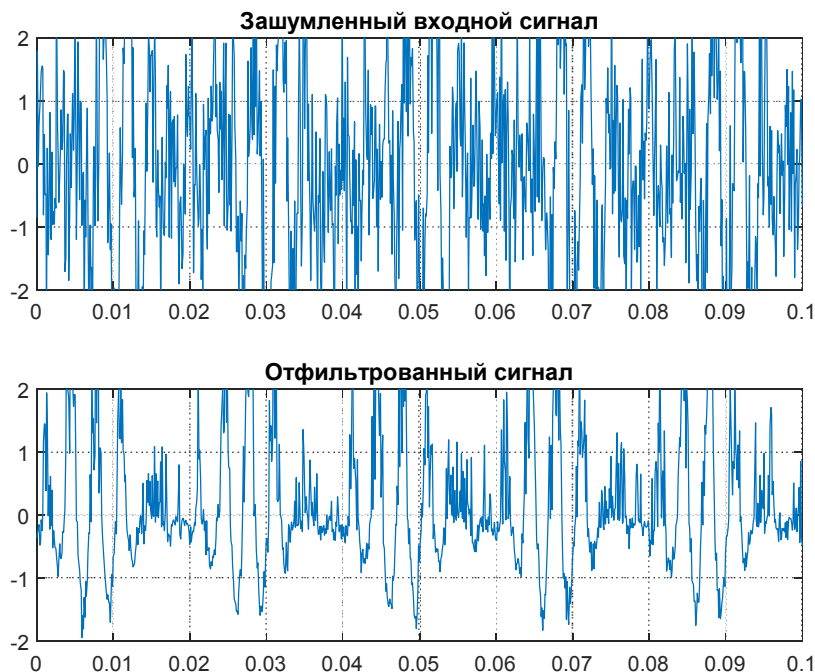


Рис. 7. Работа генеративно-сопоставительной сети на сложном сигнале с добавлением белого гауссовского шума
Fig. 7. The work of a generative adversarial network on a complex signal with the addition of white Gaussian noise

Результат восстановления сложного сигнала представлен на рис. 8.

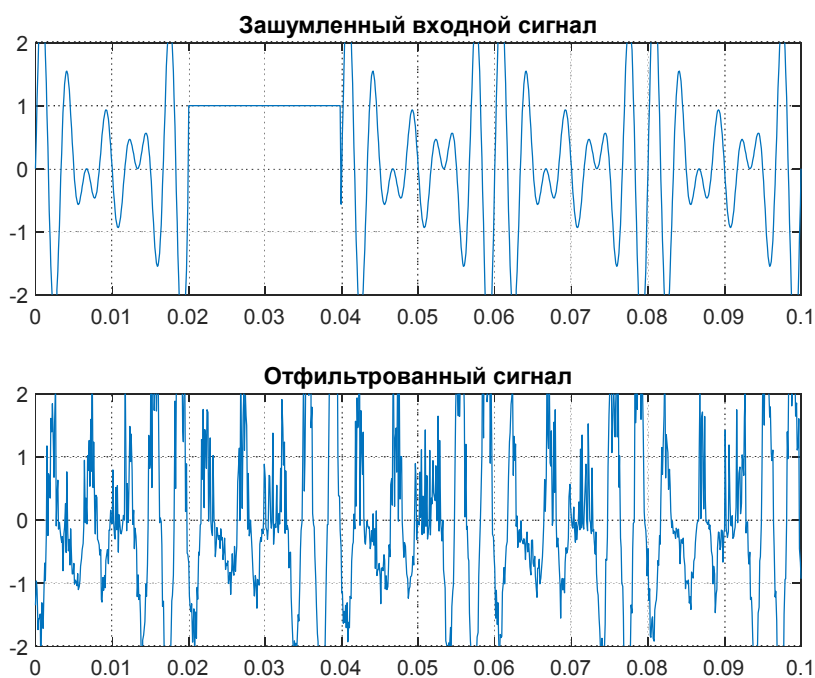


Рис. 8. Восстановление сложного сигнала
Fig. 8. Complex signal recovery

В завершающем исследовании ГС ИНС обучалась на сложном сигнале, представляющем модель реального информационного сигнала. Результат работы генеративной сети на модели реального сигнала, в который был добавлен белый шум, изображен на рис. 9.

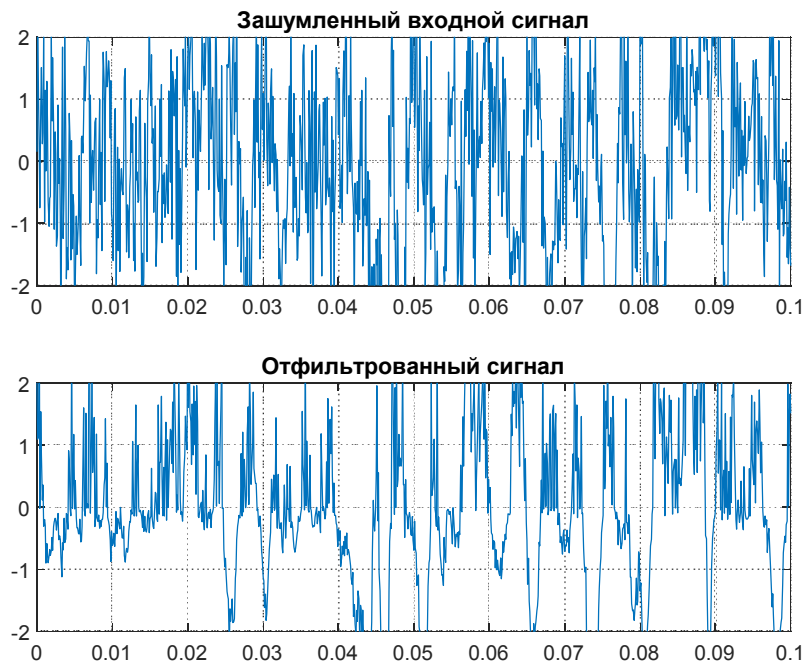


Рис. 9. Результат работы сети на модели реального сигнала, в который добавлен белый шум
Fig. 9. The result of the network operation on the model of a real signal, to which white noise is added

Результат восстановления сетью реального сигнала представлен на рис. 10.

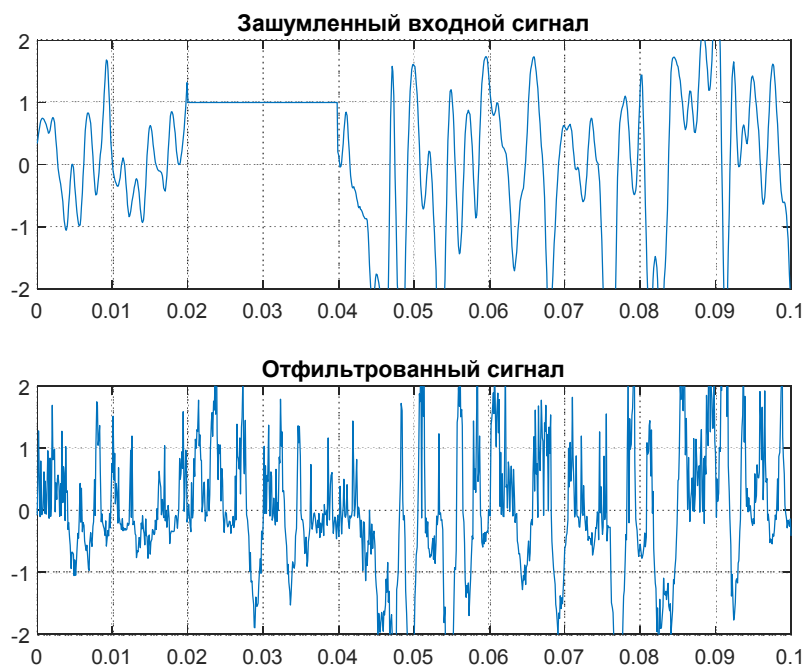


Рис. 10. Восстановление реального сигнала
Fig. 10. Reconstruction of the real signal

Заключение

ГС ИНС восстанавливает сигнал, похожий по форме на входной, но с примесью шума. Проблема заключается в структурах генератора и дискриминатора: количество и тип слоев, вид функции активации, размер слоев и т. д. Изменяя эти параметры, можно значительно улучшить результаты работы данного нелинейного цифрового фильтра.

Рассмотренный нелинейный цифровой фильтр с использованием ГС ИНС возможно широко применить в задачах, связанных с цифровой обработкой сигналов, восстановлением сигналов, подвергающихся как линейным, так и нелинейным искажениям [12–15].

Список литературы

1. Цибулис Д.Э., Рагозин А.Н., Даровских С.Н. Исследование цифровой фильтрации информационного сигнала с использованием искусственной нейронной сети автокодировщика // Информационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики: сб. науч. тр. II Международ. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 26–27 января 2022 года / под ред. В.П. Шувалова., сост. М.П. Карачарова. 2022. С. 144–149. EDN MNBGOL.
2. Цибулис Д.Э., Рагозин А.Н. Анализ информационных сигналов с использованием генеративно-состязательных нейронных сетей // Безопасность информационного пространства: сб. тр. XIX Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Екатеринбург, 08–11 декабря 2020 года. 2021. С. 40–44. EDN BCYSYJ.
3. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. 2-е изд., испр. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.
4. Зеленский А.А., Письменскова М.Н., Воронин В.В. Алгоритм поиска изображений в виде хэш-функций на основе глубоких нейросетевых технологий // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Т. 21, № 3. С. 57–62.
5. Акинина А.Н., Никифоров М.Б. Алгоритм детектирования несанкционированных свалок мусора на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 10. С. 321–329.
6. Анализ методов многомодального объединения информации для аудиовизуального распознавания речи / Д.В. Иванько, И.С. Кипяткова, А.Л. Ронжин, А.А. Карпов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 3. С. 387–401.
7. Детектирование неизвестных звуков для людей с нарушенным слухом на основе вариационного автоэнкодера / А.Х. Сарафасланиян, В.В. Чепраков, Д.А. Суворов и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2019. № 1 (124). С. 35–49.
8. Generative Adversarial Networks / I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza et al. Department of Computer Science and Research, University of Montreal. Montreal. QC H3C 3J7.
9. Arjovsky M., Chintala S., Bottou L. Wasserstein GAN. 06.12.2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1701.07875.pdf>.
10. Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks / Jun-Yan Zhu, Taesung Park, Phillip Isola, Alexei A. Efros. University of California at Berkeley, in ICCV, 2017. URL: <https://junyanz.github.io/CycleGAN/>.
11. Hesse C. Image-to-Image Demo. Interactive Image Translation with pix2pix-tensorflow. 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://www.newart.ru/htm/flash/risovalka_90.php.
12. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. Кн. 28. М.: Радиотехника, 2009. 432 с. (Научная серия «Нейрокомпьютеры и их применение»).
13. Аксенов С.В., Новосельцев В.Б. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / под общ. ред. В.Б. Новосельцева. Томск: Изд-во НТЛ, 2006. 128 с.
14. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 384 с.:
15. Фокин Г.А. Технологии программно-конфигурируемого радио: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 316 с.

References

1. Tsibulis D.E., Ragozin A.N., Darovskikh S.N. [Digital filtering research information signal using an artificial neural network of an autoencoder]. In: *Infokommunikatsionnye tekhnologii: aktual'nye voprosy tsifrovoy ekonomiki: sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Infocommunication technologies: topical issues of the digital economy: Collection of scientific papers of the II International Scientific and Practical Conference]. Ekaterinburg; 2022. P. 144–149. EDN MNBGOL. (In Russ.)

2. Tsibulis D.E., Ragozin A.N. [Analysis of information signals using generative-adversarial neural networks]. In: *Bezopasnost' informatsionnogo prostranstva: sbornik trudov XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Information Space Security: Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Ekaterinburg; 2021. P. 40–44. EDN BCYSYJ. (In Russ.)
3. Goodfellow J., Benjio I., Courville A. *Deep learning*. Transl from Engl. 2nd ed., rev. Moscow: DMK Press; 2018. 652 p. (In Russ.)
4. Zelensky A.A., Pismenskova M.M., Voronin V.V. Algorithm for image retravel in the space of hash functions based on the deep neural network technologies. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 2018;21(3):57–62. (In Russ.)
5. Akinina N.V., Nikiforov M.B. Algorithm for detecting unauthorized dumps based on the analysis of remote sensing data. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2019;(10):321–329. (In Russ.)
6. Ivan'ko D.V., Kipyatkova I.S., Ronzhin A.L., Karpov A.A. [Analysis of methods of multimodal information combining for audiovisual speech recognition]. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2016;16(3):387–401. (In Russ.)
7. Sarafaslanyan A.Kh., Cheprakov V.V., Suvorov D.A., Mozgovoy M.V., Volkov A.V. Employing a variational auto-encoder to detect unknown sounds for hearing-impaired people. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Series: Instrument engineering*. 2019;1(124):35–49. (In Russ.)
8. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M. et al. *Generative Adversarial Networks*. Department of Computer Science and Research, University of Montreal. Montreal. QC H3C 3J7.
9. Arjovsky M., Chintala S., Bottou L. Wasserstein GAN. 06.12.2017. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1701.07875.pdf>.
10. Jun-Yan Zhu, Taesung Park, Phillip Isola, Alexei A. Efros. *Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks*. University of California at Berkeley, in ICCV, 2017. Available at: <https://junyanz.github.io/CycleGAN/>.
11. Hesse C. *Image-to-Image Demo. Interactive Image Translation with pix2pix-tensorflow*. 2017. Available at: http://www.newart.ru/html/flash/risovalka_90.php.
12. Tatusov A.L. *Neyronnyye seti v zadachakh radiolokatsii. Kn. 28* [Neural networks in radar problems. Book 28]. Scientific series “Neuro-computers and their applications”. Moscow: Radiotekhnika; 2009. 432 p. (In Russ.)
13. Aksenov S.V., Novosel'tsev V.B. *Organizatsiya i ispol'zovaniye neyronnykh setey (metody i tekhnologii)* [Organization and use of neural networks (methods and technologies)]. Tomsk: NTL Publ., 2006. 128 p. (In Russ.)
14. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. 2nd ed., stereotype. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2013. 384 p.: (In Russ.)
15. Fokin G.A. *Tekhnologii programmno-konfiguriruyemogo radio: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Software-configurable radio technologies. Textbook for universities]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2019. 316 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Цибулис Дмитрий Эдуардович, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; inz.radio25k10@gmail.com.

Рагозин Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доц. кафедры защиты информации, доц. кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ragozinan@susu.ru.

Даровских Станислав Никифорович, д-р техн. наук, проф. кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; darovskikhsn@susu.ru.

Кулганатов Аскар Зайдакбаевич, аспирант кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kulganatov97@gmail.com.

Information about the authors

Dmitry E. Tsibulis, Postgraduate Student of the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; inz.radio25k10@gmail.com.

Andrey N. Ragozin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Information Security, Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia ragozinan@susu.ru.

Stanislav N. Darovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; darovskikhsn@susu.ru.

Askar Z. Kulganatov, Postgraduate Student of the Department of Electric Power Generation Stations, Networks and Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kulganatov97@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 08.02.2022

The article was submitted 08.02.2022

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:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
 - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
 - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
 - электронный адрес автора (e-mail);
 - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);

- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

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 Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@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., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

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 ВИНТИ. 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: 2.3.1 (05.13.01) – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки); 2.3.3 (05.13.06) – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4 (05.13.10) – Управление в организационных 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»
2022. Том 22, № 2

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 29.04.2022. Дата выхода в свет 05.05.2022. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 19,99. Тираж 500 экз. Заказ 106/148. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.