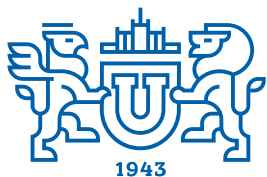


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2022
Т.22, № 1

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

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

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

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

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

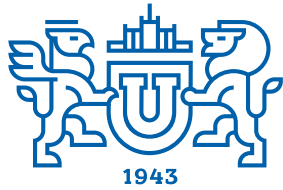
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного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

Редакционная коллегия:

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. 1

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,
AUTOMATIC CONTROL,
RADIO ELECTRONICS”

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

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

South Ural State University

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

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

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

Editorial Board:

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

- МУФТАХОВА Н.А., НАФИКОВ М.Р. Разработка инструментария управления жизненным циклом изделия с учетом его потенциалов 5
- ЮСУПОВА Н.И., ГАЯНОВА М.М., БОГДАНОВ М.Р. Извлечение информации об использовании информационных технологий для поддержки принятия решений в медицинской диагностике 14

Управление в технических системах

- ТЕЛЕГИН А.И. Аналитическое решение первой задачи динамики манипуляторов 28
- КОСТЫЛЕВА Л.Ю., ЛОГИНОВСКИЙ О.В., РЕЦ Е.А., ЯЧИКОВ И.М. Возможности использования математических моделей для теплового контроля дефектов многослойных биметаллических пластин 53

Инфокоммуникационные технологии и системы

- БОЛОДУРИНА И.П., ГРИШИНА Л.С., ЖИГАЛОВ А.Ю., ПАРФЁНОВ Д.И. Гибридная модель эффективного представления данных в беспроводных транспортных сетях с динамической топологией VANET 65
- ФОМИН Д.Г., ДАРОВСКИХ С.Н., ДУДАРЕВ Н.В., ПРОКОПОВ И.И., ДУДАРЕВ С.В. Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии 77

Управление в социально-экономических системах

- АББАЗОВ В.Р., БАЛУЕВ В.А., МЕЛЬНИКОВ А.В., РУСАНОВ М.А. Метод нахождения связанных показателей на основе анализа нормативно-правовых актов методами NLP 88
- ДРАНКО О.И., БЛАГОДАРНЫЙ Е.В. Модель оценки стоимости на примере предприятия металлургического сектора 97
- АВЕРИНА Т.А., БАРКАЛОВ С.А., ЧЕРНЫХ М.В. Разработка методики мониторинга качества инновационных строительных проектов на основе ситуационного подхода 106
- ГЕЛЬРУД Я.Д., ШЕСТАКОВА Л.И. Основы математического моделирования в политической науке 116

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

- КОДИРОВ Ш.Ш., ШЕСТАКОВ А.Л. Модель и алгоритм прогнозирования прихвата технологического инструмента по глубине ствола скважины на основе четырехмодульной нейронной сети 125

Краткие сообщения

- VLINOV A.V., HOLLAY A.V., ZAKHAROV V.V. Development of a management and monitoring system for a city farm 139
- КОВАЛЬ М.Е., ШИНКАРЕВ А.А., ЛОГИНОВСКАЯ В.О. О подходе использования headless CMS при разработке корпоративных интернет-сайтов 147

CONTENTS

Informatics and Computer Engineering

- MUFTAKHOVA N.A., NAFIKOV M.R. Development of a toolkit for managing the life cycle of a product taking into account its potentials 5
- YUSUPOVA N.I., GAYANOVA M.M., BOGDANOV M.R. Retrieving information about the use information technology to support decision-making in medical diagnostics 14

Control in Technical Systems

- TELEGIN A.I. Analytical solution of the first problem of the manipulators' dynamics 28
- KOSTYLEVA L.Yu., LOGINOVSKIY O.V., RETC E.A., YACHIKOV I.M. Possibilities of using mathematical models for thermal nondestructive testing of defects in multilayer bimetallic plates 53

Infocommunication Technologies and Systems

- BOLODURINA I.P., GRISHINA L.S., ZHIGALOV A.Yu., PARFENOV D.I. Hybrid model of effective data representation in wireless transport networks with dynamic VANET topology 65
- FOMIN D.G., DAROVSKIKH S.N., DUDAREV N.V., PROKOPOV I.I., DUDAREV S.V. Simulation of band pass filters based on multilayer technology 77

Control in Social and Economic Systems

- ABBAZOV V.R., BALUEV V.A., MELNIKOV A.V., RUSANOV M.A. Method of finding related indicators based on analysis of regulatory legal acts by NLP methods 88
- DRANKO O.I., BLAGODARNYY E.V. Model of valuation on the example of the metallurgical enterprise 97
- AVERINA T.A., BARKALOV S.A., CHERNYKH M.V. Development of a methodology for monitoring the quality of innovative construction projects based on a situational approach 106
- GELRUD Ya.D., SHESTAKOVA L.I. Fundamentals of mathematical modeling in political science 116

Automated Process Control Systems

- QODIROV Sh.Sh., SHESTAKOV A.L. Model and algorithm for predicting technological tool sticking by wellbore depth based on the four-module neural network 125

Brief Reports

- BLINOV A.V., HOLLAY A.V., ZAKHAROV V.V. Development of a management and monitoring system for a city farm 139
- KOVAL M.E., SHINKAREV A.A., LOGINOVSKAYA V.O. About the approach to use headless CMS in developing corporate internet sites 147

Информатика и вычислительная техника Informatics and Computer Engineering

Научная статья
УДК 005.41
doi: 10.14529/ctcr220101

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЯ С УЧЕТОМ ЕГО ПОТЕНЦИАЛОВ

Наталья Андреевна Муфтахова¹, Марсель Раисович Нафиков²

^{1,2} Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

¹ natefimenko@inbox.ru

² nafikovmr@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследований, а также изложены теоретические и математические модели систем управления жизненным циклом изделий авиационной промышленности с использованием теории потенциалов. Введена новая категория для управления жизненным циклом объекта – потенциал. **Цель.** Разработать инструментарий управления жизненным циклом на основе потенциалов объекта. В качестве объекта выбран узел авиационного двигателя. **Методы.** Основанием для формирования новых инструментов может быть ранее не отмечавшееся свойство объекта, проявляющееся как результат существенных трансформаций во внешней среде и содержащее новую информацию об объекте. Тенденция к развитию информационного обеспечения этапов жизненного цикла создает новые теории и подходы, среди которых представлена теория потенциалов. Предполагается, что разработанный инструментарий можно формализовать под все составные части авиационного двигателя на любом этапе жизненного цикла. Анализ накопленного потенциала связан с прошлыми изменениями. Отсчеты времени производятся против течения времени. Потенциал жизненного цикла вычисляется как накопленный потенциал всех потоков. Необходимым элементом является построение бизнес-модели процесса, включающей модель данных, модель организационной структуры подразделений, участвующих в технологическом процессе, и функциональную модель процесса. **Результаты.** Математическая модель управления жизненным циклом изделия разрабатывается с использованием следующих категорий: накопленный и прогнозный потенциалы. Потенциалы рассчитываются на основе исходных данных предприятия по объекту исследования. Накопленный потенциал учитывает материализацию прошлых потоков данных, поэтому анализ и моделирование увязаны с прошлыми изменениями. Смысл прогнозного потенциала заключается в определении рыночной стоимости будущих платежей. Предполагается, что в совокупности платежи определяют рыночную стоимость актива, связанного с ними. **Заключение.** Существующая структура организационных, функциональных элементов и элементов данных объекта достаточна для определения накопленного потенциала. Действительно, применительно к активам можно посчитать прогнозный и накопленный потенциал, где наблюдается четкая тенденция изменения потенциалов. Целесообразность вычисления потенциала вместо использования исходных данных вызвана большой адекватностью модели потенциала.

Ключевые слова: накопленный потенциал, прогнозный потенциал, авиационный двигатель, управление жизненным циклом

Для цитирования: Муфтахова Н.А., Нафиков М.Р. Разработка инструментария управления жизненным циклом изделия с учетом его потенциалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 5–13. doi: 10.14529/ctcr220101.

DEVELOPMENT OF A TOOLKIT FOR MANAGING THE LIFE CYCLE OF A PRODUCT TAKING INTO ACCOUNT ITS POTENTIALS

Natalia A. Muftakhova¹, Marsel R. Nafikov²

^{1,2} Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

¹ natefimenko@inbox.ru

² nafikovmr@mail.ru

Abstract. The article presents the results of research, as well as sets forth theoretical and mathematical models of life cycle management systems for products of the aviation industry using the theory of potentials. A new category has been introduced for managing the life cycle of an object - potential. **Aim.** Develop a toolkit for life cycle management based on the potentials of the object. An aircraft engine unit was selected as an object. **Methods.** The basis for the formation of new tools may be a previously unremarked property of an object, which manifests itself as a result of significant transformations in the external environment and contains new information about the object. The trend towards the development of information support for the stages of the life cycle creates new theories and approaches, among which the theory of potentials is presented. It is assumed that the developed toolkit can be formalized for all components of an aircraft engine at any stage of the life cycle. The accumulated potential analysis is related to past changes. Time is counted against the flow of time. Life cycle potential is calculated as the accumulated potential of all threads. A necessary element is the construction of a business model of the process, which includes a data model, a model of the organizational structure of departments involved in the technological process and a functional model of the process. **Results.** A mathematical model of product lifecycle management is developed using the following categories: accumulated and predicted potentials. Potentials are calculated based on the initial data of the enterprise for the object of study. The accumulated potential takes into account the materialization of past data streams, therefore analysis and modeling are linked to past changes. The meaning of the predictive potential is to determine the market value of future payments. Collectively, the payments are assumed to determine the market value of the asset associated with them. **Conclusion.** The existing structure of organizational, functional elements and data elements of the object is sufficient to determine the accumulated potential. Indeed, in relation to assets, it is possible to calculate the predicted and accumulated potential where there is a clear trend in the potential change. The feasibility of calculating the potential instead of using the initial data is caused by the great adequacy of the potential model.

Keywords: accumulated potential, forecast potential, aircraft engine, life cycle management

For citation: Muftakhova N.A., Nafikov M.R. Development of a toolkit for managing the life cycle of a product taking into account its potentials. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):5–13. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220101.

Введение

Идея управления жизненным циклом авиационного двигателя обсуждается в настоящее время. Тенденции развития авиастроения привели к интенсивному внедрению информационных технологий, поддерживающих управление жизненным циклом авиационных изделий. Сложные системы, обеспечивающие выпуск наукоемких изделий, имеют свойства, сходные со свойствами самих изделий, для них характерны те же стадии жизненного цикла, похожие инструменты и методы анализа и управления [1–9].

Поэтому поиск новых инструментов и моделей, учитывающих неопределенность, в дополнение к системным становится актуальным и поддерживается различными учеными, занимающимися экономическими и смежными с ними вопросами. Следует отметить, что в [10, 11] сформулирован подход, базирующийся на описании формализованного свойства социофизических объектов, названного накопленными и прогнозными потенциалами.

Методология

Математическая модель управления жизненным циклом изделия разработана с использованием следующих категорий: накопленный и прогнозные потенциалы.

Накопленный потенциал учитывает материализацию прошлых потоков данных, поэтому анализ и моделирование увязаны с прошлыми изменениями [11, 12].

Собственный накопленный потенциал по переменной вычисляется по формулам:

$$F \int_{\tau=0}^{\infty} (t - \tau)\psi(\tau) = \sum_{i=0}^{\infty} f(t - \tau_i)\psi(\tau_i); \quad (1)$$

$$\psi(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau = 0 \\ 0, & \tau = \infty \end{cases}; \quad (2)$$

$$\psi(\tau) = e^{-\alpha\tau} \approx \frac{1}{1+\alpha\tau}; \quad (3)$$

$$F = \sum \left(q_i(t - \tau) \cdot \frac{1}{1+\alpha(t)} \right), \quad (4)$$

где F – накопленный потенциал;

q_i – значение переменной в данном периоде;

α – суммарная ставка рефинансирования.

Прогнозные потенциалы по каждой из переменных социофизического объекта рассчитываются по формуле

$$\Pi = \sum \Pi_i = \sum \left(q_i(t + \tau) \cdot \frac{1}{1+\alpha(t)} \right), \quad (5)$$

где Π – прогнозный потенциал;

Π_i – потенциал за период;

i – номер периода по удалённости от настоящего времени;

q_i – значение переменной в данном периоде;

α – суммарная ставка рефинансирования.

В качестве объекта исследования выступает авиационный двигатель.

На рис. 1 представлена структура потенциалов авиационного двигателя с точки зрения авторов.

В данной статье рассчитываются следующие категории потенциалов: экономический и технологический.

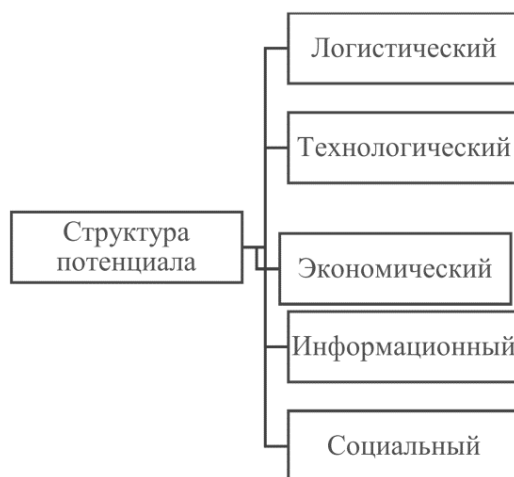


Рис. 1. Структура потенциалов
Fig. 1. Potential structure

Технологический потенциал – затраченное время на технологическую обработку составных деталей и узлов авиационного двигателя. Экономический потенциал – суммарные экономические затраты.

На рис. 2 представлена система управления жизненным циклом изделия с учетом его потенциалов.

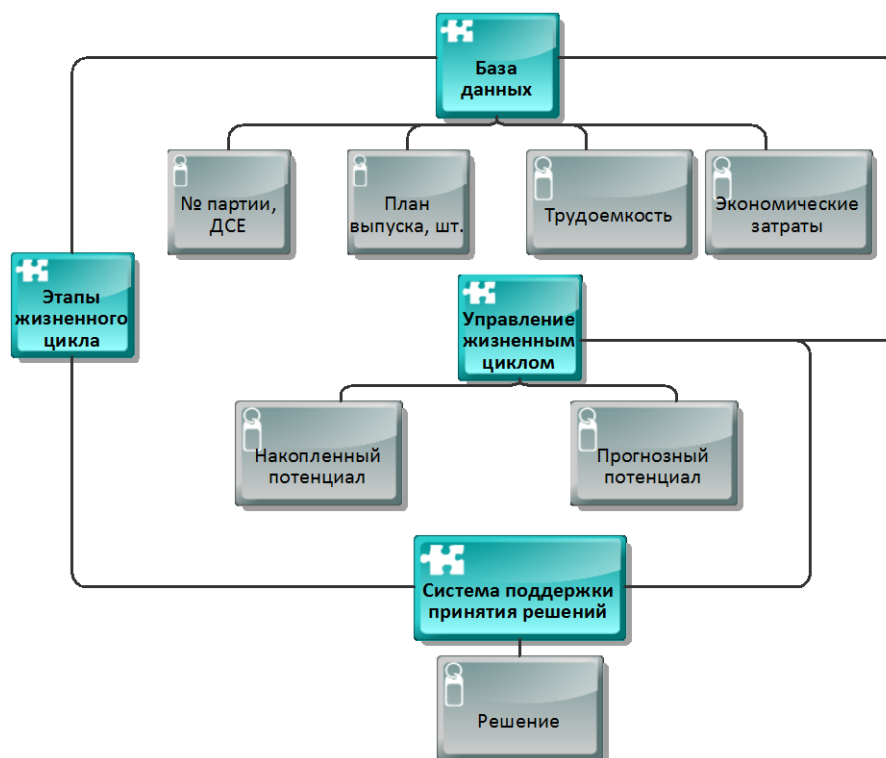


Рис. 2. Система управления жизненным циклом
Fig. 2. Lifecycle management system

Исходные данные планируются на предприятии и корректируются согласно этапу производства. Затем происходит отбор данных по заданным критериям, проводится контроль и анализ, расчет накопленного и прогнозного потенциалов. Итоговые значения передаются в систему поддержки принятия решений, делается вывод о системе [13, 14].

Расчет накопленного потенциала проводился по формулам (1)–(4). В качестве исходных данных использована трудоемкость технологической обработки узла авиационного двигателя.

Итоговые расчеты технологического накопленного потенциала представлены в табл. 1.

Исходные значения и значения расчета

Таблица 1

Initial values and calculation values

Table 1

Период	Динамика исходных данных по трудоёмкости, н-час	Динамика технологического потенциала, н-час
Январь	472	472,0
Февраль	1298	991,2
Март	0	2419,0
Апрель	1062	2419,0
Май	1652	3584,5
Июнь	944	5397,6
Июль	1416	6428,9
Август	1062	7972,4
Сентябрь	1770	9130,0
Октябрь	1180	11 054,8
Ноябрь	1534	12 335,1
Декабрь	1062	13 995,7

На рис. 3 представлены графики динамики исходных данных и накопленного технологического потенциала объекта исследования.

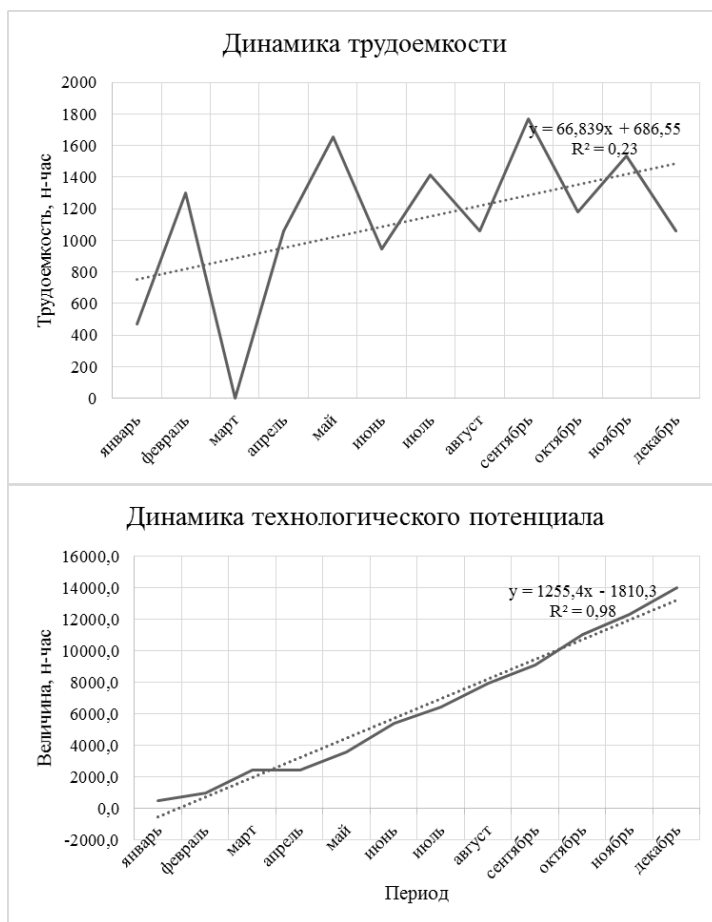


Рис. 3. Динамика трудоемкости и динамика накопленного технологического потенциала
Fig. 3. Dynamics of labor intensity and dynamics of accumulated technological potential

Как видно из рис. 3, график исходных данных имеет нелинейный характер, коэффициент детерминации равен 0,23, что свидетельствует о низком качестве математической модели. График динамики технологического потенциала имеет линейный характер, коэффициент детерминации равен 0,98. Это можно оценить как адекватную модель и перейти к анализу системы.

Итоговые расчеты экономического накопленного потенциала представлены в табл. 2.

Исходные значения и значения расчета

Таблица 2

Initial values and calculation values

Table 2

Период	Динамика исходных данных по затратам, тыс. руб.	Динамика экономического потенциала, тыс. руб.
Январь	1638,6	1638,6
Февраль	4494,2	51 075,3
Март	0,0	51 075,3
Апрель	3686,8	91 630,7
Май	5735,1	153 282,9
Июнь	3277,2	188 512,8
Июль	4915,8	238 899,8
Август	3686,8	275 768,2
Сентябрь	6144,7	337 215,7
Октябрь	4096,5	377 156,6
Ноябрь	5325,4	427 748,3
Декабрь	3686,8	461 851,7

На рис. 4 представлены графики динамики исходных данных и накопленного экономического потенциала объекта исследования.

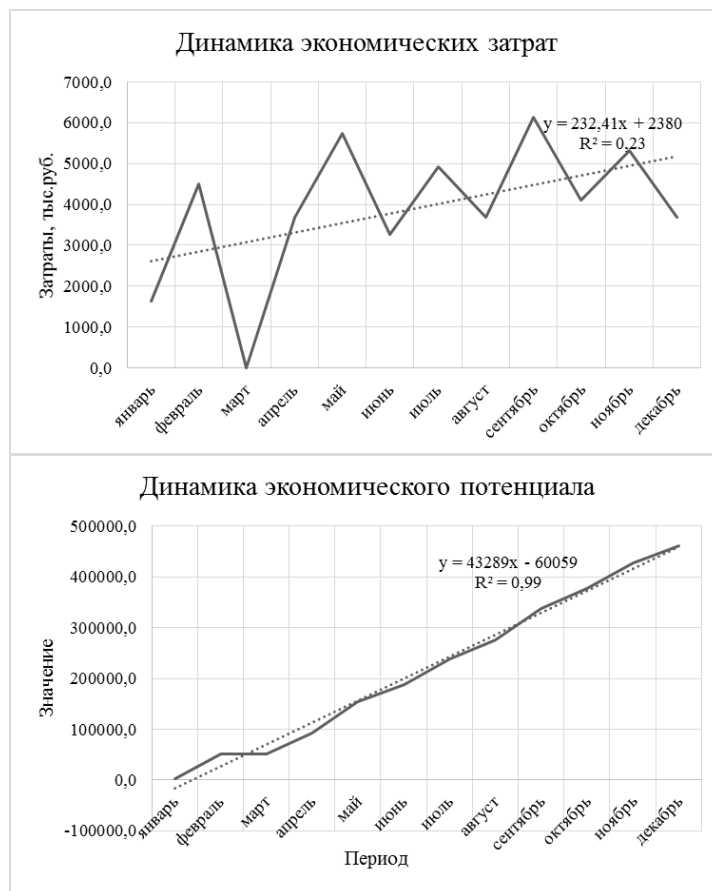


Рис. 4. Динамика экономических затрат и динамика накопленного технологического потенциала
Fig. 4. Dynamics of economic costs and dynamics of accumulated technological potential

Как видно из рис. 4, график исходных данных имеет нелинейный характер, коэффициент детерминации равен 0,24, что свидетельствует о низком качестве математической модели. График динамики технологического потенциала имеет линейный характер, коэффициент детерминации равен 0,99. Это можно оценить как адекватную модель и перейти к анализу системы.

На рис. 5 изображен график соотношения накопленного технологического и экономического потенциалов.

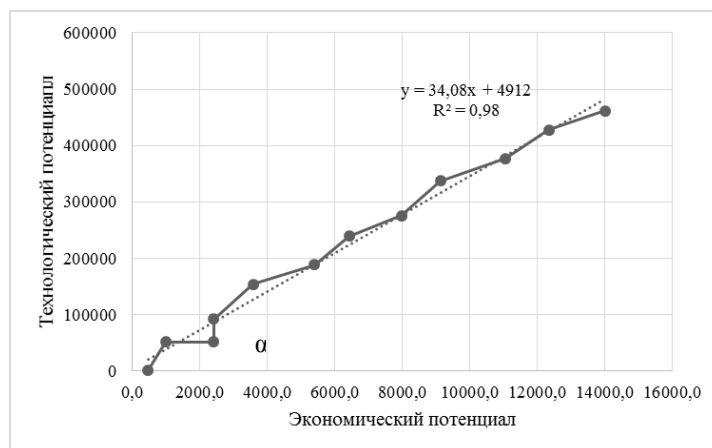


Рис. 5. Соотношение накопленного технологического и экономического потенциалов
Fig. 5. The ratio of the accumulated technological and economic potential

Расчет прогнозного потенциала проводился с использованием исходных данных из табл. 1, 2 по формуле (5).

На рис. 6 представлены динамика технологического и экономического потенциала изделия.

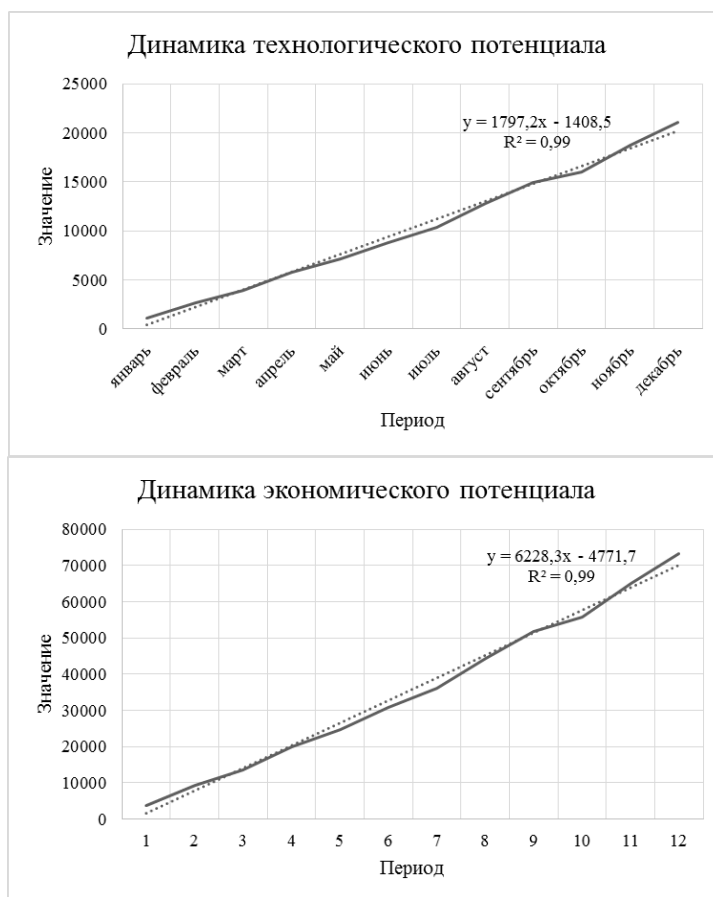


Рис. 6. Динамика прогнозного технологического и экономического потенциалов
Fig. 6. Dynamics of predicted technological and economic potentials

Динамика технологического и экономического потенциалов имеет линейный характер, что позволяет перейти к анализу системы.

На рис. 7 изображен график соотношения прогнозного технологического и экономического потенциалов.

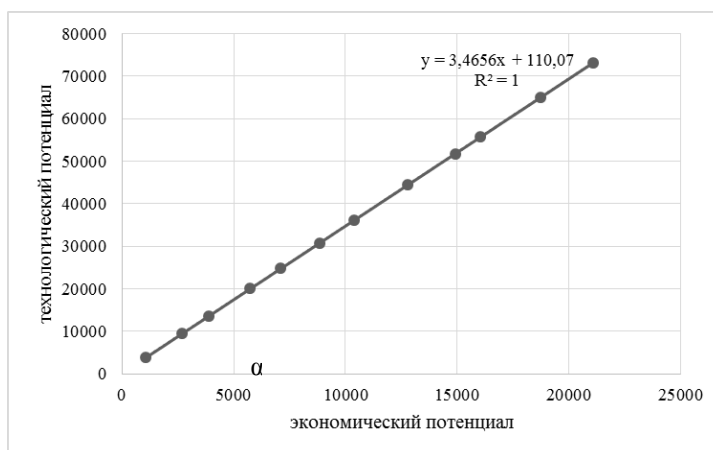


Рис. 7. Соотношение прогнозного технологического и экономического потенциалов
Fig. 7. The ratio of predicted technological and economic potentials

Выводы

Соотношение накопленного технологического и экономического потенциалов (см. рис. 5) интерпретируется следующим образом: тангенс угла α – это коэффициент рыночной доходности [1]. Данный коэффициент численно равен коэффициенту регрессионного уравнения (3,5). Следовательно, для поддержания положительной динамики накопленного потенциала необходимо 99 % накопленного потенциала готовой продукции. Аналогично для интерпретации соотношения прогнозных потенциалов: для поддержания положительной динамики накопленного потенциала необходимо 100 % накопленного потенциала готовой продукции [15].

Сравнение графиков (см. рис. 4, 6) иллюстрирует различия в продуктивной составляющей. Целесообразность вычисления потенциала вместо использования исходных данных вызвана большой адекватностью модели потенциала, а также возможностью построения динамической модели управления объектом. График исходных данных имеет нелинейный характер, коэффициент детерминации равен меньше 0,5, что свидетельствует о низком качестве математической модели. График динамики потенциала имеет линейный характер, коэффициент детерминации близок к 0,99. Это можно оценить как адекватную модель и перейти к анализу системы.

Список литературы

1. Мустаев И.З., Иванов В.Ю., Куликов Г.Г., Мустаев Т.И. Проект создания авиационного изделия как особый класс инноваций // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 2. С. 145–153. doi: 10.14529/ctcr210214.
2. Кумагина Е.А., Неймарк Е.А. Модели жизненного цикла и технологии проектирования программного обеспечения: учеб.-метод. пособие. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2016. 41 с.
3. Зараменских Е.П. Управление жизненным циклом информационных систем: моногр. Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2014. 270 с.
4. Доросинский Л.Г., Зверева О.М. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия. Ульяновск: Зебра, 2016. 243 с.
5. Журавлев В.Ю. Управление жизненным циклом изделий ракетно-космической техники: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2015. 194 с.
6. Шустов С.А., Крупенич И.Н. CALS/PLM технологии. Текст лекций. Самара, 2013.
7. Ramis Ferrer, B., Mohammed W.M., Ahmad M. et al. Comparing ontologies and databases: a critical review of lifecycle engineering models in manufacturing // Knowledge and Information Systems. 2021. Vol. 63. P. 1271–1304. <https://doi.org/10.1007/s10115-021-01558-4>.
8. Sudarsan R., Fenves S.J., Sriram R.D., Wang F. A product information modeling framework for product lifecycle management // Computer-Aided Design. 2005. Vol. 37, iss. 13. P. 1399–1411. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2005.02.010>.
9. Li J., Tao F., Cheng Y., Zhao L. Big data in product lifecycle management // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 81. P. 667–684. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7151-x>.
10. Мустаев И.З. Экономические модели инноватики. Уфа: РИК УГАТУ, 2013. 202 с.
11. Мустаев И.З. Социофизические модели инноватики. Уфа: РИК УГАТУ, 2017. 174 с.
12. Мустаев И.З. Механика живых и интеллектуальных систем: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2020. 160 с.
13. Губич Л.В., Ковалев М.Я., Паткевич Н.И. Внедрение на промышленных предприятиях информационных технологий поддержки жизненного цикла продукции. Минск: Беларуская Навука, 2012. 190 с.
14. Скворцов А.В., Схиртладзе А.Г., Чмырь Д.А. Автоматизация управления жизненным циклом продукции: учеб. М.: Издат. центр «Академия», 2013. 320 с.
15. Loos L., Verbeeck K., Laet L. Data visualisation as a tool for informed structural design // Computer-Aided Design. 2019. Vol. 115. P. 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.003>.

References

1. Mustaev I.Z., Ivanov V.Yu., Kulikov G.G., Mustaev T.I. The Project of Creation of an Aviation Product as a Special Class of Innovation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(2):145–153. (in Russ.) doi: 10.14529/ctcr210214.
2. Kumagina E.A., Neimark E.A. *Modeli zhiznennogo tsikla i tekhnologii proektirovaniya programmnogo obespecheniya: ucheb.-metod. posobie*. Nizhnii Novgorod: NNSU Publ.; 2016. 41 p. (In Russ.)
3. Zaramenskikh E.P. *Upravlenie zhiznennym tsiklom informatsionnykh sistem: monogr.* Novosibirsk: Center for the Development of Scientific Cooperation Publ.; 2014. 270 p. (In Russ.)
4. Dorosinskii L.G., Zvereva O.M. *Informatsionnye tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla izdeliya*. Ul'yanskiy: Zebra; 2016. 243 p. (In Russ.)
5. Zhuravlev V.Yu. *Upravlenie zhiznennym tsiklom izdelii raketno-kosmicheskoi tekhniki: ucheb. posobie*. Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University; 2015. 270 p. (In Russ.)
6. Shustov S.A., Krupenich I.N. *CALS/PLM tekhnologii. Tekst leksii*. Samara; 2013. (In Russ.)
7. Ramis Ferrer B., Mohammed W.M., Ahmad M. et al. Comparing ontologies and databases: a critical review of lifecycle engineering models in manufacturing. *Knowledge and Information Systems*. 2021;63:1271–1304. <https://doi.org/10.1007/s10115-021-01558-4>.
8. Sudarsan R., Fenves S.J., Sriram R.D., Wang F. A product information modeling framework for product lifecycle management. *Comput Aided Des*. 2005;37(13):1399–1411. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2005.02.010>.
9. Li J., Tao F., Cheng Y. et al. Big Data in product lifecycle management. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015;81:667–684. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7151-x>.
10. Mustaev I.Z. *Ekonomicheskie modeli innovatiki*. Ufa: EPC USATU; 2013. 202 p. (In Russ.)
11. Mustaev I.Z. *Sotsiofizicheskie modeli innovatiki*. Ufa: EPC USATU; 2017. 174 p. (In Russ.)
12. Mustaev I.Z. *Mekhanika zhivyykh i intellektual'nykh sistem: ucheb. posobie*. Ufa: USATU; 2020. 160 p. (In Russ.)
13. Gubich L.V., Kovalev M.Ya., Patkevich N.I. *Vnedrenie na promyshlennyykh predpriyatiyakh informatsionnykh tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla produktsii*. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2012. 190 p. (In Russ.)
14. Skvortsov A.V., Skhirtladze A.G., Chmyr' D.A. *Avtomatizatsiya upravleniya zhiznennym tsiklom produktsii: ucheb.* Moscow: Akademiya Publ.; 2013. 320 p. (In Russ.)
15. Loos L., Verbeeck K., Laet L. Data visualisation as a tool for informed structural design. *Comput Aided Des*. 2019;115:267–276. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.003>.

Информация об авторах

Муфтахова Наталия Андреевна, старший преподаватель кафедры управления инновациями, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия; natefimenko@inbox.ru.

Нафиков Марсель Раисович, старший преподаватель кафедры управления инновациями, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия; nafikovmr@mail.ru.

Information about the authors

Natalia A. Muftakhova, Senior Lecturer of the Department of Innovation Management, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; natefimenko@inbox.ru.

Marsel R. Nafikov, Senior Lecturer of the Department of Innovation Management, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; nafikovmr@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 22.12.2021; одобрена после рецензирования 11.01.2022; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 22.12.2021; approved after reviewing 11.01.2022; accepted for publication 17.01.2022.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Нафиса Исламовна Юсупова¹, Майя Марсовна Гаянова²,
Марат Робертович Богданов³

^{1, 2, 3} Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

¹ yusupova.ni@ugatu.su

² gayanova.mm@ugatu.su

³ bogdanov.mr@ugatu.su

Аннотация. Использование информационных технологий в медицинской деятельности радикально меняет постановку, способы и средства решения большинства практических задач. Переход на современные информационные технологии обеспечивает новые возможности и улучшает качество сервиса, сокращает время обследования, увеличивает точность диагностики и т. д. **Цель исследования:** извлечение информации об использовании информационных технологий для поддержки принятия решений в медицинской диагностике на основе анализа публикаций в этой области. **Материалы и методы.** Для формального представления процесса структурно-семантического анализа информации об использовании ИТ в медицине построена функциональная модель в нотации IDEF0. При проведении исследований в конкретной предметной области требуется проведение анализа известных научных результатов и практических решений, для чего используются научные публикации, размещенные в различных источниках. Существуют платформы, где собрана информация о таких данных, позволяющие определить количественные показатели публикации, их специфические характеристики и т. д. Для выявления динамики появления публикаций, сравнительного анализа результативности различных ученых и исследовательских организаций, определения публикационной активности в журнальном секторе использованы инструменты семантического анализа. Для определения особенностей публикационной активности аналитиком, в качестве которого выступает специалист по семантическому анализу, проведен дополнительный анализ. Для обработки собранной информации использованы методы статистического анализа. На текущий момент собран небольшой объем данных, в применении специализированных инструментов анализа нет необходимости, для построения диаграмм использованы инструменты Excel. **Результаты.** Выявлены ключевые характеристики публикаций по анализируемой тематике, динамика появления статей, наиболее активные авторы, научные школы и наиболее популярные журналы, в которых опубликованы результаты исследований; приведены результаты извлечения информации об исследованиях в области использования ИТ в кардиологии из наиболее востребованных публикаций активных авторов. **Заключение.** Анализ публикаций на основе данных платформы elibrary.ru является предварительным этапом изучения научных текстов по выбранной тематике исследований, в дальнейшем необходимо разработать информационную систему для поддержки исследователей скомплексированными показателями и данными на основе анализа научных текстов.

Ключевые слова: извлечение информации, слабоструктурированная информация, семантический анализ, система поддержки принятия решений, медицинская диагностика

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения по Государственному заданию № FEUE-2020-0007, при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00780.

Для цитирования: Юсупова Н.И., Гаянова М.М., Богданов М.Р. Извлечение информации об использовании информационных технологий для поддержки принятия решений в медицинской диагностике // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 14–27. doi: 10.14529/ctcr220102.

RETRIEVING INFORMATION ABOUT THE USE INFORMATION TECHNOLOGY TO SUPPORT DECISION-MAKING IN MEDICAL DIAGNOSTICS

Nafisa I. Yusupova¹, Maya M. Gayanova², Marat R. Bogdanov³

^{1, 2, 3} Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

¹ yusupova.ni@ugatu.su

² gayanova.mm@ugatu.su

³ bogdanov.mr@ugatu.su

Abstract. The use of information technology in medical practice radically changes the formulation, methods and means of solving most practical problems. The transition to modern information technologies provides new opportunities and improves the quality of service, reduces examination time, increases diagnostic accuracy, etc. **Purpose of the study.** Extraction of information about the use of information technology for decision support in medical diagnostics based on the analysis of publications in this field. **Materials and methods.** For a formal representation of the process of structural-semantic analysis of information on the use of IT in medicine, a functional model was built in the IDEF0 notation. When conducting research in a specific subject area, an analysis of known scientific results and practical solutions is required, for which scientific publications posted in various sources are used. There are platforms where information about such data is collected, allowing to determine the quantitative indicators of the publication, their specific characteristics, etc. Semantic analysis tools were used to identify the dynamics of the appearance of publications; to make comparative analysis of the effectiveness of various scientists and research organizations; to determine publishing activity in the journal sector. To determine the features of publishing activity, an additional analysis was conducted by the analyst, who is a specialist in semantic analysis. Statistical analysis methods were used to process the collected information. Since a small amount of data has been collected, there is no need to use specialized analysis tools, and Excel tools were used to build charts. **Results.** The key characteristics of publications on the analyzed topic, the dynamics of the appearance of articles, the most active authors, scientific schools and the most popular journals in which the research results are published are identified. The results of extracting information about research in the field of IT use in cardiology from the most popular publications of active authors are presented. **Conclusion.** The analysis of publications based on the data of the eLibrary.ru platform is a preliminary stage in the study of scientific texts on a selected research topic. For the future research, it is necessary to develop an information system to support researchers with complex indicators and data based on the analysis of scientific texts.

Keywords: information extraction, semi-structured information, semantic analysis, decision support system, medical diagnostics

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the implementation of the State Assignment No. FEUE-2020-0007, with the support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 19-07-00780.

For citation: Yusupova N.I., Gayanova M.M., Bogdanov M.R. Retrieving information about the use information technology to support decision-making in medical diagnostics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(1):14–27. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220102.

Введение

Развитие информационных технологий дает возможность получать, анализировать, обрабатывать и хранить огромные массивы разнородной информации. Использование этих технологий в медицинской деятельности радикально меняет постановку, способы и средства решения большинства практических задач; переход на современные информационные технологии (ИТ) обеспечивает ряд новых возможностей и интеграцию с системами цифровой диагностики [1], что улучшает качество сервиса, сокращает время обследования, увеличивает точность диагностики, позволяет проводить удаленные консультации и т. д.

Исследованиями в области медицинской диагностики с использованием ИТ для повышения эффективности активно занимаются ученые у нас в стране [2–13] и за рубежом [14–17]. В связи с высокой исследовательской активностью в рассматриваемой области возникает вопрос, как оп-

ределить основные тренды научных исследований на основе больших объемов информации, которая является слабоструктурированной.

Данная статья посвящена методике извлечения информации об использовании информационных технологий для поддержки принятия решений в медицинской диагностике и результатам ее применения. Поскольку необходимость использования информационных технологий в медицине не вызывает сомнений, перед авторами стояла задача – выяснить, в каком состоянии находится этот вопрос.

1. Постановка задачи

Для получения информации на основании официальных данных об основных тенденциях исследований в области использования ИТ для поддержки принятия решений в медицинской диагностике необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить динамику исследовательской деятельности в целом;
- 2) выявить лидеров (ученых, научные школы, организации) в указанных областях научных исследований;
- 3) определить наиболее интересные научные и практические результаты, полученные в последнее время.

Формальное представление процесса структурно-семантического анализа информации об использовании ИТ в медицине представлено на рис. 1 в виде функциональной модели в нотации IDEF0.

Для решения этих задач необходимо определить:

- 4) методику сбора и извлечения информации об исследовательской активности;
- 5) доступные информационные ресурсы, которые можно использовать для сбора информации;
- 6) методы обработки информации.

2. Предлагаемая методика сбора и извлечения информации.

Выбор информационных ресурсов

Анализ известных научных результатов и практических решений, которые получены и используются в научных лабораториях разных организаций, является необходимым этапом при проведении исследований в конкретной предметной области.

Для проведения такого анализа можно использовать научные публикации, которые размещены в различных источниках. Речь идет о монографиях, статьях, отчетах и других материалах, которые публикуются на электронных ресурсах.

Специально организованные платформы, где собирается информация о таких данных, позволяют определить количественные показатели публикации, их специфические характеристики, которые дают внешнее представление о результатах семантического анализа публикации в конкретной предметной области [9].

Инструменты семантического анализа позволяют провести исследование научных текстов с целью:

- выявления динамики появления публикаций в виде временных рядов с интервалом дискретизации в один год;
- сравнительного анализа результативности различных ученых и исследовательских организаций, работающих в рассматриваемой предметной области;
- определения публикационной активности в журнальном секторе.

В качестве информационной базы будем использовать научные тексты популярной научной электронной библиотеки elibrary.ru, хотя в ней сосредоточена информация только о русскоязычных текстах. Инструменты данной библиотеки выдают некоторые количественные показатели в виде распределения числа публикаций по выбранной теме в зависимости от разных параметров. Дополнительный анализ, проведенный аналитиком, в качестве которого выступает специалист по семантическому анализу, с помощью других средств позволяет определить особенности публикационной активности.

Для обработки информации можно использовать статистический анализ. Для малого объема данных достаточно использовать инструменты Excel для построения диаграмм, но для дальнейших исследований требуется разработка информационной системы для поддержки исследователей на основе анализа научных текстов.

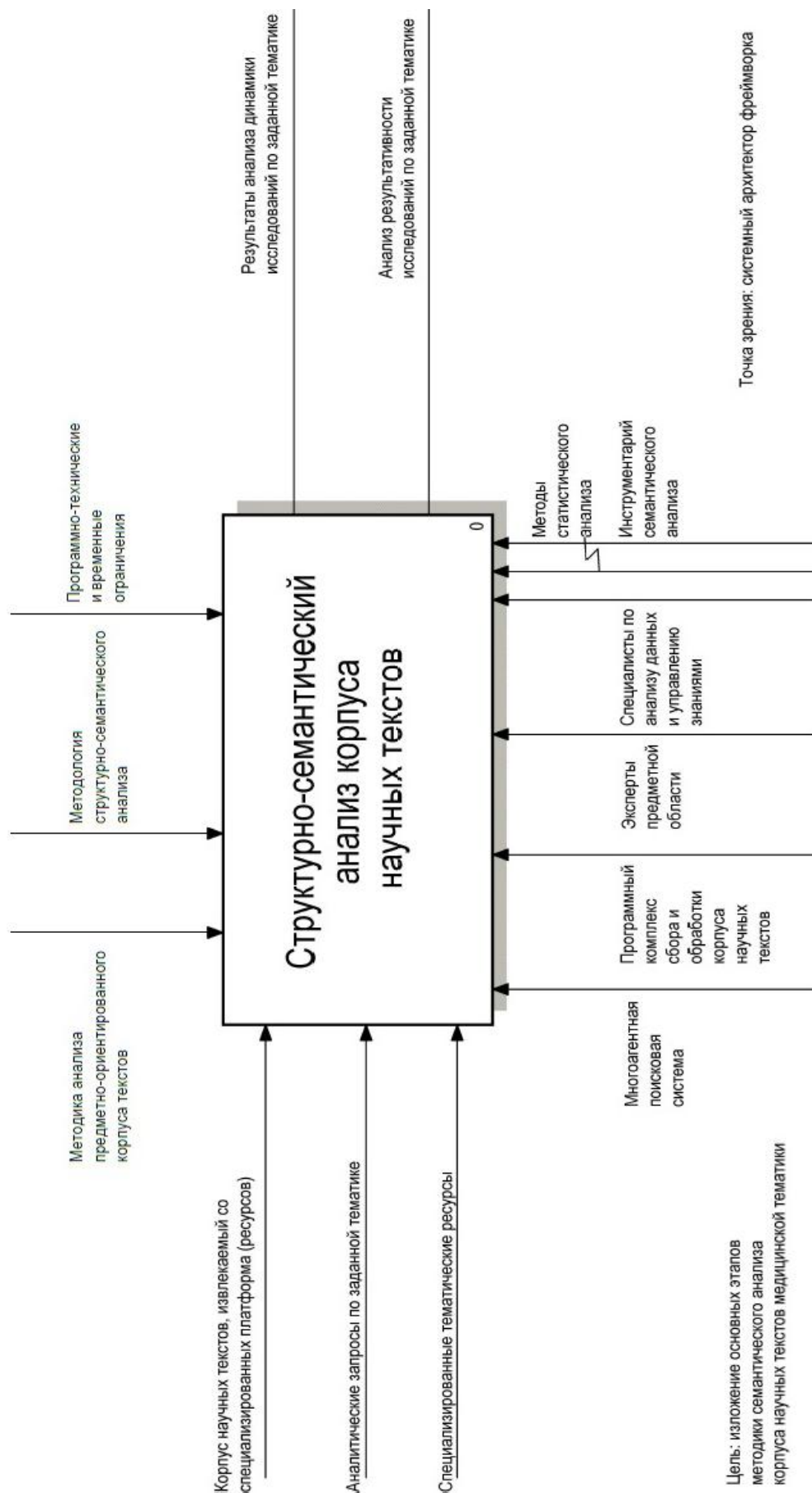


Рис. 1. Функциональная модель структурно-семантического анализа научных текстов
Fig. 1. Functional model of structural-semantic analysis of scientific texts

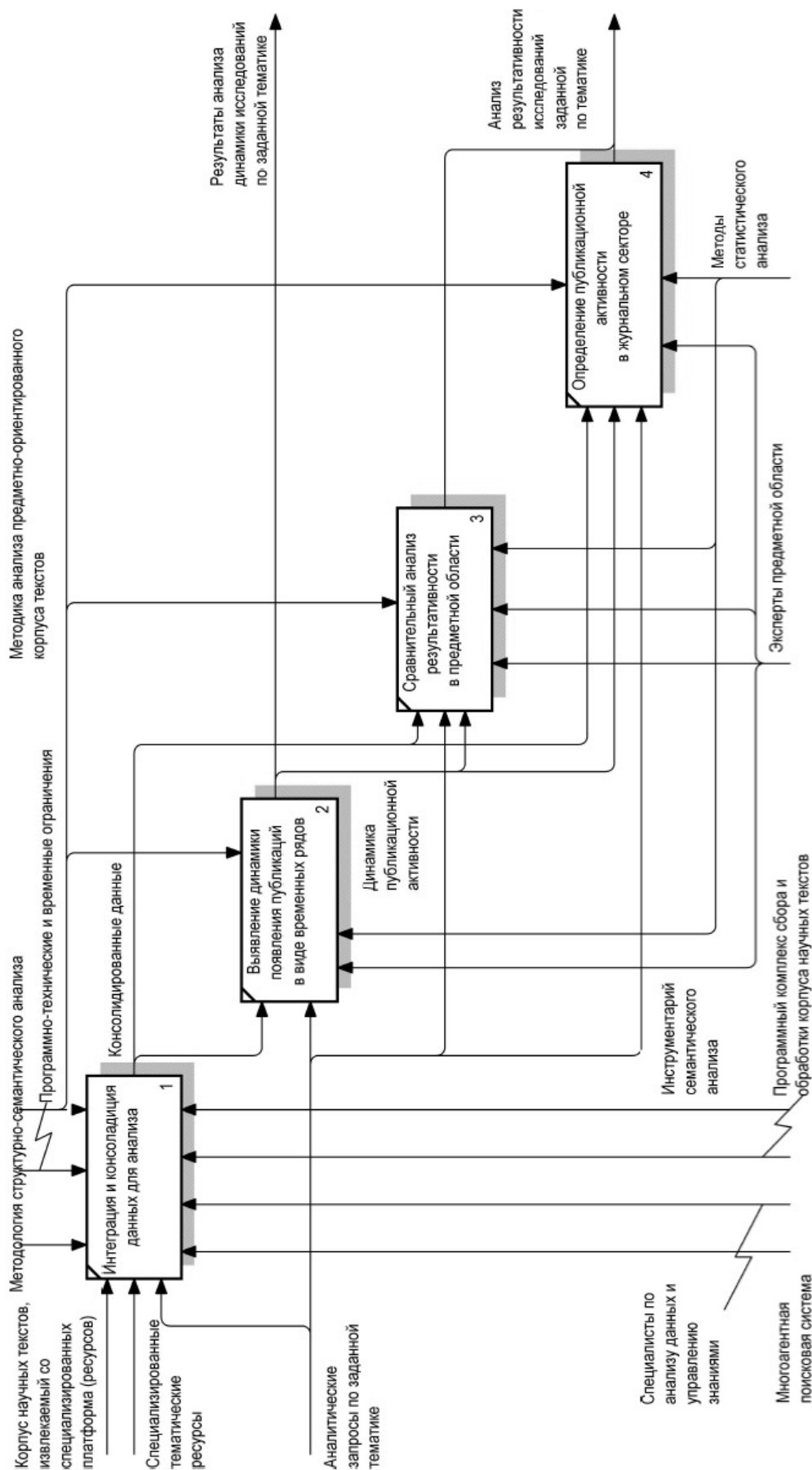


Рис. 2. Первый уровень декомпозиции функциональной модели
Fig. 2. The first level of decomposition of the functional model

На рис. 2 представлен первый уровень декомпозиции функциональной модели процесса структурно-сематического анализа информации об использовании ИТ в медицине.

Укрупненно представлены основные этапы анализа, ограничения и инструменты его реализации. Последующие уровни декомпозиции позволят детально раскрыть перечень задач и перейти к проектированию архитектуры ИС сбора и анализа слабоструктурированной информации конкретной предметной области.

3. Результаты извлечения информации о динамике исследования

Многие ученые в разных странах занимаются вопросами использования информационных технологий в медицине. Только за последние 15 лет на платформе eLibrary.ru зафиксировано более 1,5 тысячи публикаций. Обработка этой информации, если не использовать специальные инструменты, является трудоемкой и требует много времени. Возникает вопрос, какие результаты можно получить, если использовать средства обработки слабоструктурированной информации.

В области медицины существует много направлений, где информационные технологии усиленно используются.

Для определенности решения задачи поиска и извлечения информации выберем область диагностики заболеваний (ДЗ). В качестве возможных ключевых конструкций выберем три: системы поддержки принятия решения при диагностике заболеваний (СППР при ДЗ), информационные технологии при диагностике заболеваний (ИТ при ДЗ), обработка данных при диагностике заболеваний (ОД при ДЗ).

Это позволит сравнить предпочтения исследователей в области терминологии.

Наиболее важные характеристики публикаций за последние 15 лет по указанным тематикам на основе данных из eLibrary.ru приведены в табл. 1 [18].

Характеристики публикаций (за последние 15 лет)

Таблица 1

Characteristics of publications (for the last 15 years)

Table 1

Количественные характеристики	Исследовательские темы		
	СППР при ДЗ	ИТ при ДЗ	ОД при ДЗ
Всего публикаций	44	42	637
Статьи в журналах	33	30	469
Статьи в журналах, входящих в Web of Science или Scopus	2	7	121
Статьи в журналах, входящих в ядро РИНЦ	6	12	196
Статьи в журналах, входящих в RSCI	5	11	163
Взвешенный импакт-фактор журналов, в которых были опубликованы статьи	0,341	0,4	0,419
Общее число авторов	111	148	2277
Среднее число публикаций в расчете на одного автора	0,4	0,28	0,28
Суммарное число цитирований	98	73	891
Среднее число цитирований в расчете на одну статью	2,23	1,74	1,4
Число статей, процитированных хотя бы один раз	19	16	241
Число самоцитирований	5	0	14
Индекс Хирша	5	4	11

Нетрудно заметить, что авторы публикаций чаще всего используют конструкцию слов «Обработка данных при диагностике заболеваний». Число статей по данному запросу на порядок выше по сравнению с количеством статей, посвященных СППР при диагностике медицинских

заболеваний или ИТ при диагностике заболеваний. Нетрудно также заметить, что если речь идет об исследованиях в области ИТ, то наукометрические показатели публикаций (статьи в журналах, входящих в Web of Science или Scopus, в ядро РИНЦ или в RSCI) в этой области в несколько раз выше, чем у публикаций с использованным конструктором «СППР при диагностике заболеваний».

Данные, извлеченные из elibrary.ru, позволяют построить графики, отражающие динамику появления статей за последние 9 лет (с 2012 по 2020 год), которая представлена на рис. 3.

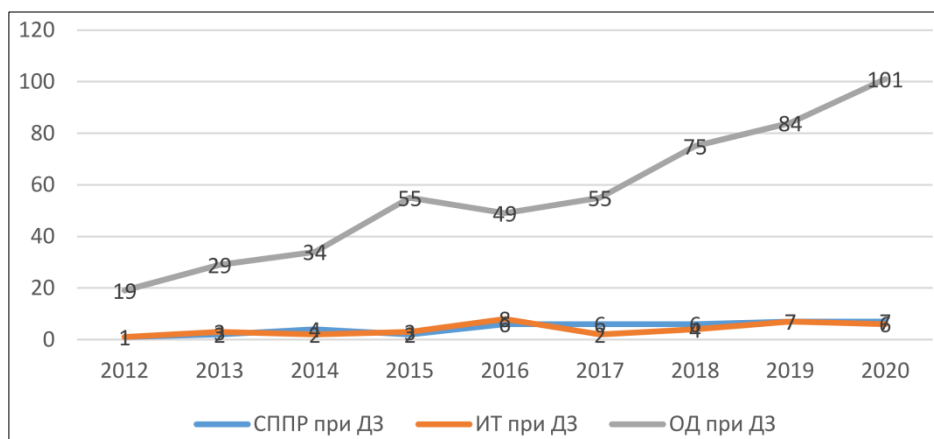


Рис. 3. Рост числа публикаций за последние 9 лет
Fig. 3. Increase in the number of publications over the past 9 years

Исследования в области обработки данных при диагностике заболеваний становятся все более активными, что связано с активным развитием современных средств обработки данных. Общие вопросы разработки СППР и использования ИТ в ДЗ стабильно являются предметом исследований в течении последних 15 лет.

4. Результаты извлечения информации о характеристиках публикационной активности

Первый вопрос, который возникает при анализе научной активности, кто из ученых наиболее активно работает в интересующих нас областях исследований. С целью анализа результативности проведенных исследований рассмотрим показатели публикационной активности десяти ведущих авторов в каждой из трех тематик. На рис. 4–6 представлены данные о наиболее активных исследователях в каждой тематике. Число публикаций отдельных авторов за последние 15 лет колеблется от одной до пяти.

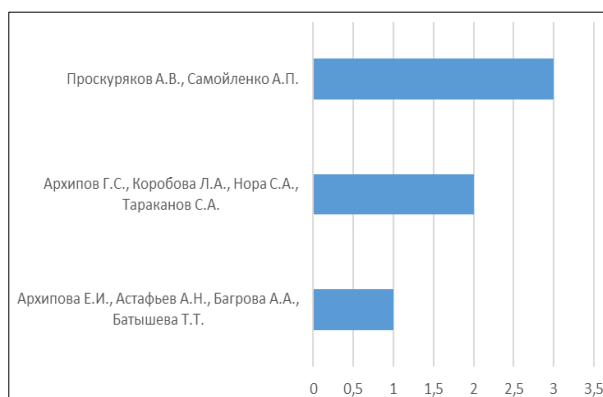


Рис. 4. Наиболее активные исследователи в области знаний «СППР при ДЗ»
Fig. 4. The most active researchers in the field of knowledge “DSS for diagnosing diseases”

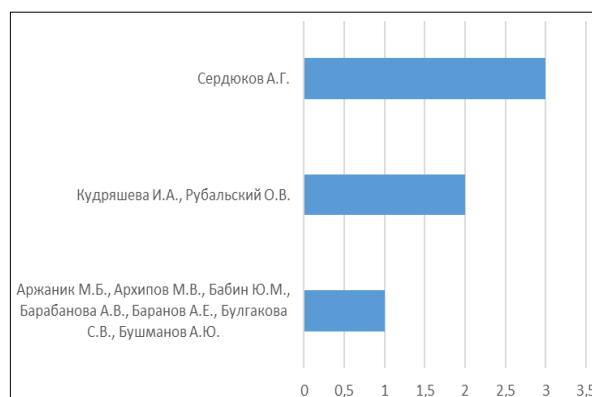


Рис. 5. Наиболее активные исследователи в области знаний «ИТ при ДЗ»
Fig. 5. The most active researchers in the field of knowledge “IT with diagnosing diseases”



Рис. 6. Наиболее активные исследователи в области знаний «ОД при ДЗ»
Fig. 6. The most active researchers in the field of knowledge "Data processing in the diagnosis of diseases"

Множества наиболее активных авторов по сравниваемым тематикам различны. Только два исследователя имеют публикации в двух тематиках: «СППР при ДЗ» и «Обработка данных при ДЗ» – А.В. Проскуряков из Южного федерального университета (Ростов-на-Дону) и Л.А. Коробова из Воронежского государственного университета инженерных технологий.

К числу наиболее активных исследователей относятся также: А.П. Самойленко из Южного федерального университета (Ростов-на-Дону), С.З. Савина из Тихоокеанского государственного университета (Хабаровск), О.В. Рубальского из Астраханского государственного медицинского университета и т. д.

Анализ результатов публикационной активности исследовательских организаций и научных школ позволяет выделить десять наиболее активных среди них (рис. 7–9).



Рис. 7. Наиболее активные организации в области знаний «СППР при ДЗ»
Fig. 7. The most active organizations in the field of knowledge "DMS for diagnosing diseases"



Рис. 8. Наиболее активные организации в области знаний «ИТ при ДЗ»
Fig. 8. The most active organizations in the field of knowledge "IT with diagnosing diseases"

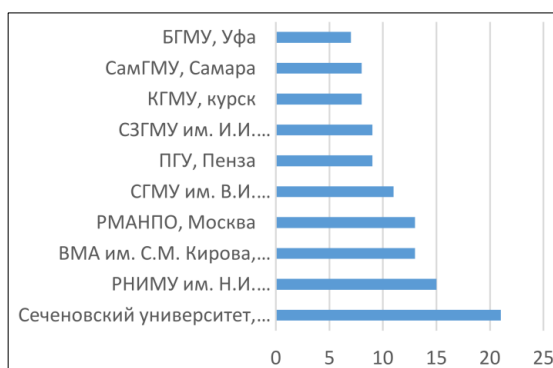


Рис. 9. Наиболее активные организации в области знаний «ОД при ДЗ»
Fig. 9. Most active organizations in the field of knowledge "Data processing in the diagnosis of diseases"

Основной вклад в исследования по тематике «Информационные технологии в медицине» внесли медицинские организации, некоторые государственные университеты, чья деятельность не связана напрямую с медициной: Юго-Западный, Южный федеральный, Воронежский университет инженерных технологий, ИТМО, Новгородский университет им. Ярослава Мудрого, Азербайджанский университет нефти и промышленности, Астраханский университет, Белгородский национальный исследовательский университет, Пензенский университет, а также научные центры: Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН.

Анализ журналов, в которых представлены основные результаты исследований, показал, что публикаций, затрагивающих тему применения информационных технологий в медицине, не так уж и много. Для каждой из ключевых тематик выделены десять основных изданий, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные результаты исследований в областях «СППР при ДЗ» и «ИТ при ДЗ»

Table 2

The main results of research in the areas of “DSS in diagnosis of diseases” and “IT in diagnosis of diseases”

Основные результаты исследований в области «СППР при ДЗ»	Основные результаты исследований в области «ИТ при ДЗ»
<ul style="list-style-type: none"> • Системный анализ и управление в биомедицинских системах • Российская оториноларингология • Успехи современного естествознания • Детская и подростковая реабилитация • Интеллектуальные системы в производстве • Современные наукоемкие технологии • Биомедицинская радиоэлектроника • Качество и жизнь • Психическое здоровье • Медицинский вестник Башкортостана 	<ul style="list-style-type: none"> • Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры • Кардиология • Медицинская радиология и радиационная безопасность • Нейрокомпьютеры: разработка, применение • International Journal on Immunorehabilitation • Бюллетень НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН. Сердечно-сосудистые заболевания • Российский вестник перинатологии и педиатрии • Российский кардиологический журнал • Системный анализ и управление в биомедицинских системах • Российская оториноларингология

Топ 10 журналов, в которых опубликованы результаты исследований в области «ОД при ДЗ», представлен на рис. 10.

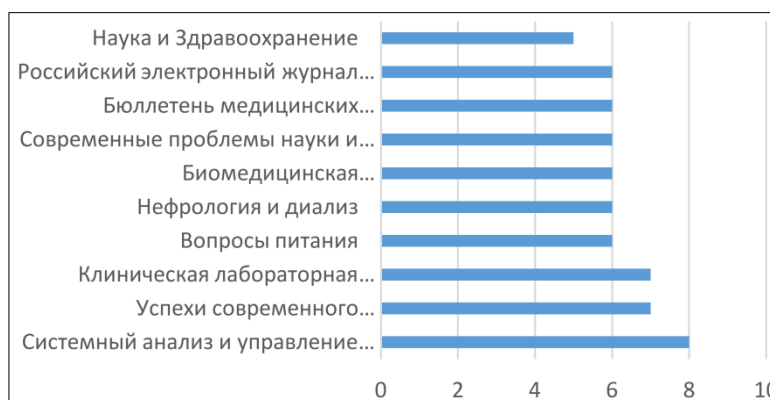


Рис. 10. Анализ активности журналов в области знаний «ОД при ДЗ»
Fig. 10. Analysis of the activity of journals in the field of knowledge “Data processing in the diagnosis of diseases”

Основные результаты исследований представлены в журналах медицинского профиля (журналы «Кардиология», «Наука и Здоровье» и т. д.).

Анализ журнальной активности позволил выделить несколько журналов, в которых представлены результаты исследований по тематике «Информационные технологии в медицине»: «Нейрокомпьютеры: разработка, применение» (в журнале освещаются вопросы разработки и применения перспективных интеллектуальных систем и технологий), «Системный анализ и управление в биомедицинских системах» (включает тематическую рубрику «Алгоритмизация, моделирование и управление процессами диагностики и лечения. Информационные технологии в биомедицине»), «Интеллектуальные системы в производстве», «Современные наукоемкие технологии» (в журнале представлены публикации, в том числе проблемы в области информатики, вычислительной техники и управления).

5. Результаты анализа данных по исследованиям в области применения ИТ в кардиологии

Если сформулировать более узкий запрос, касающийся конкретного диагноза в медицине, например, кардиозаболеваний, то выясняется, что на платформе eLibrary.ru статей, удовлетворяющих данному запросу, нет. Если же сформулировать более мягкий запрос, например, «Обработка данных кардио», то платформа выдает немного статей (17), удовлетворяющих данному запросу. Часть из них носит сугубо медицинский характер и опубликованы в медицинских журналах типа «Кардиология», «Диагностическая и интервенционная радиология», «Кардиологический вестник» и т. д.

6. Результаты извлечения информации об исследованиях в области использования ИТ в кардиологии

На основании предварительной обработки информации на первом этапе были найдены наиболее востребованные публикации активных авторов. Анализ их содержания позволяет выделить несколько статей, касающихся компьютерного моделирования, применения информационных технологий в медицине, калькуляторов прогноза, регистрации и обработки сигналов, передачи информации и обработки данных и т. д. Все статьи можно разделить на три группы. Первая группа – это статьи, опубликованные в IT-журналах, вторая группа – публикации в медицинских журналах, третья группа – публикации в спортивных журналах.

Ученые из Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН и МФТИ [10] рассмотрели бесконтактный метод анализа сердечной активности человека, основанный на регистрации и обработке баллистокордиографического сигнала, который является более экономичным с точки зрения необходимых вычислительных ресурсов, чем сравнимые по точности методы, основанные на машинном обучении, и может быть реализован на граничном (промежуточном) вычислительном узле, к которому подключены несколько датчиков. Результаты в 2018 г. опубликованы в трудах Института системного программирования РАН.

Коллективом ученых из Пензенского государственного университета [11] построена компьютерная модель торса и сердца пациента в компьютерной диагностической системе «Кардиовид» на основании индивидуальных данных пациента: данных флюорографического обследования, обработанного электрокардиосигнала, а также антропометрических данных пациента. Предложена компьютерная модель торса пациента, учитывающая индивидуальные антропометрические особенности пациента и наглядно отображающая размер и положение сердца пациента в грудной клетке; компьютерная модель сердца пациента с визуализацией внутренних полостей, позволяющая наглядно представлять кардиографическую информацию о состоянии здоровья пациента. Результаты в 2005 г. опубликованы в журнале «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика».

Группа ученых из Астраханского государственного медицинского университета [12] провели амплитудно-частотный анализ доплерограмм при изучении микроциркуляции у больных стенокардией напряжения III и IV функциональных классов. Результаты в 2007 г. опубликованы в журнале «Успехи современного естествознания».

ООО «АИТ Кардио Про» [13] разработана программа для ЭВМ «Программное обеспечение системы персонального мониторинга электрокардиограммы с перемещаемым грудным электро-

дом», которая является встраиваемым программным обеспечением компьютерного электрокардиографа «АИТ Кардио Про», регистрирующего ЭКГ одновременно в семи отведениях. ПО обеспечивает работу цифровой части устройства: аналого-цифровое преобразование биоэлектрических сигналов ЭКГ отведений (двух отведений от конечностей и одного из грудных), сжатие и передачу данных персональному компьютеру по интерфейсу USB. Программа включает конфигурирование портов и периферийных устройств ARM-микроконтроллера STM32Fxx, ответственного за оцифровку аналоговых кардиосигналов, сжатие, упаковку и передачу данных, работу светодиодной индикации прибора, обработку кодов команд от управляющего приложения высокого уровня. Программа обеспечивает функционирование устройства в составе программно-аппаратной системы персонального мониторинга ЭКГ с перемещаемым грудным электродом. Имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (2019 г.).

Группа ученых из Новосибирского медицинского университета, городской клинической больницы № 1 и государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) [14] разработали калькулятор годичного прогноза риска развития неблагоприятных кардиоваскулярных событий у пациентов после перенесенного острого инфаркта миокарда с подъемом сегмента ST. Следующим этапом работы стало создание регрессионной модели и авторского калькулятора риска развития неблагоприятного прогноза у пациентов с ОИМпST в течение 1 года с ПКФР. Результаты в 2020 г. опубликованы в журнале «Фундаментальная и клиническая медицина».

Исследованиями вегетативной регуляции кровообращения во время длительной изоляции на основе анализа вариабельности сердечного ритма занимаются ученые [15] из государственного научного центра РФ «Институт медико-биологических проблем». Для оценки адаптационных реакций организма использовали метод математического анализа ритма сердца. Анализировались суточные массивы кардиоинтервалов, полученные в результате обработки данных с помощью непрерывной регистрации электрокардиограммы в течение суток (Холтеровское мониторирование). Результаты опубликованы в журнале «Авиакосмическая и экологическая медицина».

Ученые из Казанского ФУ [16] изобрели концепцию системы управления интеллектуальным велосипедом (смарт-велосипед), разработанную для того, чтобы помочь физически нетренированным велосипедистам, а также людям, нуждающимся в кардиореабилитации, при езде на велосипеде получать именно такой уровень нагрузок, который необходим. Для управления велосипедом в реальном времени предлагается использовать набор датчиков, средство передачи информации и программу обработки данных. Результаты в 2017 г. опубликованы в Электронном научно-образовательном Вестнике «Здоровье и образование в XXI веке».

Ряд ученых из научного центра здоровья детей РАМН [17] предложили математические подходы оценки адаптации кардиогемодинамики в зависимости от активности клеточных дегидрогеназ лимфоцитов крови у юных спортсменов. Целью исследования являлось изучение взаимосвязи ферментной активности лимфоцитов крови с показателями деятельности сердечно-сосудистой системы юных спортсменов при физических нагрузках. При обработке данных использовали универсальный метод построения устойчивых нелинейных уравнений регрессии, основанных на применении нейронных сетей. Результаты в 2009 г. опубликованы в журнале «Лечебная физкультура и спортивная медицина».

Заключение

Анализ публикаций на основе данных платформы elibrary.ru является предварительным этапом изучения научных текстов по выбранной тематике исследований. При работе с данными elibrary.ru происходит автоматическая подборка статей по ключевым словам, без учета вида и специфики научных исследований. Для выделения из подборки нужного материала приходится прибегать к эксперту по знаниям предметной области. Анализ информации «вручную» – достаточно трудоемкая процедура, которая требует значительных временных затрат.

Результаты извлечения информации об исследованиях в области использования ИТ в кардиологии показали, что все статьи можно условно поделить на три группы: статьи, опубликованные в ИТ, медицинских и спортивных журналах.

Что касается использования ИТ в медицине, большая часть работ связана с обработкой данных при диагностике, системные вопросы ППР при диагностике рассматриваются достаточно редко; в областях диагностики кардиозаболеваний публикаций довольно мало.

Статьи в медицинских журналах в основном касаются разработок, в частности, прогнозирующих риск развития неблагоприятных событий (калькуляторы) или определяющих уровень физической нагрузки нетренированным пациентам (смарт-велосипед).

Статьи в спортивных журналах большей частью отражают взаимосвязи показателей здоровья спортсменов при физических нагрузках.

Список литературы

1. Дабагов, В.Д. Информатизация здравоохранения и некоторые проблемы построения интегрированных медицинских информационных систем // Информационные системы в здравоохранении. URL: <https://it.med.cap.ru/> (дата обращения: 29.11.2021).

2. Шахмамметова Г.Р., Зулкарнеев Р.Х., Евграфов А.А. Система поддержки принятия клинических решений для диагностики болезней органов дыхания // *Advances in Intelligent Systems Research*. 2019. С. 101–105. doi: 10.2991/itids-19.2019.19.

3. Юсупова Н.И., Шахмамметова Г.Р., Зулкарнеев Р.Х. Комплексный анализ медицинских данных с использованием Data Mining // *Acta Polytechnica Hungarica*. 2020. № 17(8). С. 75–93. doi: 10.12700/APH.17.8.2020.8.6.

4. Шахмамметова Г.Р., Зулкарнеев Р.Х., Евграфов А.А. Обработка неструктурированной текстовой и табличной информации в системе принятия клинических решений при диагностике болезней органов дыхания // *Advances in Intelligent Systems Research*. Paris: Atlantis Press. 2020. С. 323–327. doi: 10.2991/aisr.k.201029.061.

5. Юсупова Н.И., Сметанина О.Н., Гаянова М.М. Технологии искусственного интеллекта и машинного обучения в задачах семантического представления и анализа данных: моногр. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2020. 242 с.

6. Нужный А.С., Прозоров А.А., Бугаев В.И. и др. Анализ баллистокордиограммы на граничных вычислительных узлах // *Труды ИСП РАН*. 2018. № 2. С. 251–262.

7. Бодин О.Н. Принципы построения, структура и особенности компьютерной диагностической системы «Кардиовид». *Вестник новых медицинских технологий*. 2005. Т. 12, № 3–4. С. 107–108.

8. Прокофьева Т.В., Полунина О.С., Яценко М.К. и др. Амплитудно-частотный анализ доплерограмм при изучении микроциркуляции у больных стенокардией напряжения III и IV функциональных классов // *Успехи современного естествознания*. 2007. № 12. С. 375–376.

9. Кузнецов Ф.В., Павленко Д.В. Программное обеспечение системы персонального мониторинга электрокардиограммы с перемещаемым грудным электродом «АИТ Кардио Про»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2019660391. № 2019619474; заявл. 24.07.2019; опублик. 05.08.2019.

10. Барбарич В.Б., Ложкина Н.Г., Толмачева А.А. и др. Создание калькулятора годового прогноза с персональными коэффициентами факторов риска после перенесенного острого инфаркта миокарда с подъемом сегмента ST // *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2020. № 2. С. 48–59.

11. Баевский Р.М., Никулина Г.А. Исследование вегетативной регуляции кровообращения во время длительной изоляции на основе анализа вариабельности сердечного ритма // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 1997. Т. 31, № 4. С. 61–64.

12. Бойко А.Д., Шубенкова К.А. Смарт велосипед как средство профилактики сердечно-сосудистых заболеваний и кардиореабилитации // *Электронный научно-образовательный Вестник «Здоровье и образование в XXI веке»*. 2017. Т. 19. № 12. С. 53–55.

13. Корнеева И.Т., Поляков С.Д., Гоготова В.Л. и др. Математические подходы оценки адаптации кардиогемодинамики в зависимости от активности клеточных дегидрогеназ лимфоцитов крови у юных спортсменов // *Лечебная физкультура и спортивная медицина*. 2009. № 9(69). С. 28–32.

14. Iroju O.G., Olaleke J.O. A systematic review of natural language processing in healthcare // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2015. Vol. 7, no. 8. P. 44–50. doi: 10.5815/ijitcs.2015.08.07.

15. Nadkarni P.M., Ohno-Machado L., Chapman W.W. Natural language processing: an introduc-

tion // *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2011. Vol. 18, no. 5. P. 544–551. doi: 10.1136/amiajnl-2011-000464.

16. Duch W., Matykiewicz P., Pestian J. *Neurolinguistic approach to natural language processing with applications to medical text analysis // Neural Networks*. 2008. Vol. 21, no. 10. P. 1500–1510. doi: 10.1016/j.neunet.2008.05.008.

17. Wang Y., Liu S, Afzal N. et al. *A comparison of word embeddings for the biomedical natural language processing // Journal of biomedical informatics*. 2018. Vol. 87. P. 12–20. doi: 10.1016/j.jbi.2018.09.008.

18. Научная электронная библиотека. URL: <https://www.elibrary.ru/defaultx.asp> (дата обращения: 29.11.2021).

References

1. Dabagov V.D. *Informatizatsiya zdavookhraneniya i nekotoryye problemy postroyeniya integrovannykh meditsinskikh informatsionnykh sistem* [Health informatization and some problems of building integrated medical information systems]. Available at: <https://it.med.cap.ru/> (accessed 29.11.2021). (In Russ.)

2. Shakhmametova G.R., Zulkarneyev R.Kh., Evgrafov A.A. Clinical Decision Support System for the Respiratory Diseases Diagnosis. *Advances in Intelligent Systems Research*; 2019. P. 101–105. doi: 10.2991/itids-19.2019.19.

3. Yusupova N.I., Shakhmametova G., Zulkarneyev R. Complex analysis of medical data with data mining usage. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2020;17(8):75–93. doi: 10.12700/APH.17.8.2020.8.6.

4. Shakhmametova G.R., Zulkarneyev R.Kh., Evgrafov A.A. Unstructured Text and Tabular Information Processing in the Clinical Decision Making System for the Respiratory Diseases Diagnosis. *Advances in Intelligent Systems Research*. Paris: Atlantis Press; 2020. P. 323–327. doi: 10.2991/aisr.k.201029.061.

5. Yusupova N.I., Smetanina O.N., Gayanova M.M. *Tekhnologii iskusstvennogo intellekta i mashinnogo obucheniya v zadachakh semanticheskogo predstavleniya i analiza dannykh* [Technologies of artificial intelligence and machine learning in the tasks of semantic presentation and data analysis]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie Publ.; 2020. 242 p. (In Russ.)

6. Nuzhnyy A.S., Prozorov A.A., Bugayev V.I., Shuvalov N.D., Podymov V.V. [Analysis of ballerograms on boundary computing nodes]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2018;(2):251–262. (In Russ.)

7. Bodin O.N. [Principles of construction, structure and features of the computer diagnostic system “Cardiovoid”]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*. 2005;12(3–4):107–108. (In Russ.)

8. Prokof'eva T.V., Polunina O.S., Jacenko M.K., Maklakova N.V. [Amplitude-frequency analysis of the Dopplerograms when studying microcirculation in patients with an angina stress III and IV functional classes]. *The successes of modern natural science*. 2007;(12):375–376. (In Russ.)

9. Kuznetsov F.V., Pavlenko D.V. *Programmnoe obespechenie sistemy personal'nogo monitoringa elektrokardiogrammy s peremeshchaemym grudnym elektrodom “AIT Kardio Pro”* [Software Personal Monitoring System Electrocardiogram with Movered Breast Electrode “AIT Cardio Pro”]. Certificate of State Registration Program for Computer, RU 2019660391, 2019.

10. Barbarich V.B., Lozhkina N.G., Tolmacheva A.A. [Creating a calculator of a one-year forecast with personal coefficients of risk factors after transferred acute myocardial infarction with ST segment lifting]. *Fundamental and clinical medicine*. 2020;(2):48–59. (In Russ.)

11. Bayevskiy R.M., Nikulina G.A. [The study of the vegetative regulation of blood circulation during long-term isolation based on the analysis of cardiac rhythm variability]. *Aerospace and ecological medicine*. 1997;31(4):61–64. (In Russ.)

12. Boyko A.D., Shubenkova K.A. Smart bike as a mean of prevention of cardiovascular diseases and cardiac rehabilitation. *Elektronnyi nauchno-obrazovatel'nyi Vestnik “Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke”*. 2017;19(12):53–55. (In Russ.)

13. Korneeva I.T., Polyakov S.D., Gogotova V.L. et al. Mathematical approaches of estimation adaptations of cardiohemodynamics in dependence on enzymatic actiity of lymphocytes of blood of young sportsmen. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina*. 2009;9(69):28–32. (In Russ.)

14. Iroju O.G., Olaleke J.O. A systematic review of natural language processing in healthcare. *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 2015;7(8):44–50. doi: 10.5815/ijitcs.2015.08.07.

15. Nadkarni P.M., Ohno-Machado L., Chapman W.W. Natural language processing: an introduction. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2011;18(5):544–551. doi: 10.1136/amiajnl-2011-000464.

16. Duch W., Matykiewicz P., Pestian J. Neurolinguistic approach to natural language processing with applications to medical text analysis. *Neural Networks*. 2008;21(10):1500–1510. doi: 10.1016/j.neunet.2008.05.008.

17. Wang Y., Liu S, Afzal N. et al. A comparison of word embeddings for the biomedical natural language processing. *Journal of biomedical informatics*. 2018;87: 12–20. doi: 10.1016/j.jbi.2018.09.008.

18. Scientific electronic library. Available at: <https://www.elibrary.ru/defaultx.asp> (accessed 29.11.2021).

Информация об авторах

Юсупова Нафиса Исламовна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой вычислительной математики и кибернетики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия; yusupova.ni@ugatu.su.

Гаянова Майя Марсовна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры вычислительной математики и кибернетики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия; gayanova.mm@ugatu.su.

Богданов Марат Робертович, канд. биол. наук, доц., доц. кафедры вычислительной математики и кибернетики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия; bogdanov.mr@ugatu.su.

Information about the authors

Nafisa I. Yusupova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; yusupova.ni@ugatu.su.

Maya M. Gayanova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; gayanova.mm@ugatu.su.

Marat R. Bogdanov, Cand. Sci. (Biol.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the of the Department of Computational Mathematics and Cybernetics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia; bogdanov.mr@ugatu.su.

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 02.12.2021; одобрена после рецензирования 16.12.2021; принята к публикации 23.12.2021.

The article was submitted 02.12.2021; approved after reviewing 16.12.2021; accepted for publication 23.12.2021.

Управление в технических системах Control in Technical Systems

Научная статья
УДК 681.5
doi: 10.14529/ctcr220103

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПЕРВОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯТОРОВ

Александр Иванович Телегин

*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, г. Миасс, Россия,
teleginai@susu.ru*

Аннотация. Целью исследования является решение проблемы вывода явного аналитического вида и громоздкости уравнений динамики систем тел. **Методы исследования** относятся к механике систем тел и системному анализу. **Результаты** исследования позволяют для систем тел с одной открытой ветвью выписывать формулы вычисления сил и моментов сил в их сочленениях, что продемонстрировано в примерах выписывания аналитических видов уравнений динамики манипуляторов промышленных роботов с тремя и шестью степенями свободы в пространстве. Для них получены по три вида уравнения динамики. Первые уравнения выписаны в скалярно-координатном виде с явно выраженными квазиускорениями и скоростями, роль которых играют проекции абсолютных угловых ускорений и скоростей тел на их связанные оси. Вторые записаны в векторно-матричном виде и получены из первого в процессе замены квазиускорений на относительные линейные и угловые ускорения тел с выделением симметричной матрицы инерционных коэффициентов. Третий вид уравнений динамики получен из второго в процессе замены квазискоростей на относительные линейные и угловые скорости тел. В третьем виде явно выражены центробежные, Кориолисовы и гироскопические инерционные силы. Последние позволяют упростить формулу вычисления потребляемой мощности приводов, а также упростить формулу Тимофеева вычисления движущих сил и моментов сил, обеспечивающих управление программным движением тел манипуляторов с заданным качеством. В примерах демонстрируется методика повторного использования формул для манипуляторов с совпадающими кинематическими схемами их подсистем. В уравнениях динамики явно выражены геометрические, кинематические, статические и инерционные параметры тел. Множители при ускорениях и произведениях скоростей в выписанных уравнениях динамики являются оптимальными в смысле минимума арифметических операций (сложений и умножений), необходимых для их вычислений. **Заключение.** Все аналитические виды уравнений динамики верифицированы, они занимают несколько строк текста, и их дальнейшее упрощение практически невозможно.

Ключевые слова: промышленный робот, 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 // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 28–52. doi: 10.14529/ctcr220103.

Original article
doi: 10.14529/ctcr220103

ANALYTICAL SOLUTION OF THE FIRST PROBLEM OF THE MANIPULATORS' DYNAMICS

Aleksandr I. Telegin

South Ural State University, Miass, Russia, teleginai@susu.ru

Abstract. The aim is to solve the problem of deriving an explicit analytical form and the cumbersome of the equations of dynamics of body systems. The research methods refer to the mechanics of body systems and systems analysis. The research results allow to write out formulas for calculating forces and

© Телегин А.И., 2022

moments of forces in the joints of the systems of bodies with one open branch. It is demonstrated in examples of writing out analytical types of equations of dynamics of industrial robot arms with three and six degrees of freedom in space. Three kinds of equations of dynamics were obtained for such manipulators. The first equations are written out in scalar-coordinate form with explicit quasi-accelerations and velocities, whose role is played by the projections of absolute angular accelerations and velocities of bodies on their connected axes. The second ones are written in vector-matrix form and are obtained from the former in the process of replacing quasi-accelerations by relative linear and angular accelerations of bodies with the allocation of a symmetric matrix of inertial coefficients. The third kind of equations of dynamics is obtained from the second one in the process of replacing quasi-velocities by relative linear and angular velocities of bodies. In the third form, the centrifugal, Coriolis, and gyroscopic inertial forces are clearly expressed. Gyroscopic inertial forces allow us to simplify the formula for calculating the power consumption of drives, as well as to simplify the Timofeev formula for calculating the driving forces and moments of forces that provide control of the program motion of manipulator bodies with a given quality. A technique for reusing formulas for manipulators with matching kinematic diagrams of their subsystems is demonstrated in the examples. Geometric, kinematic, static and inertial parameters of bodies are explicitly expressed in the equations of dynamics. The multipliers for accelerations and products of velocities in the equations of dynamics are optimal in the sense of the minimum of arithmetic operations (additions and multiplications) required for their calculations. **Conclusion.** All analytical types of equations of dynamics are verified. They occupy several lines of text and further simplification is practically impossible.

Keywords: industrial robot, equations of dynamics, quasi-velocities, writing out of formulas, direction 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 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.

Введение

Основной проблемой практического использования уравнений динамики (УД) систем тел (СТ) является их сложность. Из-за громоздкости аналитических видов УД разрабатываются пошагово-алгоритмические методы исследования СТ. Известны различные формулы вычисления УД СТ и им соответствующее ПО. Рассматриваются как конкретные СТ [1–5], так и классы СТ [6]. Решаются задачи динамики [7] и управления движением тел СТ [8]. Однако такие методы не позволяют эффективно решать задачи синтеза СТ с заданными динамическими свойствами [9, 10], а также синтезировать адаптивные ПИД-регуляторы программных движений тел СТ или решать задачи оптимального управления СТ в реальном масштабе времени.

Актуальна задача разработки формализмов выписывания УД конкретных СТ, т. е. выполнения последовательности формальных действий по конкретизации общих формул без выполнения математических операций (вычисления производных, возведений выражений в квадрат, алгебраических и тригонометрических упрощений и т. д.). Решение этой задачи позволит автоматизировать процесс выписывания УД СТ в явном аналитическом виде с минимальным количеством арифметических операций.

Постановка задачи. В статье ставится задача разработать простой формализм выписывания аналитического вида УД СТ с одной открытой ветвью (СЛОВ) и практически продемонстрировать его на примерах выписывания УД манипуляторов с поступательными и вращательными соединениями с тремя и шестью подвижными телами и минимальным числом арифметических операций.

1. Формулы выписывания УД СТ

Присвоим неподвижному телу СЛОВ (стойке, станине) нулевой номер и свяжем с ним точку $O_0 = O$. Назовем его неподвижным телом отсчета (НТО). Следующие за НТО подвижные тела занумеруем числами 1, 2, ..., N, где N – количество подвижных тел СЛОВ. Введем в обращение величины: m_{oi} – масса и обозначение тела с номером i; O_i – полюс тела m_{oi} , т. е. фиксированная точка тела m_{oi} ; \mathbf{r}_i – вектор, проведенный из точки O в точку O_i ; \mathbf{R}_i – вектор, проведенный из точки O_{i-1} в точку O_i ; C_i – центр масс (ЦМ) тела m_{oi} ; \mathbf{c}_i – орт, направленный из точки O_i в точку C_i ;

\mathbf{K}_i – кинетический момент тела m_{oi} относительно точки O_i ; \mathbf{g} – ускорение свободного падения; $\mathbf{y}_o = \mathbf{y}$ – орт вертикали, т. е. $\mathbf{g} = -\mathbf{g}\mathbf{y}$; $m_i = \sum_{k=i}^N m_{ok}$ – масса и обозначение подсистемы СТОВ, состоящей из тела m_{oi} и всех следующих за ним тел; $\mathbf{F}_i, \mathbf{M}_i$ – главный вектор и момент сил, действующих на тело m_{oi} со стороны тела m_{oi-1} и приведенных к точке O_i .

Для СТОВ имеют место формулы:

$$\mathbf{F}_j = m_j \ddot{\mathbf{r}}_j + \dot{\mathbf{m}}_j + m_{gj} \mathbf{y}; \quad (1.1)$$

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

где $\mathbf{m}_j = \sum_{i=j}^N (m_{ci} \mathbf{c}_i + m_{i+1} \mathbf{R}_{i+1})$, $m_{ci} = m_{oi} |\mathbf{O}_i \mathbf{C}_i|$, $\mathbf{R}_{N+1} = 0$, $m_{gj} = m_j \mathbf{g}$, $\mathbf{G}_j = \mathbf{g} \mathbf{m}_j \times \mathbf{y}$.

1.1. Доказательство формул (1.1), (1.2). Мысленно разорвём связи тела m_{oj} с соседними телами. Действие тела m_{oj-1} на тело m_{oj} определяется векторами $\mathbf{F}_j, \mathbf{M}_j$. Тогда действие тела m_{oj+1} на тело m_{oj} определяется векторами $(-\mathbf{F}_{j+1}), (-\mathbf{M}_{j+1})$, где момент силы \mathbf{M}_{j+1} взят относительно точки O_{j+1} . Следовательно, $m_{oj} \mathbf{W}_{cj} = m_{oj} \mathbf{g} + \mathbf{F}_j - \mathbf{F}_{j+1}$, где \mathbf{W}_{cj} – абсолютное ускорение ЦМ тела m_{oj} . Отсюда следует формула $\mathbf{F}_j = m_{oj} (\mathbf{W}_{cj} - \mathbf{g}) + \mathbf{F}_{j+1}$. С использованием обозначения $\mathbf{b}_i = m_{oi} (\mathbf{W}_{ci} - \mathbf{g})$ эта формула примет вид $\mathbf{F}_i = \mathbf{b}_i + \mathbf{F}_{i+1}$. После рекуррентных вложений для $i = N, N-1, \dots, j$ с учетом равенства $\mathbf{F}_{N+1} = 0$ и обозначения m_j получим $\mathbf{F}_j = \sum_{i=j}^N \mathbf{b}_i = \sum_{i=j}^N m_{oi} (\mathbf{W}_{ci} - \mathbf{g}) = \sum_{i=j}^N m_{oi} \mathbf{W}_{ci} - m_j \mathbf{g}$. Отсюда, учитывая равенство $m_{oj} \mathbf{W}_{cj} = m_{oj} \ddot{\mathbf{r}}_j + m_{cj} \ddot{\mathbf{c}}_j$, получим $\mathbf{F}_j = \sum_{i=j}^N (m_{oi} \ddot{\mathbf{r}}_i + m_{ci} \ddot{\mathbf{c}}_i) - m_j \mathbf{g}$. С учетом представления $\ddot{\mathbf{r}}_i = \sum_{k=1}^i \ddot{\mathbf{R}}_k = \sum_{k=1}^j \ddot{\mathbf{R}}_k + \sum_{k=j+1}^i \ddot{\mathbf{R}}_k$ и формулы $\sum_{i=j}^N a_i \sum_{k=j+1}^i b_k = \sum_{k=j+1}^N b_k \sum_{i=k}^N a_i$ изменения порядка суммирования получим

$$\mathbf{F}_j = \sum_{i=j}^N \left[m_{oi} \left(\sum_{k=1}^j \ddot{\mathbf{R}}_k + \sum_{k=j+1}^i \ddot{\mathbf{R}}_k \right) + m_{ci} \ddot{\mathbf{c}}_i \right] - m_j \mathbf{g} = m_j \sum_{i=1}^j \ddot{\mathbf{R}}_i + \sum_{i=j+1}^N \ddot{\mathbf{R}}_i \sum_{k=i}^N m_{ok} + \sum_{i=j}^N m_{ci} \ddot{\mathbf{c}}_i - m_j \mathbf{g} = m_j \ddot{\mathbf{r}}_j + \sum_{i=j}^N m_{ci} \ddot{\mathbf{c}}_i + \sum_{i=j+1}^N m_i \ddot{\mathbf{R}}_i + m_{gj} \mathbf{y}.$$

С учётом равенства $\sum_{i=j+1}^N a_i = \sum_{i=j}^N a_{i+1}$, где $a_{N+1} = 0$ и обозначения \mathbf{m}_j получим

$$\sum_{i=j}^N m_{ci} \ddot{\mathbf{c}}_i + \sum_{i=j+1}^N m_i \ddot{\mathbf{R}}_i = \sum_{i=j}^N (m_{ci} \ddot{\mathbf{c}}_i + m_{i+1} \ddot{\mathbf{R}}_{i+1}) = \dot{\mathbf{m}}_j.$$

С учетом этого выражения последняя формула вычисления силы \mathbf{F}_j принимает искомый вид (1.1).

После мысленного разрыва связей тела m_{oj} с соседними телами можно считать, что тело m_{oj} вращается вокруг своего полюса под действием моментов сил $\mathbf{M}_j, -\mathbf{M}_{j+1}, m_{cj} \mathbf{c}_j \times \mathbf{g}, -\mathbf{R}_{j+1} \times \mathbf{F}_{j+1}$, а также момента $-m_{cj} \mathbf{c}_j \times \ddot{\mathbf{r}}_j$ инерционной силы поступательного движения тела m_{oj} . Тогда имеет место следующее УД вращательного движения тела m_{oj} вокруг своего полюса: $\dot{\mathbf{K}}_j = \mathbf{M}_j - \mathbf{M}_{j+1} + m_{cj} \mathbf{c}_j \times \mathbf{g} - \mathbf{R}_{j+1} \times \mathbf{F}_{j+1} - m_{cj} \mathbf{c}_j \times \ddot{\mathbf{r}}_j$. Отсюда с учётом формулы (1.1) получим $\dot{\mathbf{K}}_j = \mathbf{M}_j - \mathbf{M}_{j+1} + m_{cj} \mathbf{c}_j \times \mathbf{g} - \mathbf{R}_{j+1} \times [m_{j+1} (\ddot{\mathbf{r}}_j + \ddot{\mathbf{R}}_{j+1} - \mathbf{g}) + \dot{\mathbf{m}}_{j+1}] - m_{cj} \mathbf{c}_j \times \ddot{\mathbf{r}}_j$. Выразим отсюда \mathbf{M}_j . Тогда получим

$$\mathbf{M}_j = \dot{\mathbf{K}}_j + \mathbf{M}_{j+1} - (m_{cj} \mathbf{c}_j + m_{j+1} \mathbf{R}_{j+1}) \times \mathbf{g} + (m_{cj} \mathbf{c}_j + m_{j+1} \mathbf{R}_{j+1}) \times \ddot{\mathbf{r}}_j + m_{j+1} \mathbf{R}_{j+1} \times \ddot{\mathbf{R}}_{j+1} + \mathbf{R}_{j+1} \times \dot{\mathbf{m}}_{j+1} = \mathbf{b}_j + \mathbf{M}_{j+1},$$

где $\mathbf{b}_j = m_{rj} \times (\ddot{\mathbf{r}}_j - \mathbf{g}) + \dot{\mathbf{K}}_j + m_{j+1} \mathbf{R}_{j+1} \times \ddot{\mathbf{R}}_{j+1} + \mathbf{R}_{j+1} \times \dot{\mathbf{m}}_{j+1}$, $m_{rj} = m_{cj} \mathbf{c}_j + m_{j+1} \mathbf{R}_{j+1}$. После рекуррентных вложений формулы $\mathbf{M}_i = \mathbf{b}_i + \mathbf{M}_{i+1}$ для $i = N, N-1, \dots, j$ получим $\mathbf{M}_j = \sum_{i=j}^N \mathbf{b}_i$. Для $i \geq j$ справедливо представление $\ddot{\mathbf{r}}_i = \ddot{\mathbf{r}}_j + \ddot{\mathbf{R}}_{ji}$, где $\mathbf{R}_{ji} = \sum_{k=j}^i \mathbf{R}_k$ – вектор, проведенный из точки O_j в точку O_i . Следовательно, с учетом обозначения \mathbf{m}_j получим

$$\sum_{i=j}^N m_{ri} \times \ddot{\mathbf{r}}_i = \sum_{i=j}^N m_{ri} \times \ddot{\mathbf{r}}_j + \sum_{i=j}^N m_{ri} \times \ddot{\mathbf{R}}_{ji} = \mathbf{m}_j \times \ddot{\mathbf{r}}_j + \sum_{i=j}^N m_{ri} \times \ddot{\mathbf{R}}_{ji}$$

и с учетом равенства $\mathbf{R}_{jj} = 0$ формула вычисления \mathbf{M}_j принимает вид

$$\mathbf{M}_j = \mathbf{m}_j \times (\ddot{\mathbf{r}}_j - \mathbf{g}) + \sum_{i=j}^N \dot{\mathbf{K}}_i + \sum_{i=j+1}^N (m_i \mathbf{R}_i \times \ddot{\mathbf{R}}_i + m_{ri} \times \ddot{\mathbf{R}}_{ji} + \mathbf{R}_i \times \dot{\mathbf{m}}_i). \quad (1.3)$$

Из (1.3), используя равенство $\mathbf{G}_j = -\mathbf{m}_j \times \mathbf{g} = \mathbf{g} \mathbf{m}_j \times \mathbf{y}$ и

$$\begin{aligned} \sum_{i=j+1}^N m_{ri} \times \ddot{\mathbf{R}}_{ji} &= \sum_{i=j+1}^N m_{ri} \times \sum_{k=j}^i \ddot{\mathbf{R}}_k = \sum_{k=j+1}^N \sum_{i=k}^N m_{ri} \times \ddot{\mathbf{R}}_k = \\ &= \sum_{k=j+1}^N m_k \times \ddot{\mathbf{R}}_k = \sum_{i=j+1}^N m_i \times \ddot{\mathbf{R}}_i, \end{aligned} \quad (1.4)$$

получим искомую формулу (1.2). Формулы (1.1), (1.2) доказаны.

1.2. *Движущие силы и моменты сил.* До сих пор никаких ограничений на связи тел в сочленениях СТОВ не накладывалось. По классификации, принятой в теории механизмов и машин, тела СТОВ могут образовывать друг с другом различные кинематические пары (КП), например, поступательные, вращательные, винтовые, шаровые и т. д. В манипуляционных системах (МС) роботов, как правило, используются вращательные КП (ВКП) и поступательные КП (ПКП). Поэтому остановимся подробнее на их описании и, в первую очередь, выделим из \mathbf{F}_j и \mathbf{M}_j динамические реакции (реактивные составляющие) и движущие силы и/или моменты сил, развиваемые приводами МС.

Реактивные составляющие в КП(j) удерживают тело m_{oj} от движений, не допускаемых связями. Движущие составляющие обеспечивают движение тела m_{oj} относительно тела m_{oj-1} в направлениях, допускаемых связями в КП(j). Выделим из \mathbf{F}_j , \mathbf{M}_j реактивные и движущие составляющие в ПКП и ВКП.

В ПКП(j) тело m_{oj} может двигаться поступательно относительно тела m_{oj-1} вдоль оси $O_{j-1}\mathbf{p}_j$, жестко связанной с телом m_{oj-1} , где \mathbf{p}_j – орт оси ПКП(j). Движущей в ПКП(j) является сила $F_j = \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{F}_j$. Проекция силы \mathbf{F}_j на плоскость, перпендикулярную оси $O_j\mathbf{p}_j$, является реактивной. Момент силы \mathbf{M}_j является реактивным.

В ВКП(j) тело m_{oj} может вращаться относительно тела m_{oj-1} вокруг оси $O_j\mathbf{q}_j$, жестко связанной с телом m_{oj-1} , где \mathbf{q}_j – орт оси ВКП(j). К реактивным в ВКП(j) относятся сила \mathbf{F}_j и момент силы относительно точки O_j , перпендикулярный оси $O_j\mathbf{q}_j$. К движущим в ВКП(j) относится момент силы $M_j = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{M}_j$ относительно оси $O_j\mathbf{q}_j$.

Перед выводом УД СТОВ рекомендуется изобразить кинематическую схему (далее – схему) этой СТОВ. На схеме полюс тела m_{oi} будем изображать точкой с надписью O_i , а ЦМ – перекрестием с надписью C_i . Для ВКП(i) полюс тела выбираем на оси его относительного вращения. Если оси вращения соседних ВКП пересекаются, то полюса их тел рекомендуем совмещать. Тогда максимальное число межполюсных векторов $\mathbf{R}_i = \mathbf{O}_{i-1}\mathbf{O}_i$ обнулится. На схеме тела всех ВКП условимся изображать в исходном относительном положении, т. е. когда $q_i = 0$, где q_i – угол поворота тела m_{oi} вокруг оси $O_i\mathbf{q}_i$ относительно тела m_{oi-1} . Если смотреть навстречу оси $O_i\mathbf{q}_i$, то поворот против хода стрелки часов считается положительным.

В КП(i) величины q_i , \dot{q}_i и \ddot{q}_i , описывающие положение, скорость и ускорение в движении тела m_{oi} относительно тела m_{oi-1} , будем называть соответственно обобщенной координатой (ОК), обобщенной скоростью (ОС) и обобщенным ускорением (ОУ) тела m_{oi} .

1.3. *Кинетический момент.* Кинетический момент тела m_{oi} относительно своего полюса O_i вычисляется по формуле $\mathbf{K}_i = \mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i$, где \mathbf{I}_i – тензор инерции тела m_{oi} в полюсе O_i , $\boldsymbol{\omega}_i$ – абсолютная угловая скорость тела m_{oi} . Для вычисления вектора \mathbf{K}_i достаточно знать тензор \mathbf{I}_i и вектор $\boldsymbol{\omega}_i$ в одной и той же системе координат (СК). Если в качестве такой СК взять связанную с телом m_{oi} СК (ССК(i)), то в ней элементы тензора \mathbf{I}_i будут постоянными. Здесь элементы тензора \mathbf{I}_i задаются в ССК(i) $O_i\mathbf{x}_i\mathbf{y}_i\mathbf{z}_i$, где \mathbf{x}_i , \mathbf{y}_i , \mathbf{z}_i – орты осей этой СК.

В дальнейшем будем пользоваться символами ξ , η , ζ , v , μ , принимающими значения на множестве символов $\{x, y, z\}$. Для сокращения записей будем использовать знаки суммирования по этим символам. Тогда, например, разложение вектора $\boldsymbol{\omega}_i$ по ортам ССК(i) можно записывать в виде $\boldsymbol{\omega}_i = \omega_i^x\mathbf{x}_i + \omega_i^y\mathbf{y}_i + \omega_i^z\mathbf{z}_i = \sum_{\xi} \omega_i^{\xi}\boldsymbol{\xi}_i$, где ω_i^x , ω_i^y , ω_i^z – проекции вектора $\boldsymbol{\omega}_i$ на оси ССК(i).

Для сокращения записей векторного произведения орт ССК(i) будем использовать представление $\boldsymbol{\xi}_i \times \boldsymbol{\eta}_i = \epsilon_{\xi\eta\zeta}\boldsymbol{\zeta}_i$, где $\epsilon_{\xi\eta\zeta}$ – символ Леви-Чивита [11].

Если ССК(i) является главной для тела m_{oi} , то $\mathbf{K}_i = \mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i = \text{diag}(I_i^x, I_i^y, I_i^z) \cdot \boldsymbol{\omega}_i = \sum_{\xi} I_i^{\xi}\omega_i^{\xi}\boldsymbol{\xi}_i$, где I_i^x, I_i^y, I_i^z – моменты инерции тела m_{oi} относительно главных осей $O_i\mathbf{x}_i, O_i\mathbf{y}_i, O_i\mathbf{z}_i$, соответственно, и

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{K}}_i &= \sum_{\xi} I_i^{\xi} \left(\dot{\omega}_i^{\xi}\boldsymbol{\xi}_i + \omega_i^{\xi}\boldsymbol{\omega}_i \times \boldsymbol{\xi}_i \right) = \sum_{\xi} I_i^{\xi} \left(\dot{\omega}_i^{\xi}\boldsymbol{\xi}_i + \omega_i^{\xi} \sum_{\eta} \epsilon_{\eta\xi\zeta} \omega_i^{\eta}\boldsymbol{\zeta}_i \right) = \\ &= I_i^x \left[\dot{\omega}_i^x\mathbf{x}_i + \omega_i^x (\epsilon_{zyx}\omega_i^z\mathbf{y}_i + \epsilon_{yxz}\omega_i^y\mathbf{z}_i) \right] + I_i^y \left[\dot{\omega}_i^y\mathbf{y}_i + \omega_i^y (\epsilon_{xyz}\omega_i^z\mathbf{z}_i + \epsilon_{zyx}\omega_i^x\mathbf{x}_i) \right] + \\ &+ I_i^z \left[\dot{\omega}_i^z\mathbf{z}_i + \omega_i^z (\epsilon_{yzx}\omega_i^y\mathbf{x}_i + \epsilon_{xzy}\omega_i^x\mathbf{y}_i) \right] = \\ &= [I_i^x\dot{\omega}_i^x + (I_i^z - I_i^y)\omega_i^y\omega_i^z]\mathbf{x}_i + [I_i^y\dot{\omega}_i^y + (I_i^x - I_i^z)\omega_i^x\omega_i^z]\mathbf{y}_i + [I_i^z\dot{\omega}_i^z + (I_i^y - I_i^x)\omega_i^x\omega_i^y]\mathbf{z}_i = \\ &= (I_i^x\dot{\omega}_i^x + I_i^a\omega_i^y\omega_i^z)\mathbf{x}_i + (I_i^y\dot{\omega}_i^y + I_i^b\omega_i^x\omega_i^z)\mathbf{y}_i + (I_i^z\dot{\omega}_i^z + I_i^c\omega_i^x\omega_i^y)\mathbf{z}_i, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где $I_i^a = I_i^z - I_i^y$, $I_i^b = I_i^x - I_i^z$, $I_i^c = I_i^y - I_i^x$. Отсюда

$$\mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N \dot{\mathbf{K}}_i = \sum_{i=j}^N [x_{ij}^q (I_i^x \dot{\omega}_i^x + I_i^a \omega_i^y \omega_i^z) + y_{ij}^q (I_i^y \dot{\omega}_i^y + I_i^b \omega_i^x \omega_i^z) + z_{ij}^q (I_i^z \dot{\omega}_i^z + I_i^c \omega_i^x \omega_i^y)], \quad (1.6)$$

где $x_{ij}^q = \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{q}_j$, $y_{ij}^q = \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{q}_j$, $z_{ij}^q = \mathbf{z}_i \cdot \mathbf{q}_j$.

Если ССК(i) не совпадает с главной СК тела m_{oi} (ГСК(i)), то

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{I}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i = \begin{pmatrix} I_i^x & -I_i^{xy} & -I_i^{xz} \\ -I_i^{xy} & I_i^y & -I_i^{yz} \\ -I_i^{xz} & -I_i^{yz} & I_i^z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_i^x \\ \omega_i^y \\ \omega_i^z \end{pmatrix} =$$

$$= (I_i^x \omega_i^x - I_i^{xy} \omega_i^y - I_i^{xz} \omega_i^z) \mathbf{x}_i + (-I_i^{xy} \omega_i^x + I_i^y \omega_i^y - I_i^{yz} \omega_i^z) \mathbf{y}_i + (-I_i^{xz} \omega_i^x - I_i^{yz} \omega_i^y + I_i^z \omega_i^z) \mathbf{z}_i =$$

$$= \sum_{\xi} I_i^{\xi} \omega_i^{\xi} \boldsymbol{\xi}_i - (I_i^{xy} \mathbf{y}_i + I_i^{xz} \mathbf{z}_i) \omega_i^x - (I_i^{xy} \mathbf{x}_i + I_i^{yz} \mathbf{z}_i) \omega_i^y - (I_i^{xz} \mathbf{x}_i + I_i^{yz} \mathbf{y}_i) \omega_i^z = \sum_{\xi} \omega_i^{\xi} \mathbf{I}_i^{\xi},$$

где $\mathbf{I}_i^x = I_i^x \mathbf{x}_i - I_i^{xy} \mathbf{y}_i - I_i^{xz} \mathbf{z}_i$, $\mathbf{I}_i^y = -I_i^{xy} \mathbf{x}_i + I_i^y \mathbf{y}_i - I_i^{yz} \mathbf{z}_i$, $\mathbf{I}_i^z = -I_i^{xz} \mathbf{x}_i - I_i^{yz} \mathbf{y}_i + I_i^z \mathbf{z}_i$; I_i^{xy} , I_i^{xz} , I_i^{yz} – центробежные моменты инерции тела m_{oi} в его ССК. Вектор \mathbf{I}_i^{ξ} в ССК(i) неподвижен. Следовательно, $\dot{\mathbf{K}}_i = \sum_{\xi} (\omega_i^{\xi} \mathbf{I}_i^{\xi})' = \sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} \mathbf{I}_i^{\xi} + \omega_i^{\xi} \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i^{\xi}) = \sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} \mathbf{I}_i^{\xi} + \omega_i^{\xi} \sum_{\eta} \omega_i^{\eta} \boldsymbol{\eta}_i \times \mathbf{I}_i^{\xi})$.

Развертывая суммы по ξ и η с учетом равенств:

$$\mathbf{x}_i \times \mathbf{I}_i^x = \mathbf{x}_i \times (I_i^x \mathbf{x}_i - I_i^{xy} \mathbf{y}_i - I_i^{xz} \mathbf{z}_i) = I_i^{xz} \mathbf{y}_i - I_i^{xy} \mathbf{z}_i, \quad \mathbf{y}_i \times \mathbf{I}_i^x = -I_i^x \mathbf{z}_i - I_i^{xz} \mathbf{x}_i;$$

$$\mathbf{y}_i \times \mathbf{I}_i^y = \mathbf{y}_i \times (-I_i^{xy} \mathbf{x}_i + I_i^y \mathbf{y}_i - I_i^{yz} \mathbf{z}_i) = I_i^{xy} \mathbf{z}_i - I_i^{yz} \mathbf{x}_i, \quad \mathbf{x}_i \times \mathbf{I}_i^y = I_i^y \mathbf{z}_i + I_i^{yz} \mathbf{y}_i;$$

$$\mathbf{z}_i \times \mathbf{I}_i^z = \mathbf{z}_i \times (-I_i^{xz} \mathbf{x}_i - I_i^{yz} \mathbf{y}_i + I_i^z \mathbf{z}_i) = I_i^{yz} \mathbf{x}_i - I_i^{xz} \mathbf{y}_i, \quad \mathbf{x}_i \times \mathbf{I}_i^z = -I_i^z \mathbf{y}_i - I_i^{yz} \mathbf{z}_i;$$

$$\mathbf{y}_i \times \mathbf{I}_i^z = I_i^{xz} \mathbf{z}_i + I_i^z \mathbf{x}_i, \quad \mathbf{z}_i \times \mathbf{I}_i^y = I_i^{xy} \mathbf{y}_i + I_i^y \mathbf{x}_i, \quad \mathbf{z}_i \times \mathbf{I}_i^x = -I_i^{xy} \mathbf{y}_i - I_i^x \mathbf{x}_i,$$

получим

$$\dot{\mathbf{K}}_i = \dot{\omega}_i^x \mathbf{I}_i^x + \dot{\omega}_i^y \mathbf{I}_i^y + \dot{\omega}_i^z \mathbf{I}_i^z + \omega_i^x (I_i^{xz} \mathbf{y}_i - I_i^{xy} \mathbf{z}_i) + \omega_i^y (-I_i^x \mathbf{z}_i - I_i^{xz} \mathbf{x}_i) + \omega_i^z (I_i^y \mathbf{z}_i + I_i^{yz} \mathbf{y}_i) +$$

$$+ \dot{\omega}_i^y \mathbf{I}_i^y + \dot{\omega}_i^z \mathbf{I}_i^z + \omega_i^x [I_i^x (I_i^{yz} \mathbf{z}_i + I_i^{yz} \mathbf{y}_i) + \omega_i^y (I_i^{xy} \mathbf{z}_i - I_i^{yz} \mathbf{x}_i) + \omega_i^z (-I_i^{xy} \mathbf{y}_i - I_i^y \mathbf{x}_i)] +$$

$$+ \dot{\omega}_i^z \mathbf{I}_i^z + \dot{\omega}_i^x [I_i^x (-I_i^z \mathbf{y}_i - I_i^{yz} \mathbf{z}_i) + \omega_i^y (I_i^{xz} \mathbf{z}_i + I_i^z \mathbf{x}_i) + \omega_i^z (I_i^{yz} \mathbf{x}_i - I_i^{xz} \mathbf{y}_i)] =$$

$$= \dot{\omega}_i^x \mathbf{I}_i^x + \dot{\omega}_i^{x2} (I_i^{xz} \mathbf{y}_i - I_i^{xy} \mathbf{z}_i) + \dot{\omega}_i^y \mathbf{I}_i^y + \dot{\omega}_i^{y2} (I_i^{xy} \mathbf{z}_i - I_i^{yz} \mathbf{x}_i) + \dot{\omega}_i^z \mathbf{I}_i^z + \dot{\omega}_i^{z2} (I_i^{yz} \mathbf{x}_i - I_i^{xz} \mathbf{y}_i) +$$

$$+ \omega_i^x \omega_i^y (-I_i^x \mathbf{z}_i - I_i^{xz} \mathbf{x}_i + I_i^y \mathbf{z}_i + I_i^{yz} \mathbf{y}_i) + \omega_i^x \omega_i^z (I_i^y \mathbf{z}_i + I_i^{yz} \mathbf{y}_i - I_i^z \mathbf{y}_i - I_i^{yz} \mathbf{z}_i) +$$

$$+ \omega_i^y \omega_i^z (-I_i^{xy} \mathbf{y}_i - I_i^y \mathbf{x}_i + I_i^{xz} \mathbf{z}_i + I_i^z \mathbf{x}_i) = \sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} \mathbf{I}_i^{\xi} + \omega_i^{\xi 2} \mathbf{I}_i^{\xi}) + \omega_i^x \omega_i^y \mathbf{I}_i^{xy} + \omega_i^x \omega_i^z \mathbf{I}_i^{xz} + \omega_i^y \omega_i^z \mathbf{I}_i^{yz},$$

где $\mathbf{I}_{xi} = I_i^{xz} \mathbf{y}_i - I_i^{xy} \mathbf{z}_i$, $\mathbf{I}_{yi} = I_i^{xy} \mathbf{z}_i - I_i^{yz} \mathbf{x}_i$, $\mathbf{I}_{zi} = I_i^{yz} \mathbf{x}_i - I_i^{xz} \mathbf{y}_i$, $\mathbf{I}_i^{xy} = -I_i^{xz} \mathbf{x}_i + I_i^y \mathbf{y}_i + (I_i^y - I_i^x) \mathbf{z}_i$, $\mathbf{I}_i^{xz} = I_i^{xy} \mathbf{x}_i + (I_i^x - I_i^z) \mathbf{y}_i - I_i^{yz} \mathbf{z}_i$, $\mathbf{I}_i^{yz} = (I_i^z - I_i^y) \mathbf{x}_i - I_i^{xy} \mathbf{y}_i + I_i^{xz} \mathbf{z}_i$. Теперь окончательно получим

$$\mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N \dot{\mathbf{K}}_i = \sum_{i=j}^N [\sum_{\xi} (\dot{\omega}_i^{\xi} \mathbf{I}_{ij}^{\xi} + I_{\xi ij} \omega_i^{\xi 2}) + I_{ij}^{xy} \omega_i^x \omega_i^y + I_{ij}^{xz} \omega_i^x \omega_i^z + I_{ij}^{yz} \omega_i^y \omega_i^z], \quad (1.7)$$

где $I_{ij}^x = I_i^x x_{ij}^q - I_i^{xy} y_{ij}^q - I_i^{xz} z_{ij}^q$, $I_{ij}^y = -I_i^{xy} x_{ij}^q + I_i^y y_{ij}^q - I_i^{yz} z_{ij}^q$, $I_{ij}^z = -I_i^{xz} x_{ij}^q - I_i^{yz} y_{ij}^q + I_i^z z_{ij}^q$,

$$I_{xij} = I_i^{xz} y_{ij}^q - I_i^{xy} z_{ij}^q, \quad I_{yij} = I_i^{xy} z_{ij}^q - I_i^{yz} x_{ij}^q, \quad I_{zij} = I_i^{yz} x_{ij}^q - I_i^{xz} y_{ij}^q,$$

$$I_{ij}^{xy} = -I_i^{xz} x_{ij}^q + I_i^y y_{ij}^q + I_i^z z_{ij}^q, \quad I_{ij}^{xz} = I_i^{xy} x_{ij}^q + I_i^b y_{ij}^q - I_i^{yz} z_{ij}^q, \quad I_{ij}^{yz} = I_i^a x_{ij}^q - I_i^{xy} y_{ij}^q + I_i^c z_{ij}^q.$$

Если ССК(i) = ГСК(i), то $I_i^{xy} = I_i^{xz} = I_i^{yz} = 0$ и обозначения в формуле (1.7) имеют следующие значения:

$$I_{ij}^x = I_i^x x_{ij}^q, \quad I_{ij}^y = I_i^y y_{ij}^q, \quad I_{ij}^z = I_i^z z_{ij}^q, \quad I_{xij} = I_{yij} = I_{zij} = 0, \quad I_{ij}^{xy} = I_i^c z_{ij}^q, \quad I_{ij}^{xz} = I_i^b y_{ij}^q, \quad I_{ij}^{yz} = I_i^a x_{ij}^q.$$

1.4. Проекция абсолютных угловых скоростей и ускорений тел на оси их ССК. Величины ω_i^x , ω_i^y , ω_i^z , $\dot{\omega}_i^x$, $\dot{\omega}_i^y$, $\dot{\omega}_i^z$ можно выписать по следующим прямым рекуррентным формулам:

$$\omega_j^{\xi} = \sum_{\eta} \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} \omega_{j-1}^{\eta} + \mathbf{q}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j \dot{q}_j. \quad (1.8)$$

Если \mathbf{q}_j совпадает с ортом одной из осей ССК(j), то

$$\mathbf{q}_j = \boldsymbol{\xi}_j \Rightarrow \dot{\omega}_j^{\xi} = \sum_{\eta} \mathbf{q}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} \dot{\omega}_{j-1}^{\eta} + \dot{q}_j; \quad (1.9)$$

$$\mathbf{q}_j \neq \boldsymbol{\xi}_j \Rightarrow \dot{\omega}_j^{\xi} = \sum_{\eta} \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} \dot{\omega}_{j-1}^{\eta} + \dot{q}_j \in_{q \xi \zeta} \omega_j^{\zeta}, \quad (1.10)$$

где $j = 1, 2, \dots, N$; $\omega_0^{\eta} = 0$.

Доказательство формул (1.8)–(1.10). По формуле сложения угловых скоростей тел имеем $\boldsymbol{\omega}_j = \boldsymbol{\omega}_{j-1} + \dot{q}_j \mathbf{q}_j$, где $j = 1, 2, \dots, N$; $\boldsymbol{\omega}_0 = 0$. Используем представления $\boldsymbol{\omega}_j = \sum_{\xi} \omega_j^{\xi} \boldsymbol{\xi}_j$, $\boldsymbol{\omega}_{j-1} = \sum_{\xi} \omega_{j-1}^{\xi} \boldsymbol{\xi}_{j-1}$, где ω_j^x , ω_j^y , ω_j^z – проекции вектора $\boldsymbol{\omega}_j$ на оси ССК(j). Разложим орты $\boldsymbol{\xi}_{j-1}$ осей ССК(j-1) по ортам осей ССК(j). Тогда получим $\boldsymbol{\xi}_{j-1} = \sum_{\eta} \xi_{j-1}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j$, где ξ_{j-1}^x , ξ_{j-1}^y , ξ_{j-1}^z – проекции орта $\boldsymbol{\xi}_{j-1}$ на оси ССК(j), т. е. $\xi_{j-1}^{\eta} = \boldsymbol{\xi}_{j-1} \cdot \boldsymbol{\eta}_j$.

Разложим орт \mathbf{q}_j на оси ССК(j). Получим $\mathbf{q}_j = \sum_{\eta} q_j^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j$, где q_j^x, q_j^y, q_j^z – проекции орта \mathbf{q}_j на оси ССК(j) и тогда

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_j &= \sum_{\xi} \omega_j^{\xi} \boldsymbol{\xi}_j = \boldsymbol{\omega}_{j-1} + \dot{q}_j \mathbf{q}_j = \sum_{\xi} \omega_{j-1}^{\xi} \sum_{\eta} \xi_{j-1}^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j + \dot{q}_j \sum_{\eta} q_j^{\eta} \boldsymbol{\eta}_j = \\ &= \sum_{\eta} \boldsymbol{\eta}_j (\sum_{\xi} \xi_{j-1}^{\eta} \omega_{j-1}^{\xi} + q_j^{\eta} \dot{q}_j) = \sum_{\xi} \boldsymbol{\xi}_j (\sum_{\eta} \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} \omega_{j-1}^{\eta} + \mathbf{q}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j \dot{q}_j). \end{aligned}$$

Отсюда следует искомая формула (1.8), из которой с учетом равенства $\mathbf{q}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j = \text{const}$ получим $\dot{\omega}_j^{\xi} = \sum_{\eta} (\xi_{j-1}^{\eta} \dot{\omega}_{j-1}^{\eta} + \dot{\xi}_{j-1}^{\eta} \omega_{j-1}^{\eta}) + \mathbf{q}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j \ddot{q}_j$. Если учесть равенства

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{j-1}^{\eta} &= \dot{\boldsymbol{\xi}}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} + \boldsymbol{\xi}_j \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}}_{j-1} = \boldsymbol{\omega}_j \times \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} + \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_{j-1} \times \boldsymbol{\eta}_{j-1} = \\ &= (\boldsymbol{\omega}_j - \boldsymbol{\omega}_{j-1}) \times \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} = \dot{q}_j \mathbf{q}_j \times \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1}, \end{aligned}$$

то

$$\dot{\omega}_j^{\xi} = \sum_{\eta} (\boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1} \dot{\omega}_{j-1}^{\eta} + \dot{q}_j \omega_{j-1}^{\eta} \mathbf{q}_j \times \boldsymbol{\xi}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_{j-1}) + \mathbf{q}_j \cdot \boldsymbol{\xi}_j \ddot{q}_j. \tag{1.11}$$

Если орт оси ВКП(j) совпадает с ортом одной из осей ССК(j), то формула (1.11) принимает искомый вид. Действительно, если $\mathbf{q}_j = \boldsymbol{\xi}_j$, то из формулы (1.11) получим формулу (1.9). Если $\mathbf{q}_j \neq \boldsymbol{\xi}_j$, то используя символ Леви-Чивита получим формулу (1.10). Формулы (1.8)–(1.10) доказаны.

1.5. *Таблицы Направляющих Косинусов (НК)*. В формулах кинематики, статики и динамики МС используются НК осей ССК(j) относительно осей ССК(i), где $i < j$. Для НК будем использовать обозначения $\xi_{ji}^{\eta} = \boldsymbol{\eta}_i \cdot \boldsymbol{\xi}_j$, где символы ξ, η принимают значения из множества символов $\{x, y, z\}$. Формулы выписывания НК представлены, например, в работах [12, 13]. Здесь приведем две таблицы (из статьи [12]), позволяющие легко и быстро находить значения НК $\xi_{j,j-1}^{\eta}$ и $\xi_{j,j-2}^{\eta}$.

Значения НК осей ССК(j) ВКП(j) относительно ССК(j – 1) принадлежат множеству $\{0, 1, c_j, s_j, -s_j\}$. Эти значения можно взять из табл. 1.

Простые направляющие косинусы
The simple direction cosines

Таблица 1
Table 1

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

Табл. 1 состоит из полос заголовка в верхней и левой части и трех блоков, разделенных друг от друга двойными сплошными линиями. Каждый блок содержит девять ячеек, стоящих на пересечении трех столбцов, с именами x_j, y_j, z_j и трех строк с именами $x_{j-1}, y_{j-1}, z_{j-1}$. В ячейках блока записаны НК осей $O_j \mathbf{x}_j, O_j \mathbf{y}_j, O_j \mathbf{z}_j$ относительно осей $O_j \mathbf{x}_{j-1}, O_j \mathbf{y}_{j-1}, O_j \mathbf{z}_{j-1}$. Использование табл. 1 при выписывании формул вычисления НК ускоряет этот процесс. Если тело m_{oj} вращается вокруг оси $O_j \mathbf{x}_j$, то искомый НК находится в первом блоке (с именем $\mathbf{q}_j = \mathbf{x}_j$). Если тело m_{oj} вращается вокруг оси $O_j \mathbf{y}_j$, то искомый НК находится во втором блоке (с именем $\mathbf{q}_j = \mathbf{y}_j$). Если тело m_{oj} вращается вокруг оси $O_j \mathbf{z}_j$, то искомый НК находится в третьем блоке (с именем $\mathbf{q}_j = \mathbf{z}_j$). Выбор ячейки в найденном блоке определяется по обозначению НК. Например, значение НК u_{jj-1}^x расположено на пересечении столбца y_j и строки x_{j-1} найденного блока. Если тело m_{o6} вращается вокруг оси $O_6 \mathbf{y}_6$, то НК осей ССК(6) находятся в блоке $\mathbf{q}_j = \mathbf{y}_j$, где $j = 6$, т. е. $x_{65}^x = c_6, u_{65}^x = 0, z_{65}^x = s_6$ и т. д. Остальные детали – в примерах.

Для вычисления НК орт осей ССК(j) в ССК(j – 2) здесь используется табл. 2, где $s_{j-1,j} = \sin(q_{j-1} + q_j), c_{j-1,j} = \cos(q_{j-1} + q_j)$.

Табл. 2 состоит из трех вертикальных колонок с именами $\mathbf{q}_j = \mathbf{x}_j, \mathbf{q}_j = \mathbf{y}_j, \mathbf{q}_j = \mathbf{z}_j$, которые будем называть левой, центральной и правой, а также трех горизонтальных полос (без имен), которые будем называть верхней, средней и нижней. На пересечении колонки и полосы расположен

блок. Таким образом, в таблице девять блоков, отделенных друг от друга двойными сплошными линиями. В каждом блоке по девять ячеек, содержащих значения НК. Для выбора нужного НК необходимо выбрать блок и в нем ячейку. Если тело m_{oj} вращается вокруг оси O_jx_j , то нужный блок находится в левой колонке (с именем $q_j = x_j$). Если тело m_{oj} вращается вокруг оси O_jy_j , то нужный блок находится в центральной колонке (с именем $q_j = y_j$). Иначе – в правой колонке. Если при этом тело m_{oj-1} вращается вокруг оси $O_{j-1}x_{j-1}$, то искомым является блок в верхней полосе выбранной колонки. Если тело m_{oj-1} вращается вокруг оси $O_{j-1}y_{j-1}$, то искомым является блок в средней полосе выбранной колонки. Иначе – в нижней полосе. Выбор ячейки в найденном блоке определяется по обозначению НК. Например, значение НК x_{jj-2}^z расположено на пересечении столбца x_j и строки z_{j-2} найденного блока. В случае ПКП($j - 1$) достаточно вместо номера $j - 1$ взять номер $j - 2$. Если и КП($j - 2$) является поступательной, то вместо $j - 1$ нужно взять номер $j - 3$ и т. д. Остальные детали использования табл. 2 приведены в примерах.

Вычисляемые значения направляющих косинусов

Таблица 2

The calculated direction cosines

Table 2

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

Формулы в ячейках табл.1, 2 легко верифицировать путем вычисления квадратов орт осей ССК (ОСК) и скалярных произведений орт взаимно перпендикулярных осей. Действительно, девять выражений в каждом блоке удовлетворяют двенадцати тождествам, т. е. сумма квадратов выражений, стоящих в каждой строке или в столбце, равна единице, а сумма произведений соответствующих выражений, стоящих в любых двух строках или столбцах, равна нулю.

1.6. Формулы выписывания скалярных произведений орт. Из формулы (1.1) следует, что формула $F_i = \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{F}_i$ в общем случае преобразуется к сумме произведений постоянных скалярных величин на выражения $\xi_i \cdot (q_k \boldsymbol{\eta}_j)''_{t^2}$ для различных значений индексов j, k и символов $\xi, \eta \in \{x, y, z\}$, где $q_k = 1$ для ВКП(k). Из формулы (1.2) следует, что формула $M_i = \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{M}_i$ в общем случае преобразуется к сумме произведений скалярных величин на выражения $\xi_i \cdot \boldsymbol{\eta}_j \times (q_m \boldsymbol{\zeta}_k)''_{t^2}$ для различных сочетаний индексов j, k, m и символов $\xi, \eta, \zeta \in \{x, y, z\}$, где $q_m = 1$ для ВКП(m). Для выписывания этих выражений будем использовать следующие общие формулы:

$$(q_k \boldsymbol{\eta}_j)''_{t^2} = \ddot{q}_k \boldsymbol{\eta}_j + 2\dot{q}_k \dot{\boldsymbol{\eta}}_j + q_k \ddot{\boldsymbol{\eta}}_j, \quad (1.12)$$

где

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_j = \boldsymbol{\omega}_j \times \boldsymbol{\eta}_j = \sum_{\zeta} \omega_j^{\zeta} \boldsymbol{\zeta}_j \times \boldsymbol{\eta}_j = \sum_{\zeta} \omega_j^{\zeta} \epsilon_{\zeta \eta \nu} \mathbf{v}_j; \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\eta}}_j &= (\boldsymbol{\omega}_j \times \boldsymbol{\eta}_j)'_t = \dot{\boldsymbol{\omega}}_j \times \boldsymbol{\eta}_j + \boldsymbol{\omega}_j \times (\boldsymbol{\omega}_j \times \boldsymbol{\eta}_j) = \sum_{\zeta} \dot{\omega}_j^{\zeta} \boldsymbol{\zeta}_j \times \boldsymbol{\eta}_j + \boldsymbol{\omega}_j \cdot \boldsymbol{\eta}_j \boldsymbol{\omega}_j - \omega_j^2 \boldsymbol{\eta}_j = \\ &= \sum_{\zeta} \dot{\omega}_j^{\zeta} \epsilon_{\zeta \eta \nu} \mathbf{v}_j + \omega_j^{\eta} \sum_{\zeta} \omega_j^{\zeta} \boldsymbol{\zeta}_j - \omega_j^2 \boldsymbol{\eta}_j. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Для представления выражений $\xi_i \cdot (q_k \boldsymbol{\eta}_j)''_{t^2}$ для различных значений индексов i, j, k и символов $\xi, \eta \in \{x, y, z\}$ через квазискорости нам потребуются следующие формулы:

$$\xi_i \cdot \dot{\xi}_i = \xi_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i \times \xi_i = 0. \quad (1.15)$$

Используя формулу (1.13), получим

$$\xi_i \cdot \eta_j = \sum_{\zeta} \in_{\zeta\eta\nu} v_{ji}^{\xi} \omega_j^{\zeta}, \quad (1.16)$$

где $v_{ji}^{\xi} = v_j \cdot \xi_i$. Отсюда для $i = 0$ с учетом обозначения $v_{j0}^{\xi} = v_j^{\xi}$ получим

$$\xi \cdot \eta_j = \sum_{\zeta} \in_{\zeta\eta\nu} v_j^{\xi} \omega_j^{\zeta}. \quad (1.17)$$

Учитывая, что $\xi_{jj}^{\xi} = 1$ и $v_{jj}^{\xi} = 0$, где $v \neq \xi$, из формулы (1.16) для $i = j$ получим

$$\xi_j \cdot \eta_j = \in_{\zeta\eta\xi} \omega_j^{\zeta}. \quad (1.18)$$

Используя формулу (1.14), получим

$$\begin{aligned} \xi_i \cdot \eta_j &= \sum_{\zeta} \in_{\zeta\eta\nu} v_{ji}^{\xi} \omega_j^{\zeta} + \omega_j^{\eta} \sum_{\zeta} \zeta_{ji}^{\xi} \omega_j^{\zeta} - \eta_{ji}^{\xi} \sum_{\zeta} \omega_j^{\zeta^2} = \\ &= \sum_{\zeta \neq \eta} [\in_{\zeta\eta\nu} v_{ji}^{\xi} \omega_j^{\zeta} + (\zeta_{ji}^{\xi} \omega_j^{\eta} - \eta_{ji}^{\xi} \omega_j^{\zeta}) \omega_j^{\zeta}]. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Здесь используется знак суммирования по двум символьным индексам из множества $\{x, y, z\}$. Исключаемый символ записывается под знаком суммы. Например, $\sum_{\zeta \neq x} a^{\zeta} = a^y + a^z$. В выражении (1.19) символы ξ и η могут совпадать.

Из формулы (1.19) в случае $\xi_i = \xi$ переобозначив $v_{ji}^{\xi} = v_j^{\xi}$, $\zeta_{ji}^{\xi} = \zeta_j^{\xi}$, $\eta_{ji}^{\xi} = \eta_j^{\xi}$ получим

$$\xi \cdot \eta_j = \sum_{\zeta \neq \eta} [\in_{\zeta\eta\nu} v_j^{\xi} \omega_j^{\zeta} + (\zeta_j^{\xi} \omega_j^{\eta} - \eta_j^{\xi} \omega_j^{\zeta}) \omega_j^{\zeta}]. \quad (1.20)$$

Если $j = i$ и $\xi = \eta$, то из формулы (1.19) получим

$$\xi_i \cdot \xi_i = \sum_{\zeta \neq \xi} [\in_{\zeta\xi\nu} v_{ii}^{\xi} \omega_i^{\zeta} + (\zeta_{ii}^{\xi} \omega_i^{\xi} - \xi_{ii}^{\xi} \omega_i^{\zeta}) \omega_i^{\zeta}] = - \sum_{\zeta \neq \xi} \omega_i^{\zeta^2}. \quad (1.21)$$

Если $j = i$, то из первого выражения (1.19) в случае $\xi \neq \eta$ получим

$$\xi_i \cdot \eta_i = \sum_{\zeta} \in_{\zeta\eta\nu} v_{ii}^{\xi} \omega_i^{\zeta} + \omega_i^{\eta} \sum_{\zeta} \zeta_{ii}^{\xi} \omega_i^{\zeta} = \in_{\zeta\eta\xi} \omega_i^{\zeta} + \omega_i^{\eta} \omega_i^{\xi}. \quad (1.22)$$

Для преобразования выражения $\xi_i \cdot \eta_j \times (q_m \zeta_k)''_2$, где $i \leq j$, к использованию приведенных формул мы будем сначала вычислять вектор $\xi_i \times \eta_j$. Если $i = j$, то $\xi_i \times \eta_i = \in_{\xi\eta\nu} v_i$, иначе $\xi_i \times \eta_j = \xi_i \times \sum_{\nu} \eta_{ji}^{\nu} v_i = \sum_{\nu} \eta_{ji}^{\nu} \in_{\xi\nu\mu} \mu_i$. Детали рассмотрим в примерах.

Выписывание УД МС рекомендуем начинать с выписывания выражений m_j . Для повторного использования ранее выписанных выражений формулу вычисления m_j представим в следующем рекуррентном виде:

$$m_j = \sum_{i=j}^N (m_{ci} c_i + m_{i+1} R_{i+1}) = m_{cj} c_j + m_{j+1} R_{j+1} + m_{j+1}, \quad (1.23)$$

где $j = N, N-1, \dots, 1$; $m_N = m_{cN} c_N$.

1.7. Формула выписывания УД ВКП(j) в случае $q_j = q_k$. Если $q_j = q_k$, где $j < k$, то

$$M_j = q_j \times m_{jk} \cdot (\ddot{r}_{j-1} + gy) + q_j \cdot \sum_{i=j+1}^k [(m_{ik} + m_i R_i) \times \ddot{R}_i + R_i \times \ddot{m}_i + \dot{K}_{i-1}] + M_k, \quad (1.24)$$

где $m_{jk} = \sum_{i=j}^{k-1} (m_{ci} c_i + m_{i+1} R_{i+1})$.

Доказательство формулы (1.24). Если $j < k$, то $r_k = r_j + R_{jk}$, где $R_{jk} = \sum_{i=j+1}^k R_i$, и $m_j = m_{jk} + m_k$, $G_j = g m_j \times y = G_k + g m_{jk} \times y$. Отсюда получим

$$\begin{aligned} q_j \cdot m_j \times \ddot{r}_j &= q_j \cdot m_j \times (\ddot{r}_k - \ddot{R}_{jk}) = q_j \cdot m_j \times \ddot{r}_k - q_j \cdot m_j \times \ddot{R}_{jk} = \\ &= q_j \cdot (m_{jk} + m_k) \times \ddot{r}_k - q_j \cdot m_j \times \ddot{R}_{jk} = q_j \cdot m_{jk} \times \ddot{r}_k + q_k \cdot m_k \times \ddot{r}_k - q_j \cdot m_j \times \ddot{R}_{jk}. \end{aligned}$$

Теперь, используя формулы (1.2) и $q_j \cdot G_j = q_k \cdot G_k + g q_k \cdot m_{jk} \times y$, получим

$$\begin{aligned} M_j &= q_j \cdot M_j = q_j \cdot m_j \times \ddot{r}_j + q_j \cdot \sum_{i=j}^N \dot{K}_i + q_j \cdot \sum_{i=j+1}^N [(m_i R_i + m_i) \times \ddot{R}_i + R_i \times \ddot{m}_i] + \\ &+ q_j \cdot G_j = q_j \cdot m_{jk} \times \ddot{r}_k - q_j \cdot m_j \times \ddot{R}_{jk} + q_j \cdot \sum_{i=j}^{k-1} \dot{K}_i + \\ &+ q_j \cdot \sum_{i=j+1}^k [(m_i R_i + m_i) \times \ddot{R}_i + R_i \times \ddot{m}_i] + g q_k \cdot m_{jk} \times y + M_k = \\ &= A_{jk} + q_j \cdot m_{jk} \times \ddot{r}_{j-1} + q_j \cdot \sum_{i=j+1}^k (\dot{K}_{i-1} + R_i \times \ddot{m}_i) + g q_k \cdot m_{jk} \times y + M_k, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_{jk} &= q_j \cdot m_{jk} \times \sum_{i=j+1}^k \ddot{R}_i - q_j \cdot m_j \times \sum_{i=j+1}^k \ddot{R}_i + q_j \cdot \sum_{i=j+1}^k (m_i R_i + m_i) \times \ddot{R}_i = \\ &= q_j \cdot \sum_{i=j+1}^k (m_{jk} - m_j + m_i R_i + m_i) \times \ddot{R}_i = q_j \cdot \sum_{i=j+1}^k (m_{ik} + m_i R_i) \times \ddot{R}_i, \end{aligned}$$

так как $m_{jk} - m_j + m_i = m_{jk} - m_{jk} - m_k + m_{ik} + m_k = m_{ik}$, что доказывает формулу (1.24).

Перед практическим использованием приведенных формул коротко остановимся на некоторых классификационных признаках МС. МС считают порталной, если НТО закреплено на по-

толке. Если НТО установлено на полу, то МС считают напольной. Если перенос точки подвеса захвата МС осуществляют тела трех ПКП, то МС работает в декартовой СК (МС с декартовой СК). Если перенос точки подвеса захвата осуществляют ВКП(1) и две ПКП, то МС работает в цилиндрической СК (цилиндрическая МС). Если перенос точки подвеса захвата осуществляют тела двух ВКП и одной ПКП, то говорят, что МС работает в сферической СК (сферическая МС). В остальных случаях будем считать, что рассматриваемая МС работает в ангулярной СК.

С целью упрощения схем МС будем изображать тела ВКП в их исходном (начальном) положении, т. е. когда их ОК равны нулю. И в этом положении будем вводить ССК(i) $O_i x_i y_i z_i$ так, чтобы направления осей $O_i x_i$, $O_i y_i$, $O_i z_i$ были параллельны соответствующим осям неподвижной системы координат (НСК) $Oxyz$, жестко связанной с НТО. Здесь x – орт оси абсцисс, направленной горизонтально вправо, y – орт оси ординат, направленной вертикально вверх, z – орт оси аппликата, направленной так, что НСК – правая. Тогда оси ССК тел на схемах можно не изображать. Достаточно показать начало НСК, а также положения точек O_i и C_i , так как положение осей НСК и ориентация в пространстве орт x_i , y_i , z_i следует из их определений. В дополнительном описании нуждаются только положения орт p_i для ПКП(i) и орт q_i для ВКП(i). Для описания этих положений достаточно выразить орты осей КП(i) через орты x_i , y_i , z_i . Например, если в исходном положении ось $O_i q_i$ ВКП(i) вертикальна, то $q_i = y_i$. Если ось $O_i q_i$ ВКП(i) направлена горизонтально вправо, то $q_i = x_i$, и если она смотрит на наблюдателя, то $q_i = z_i$.

2. Выписывание УД МС с тремя ПКП (Пример 1)

На рис. 1 изображена схема портальной МС с декартовой СК.

Из рис. 1 видно, что для этой МС имеют место следующие равенства ОСК:

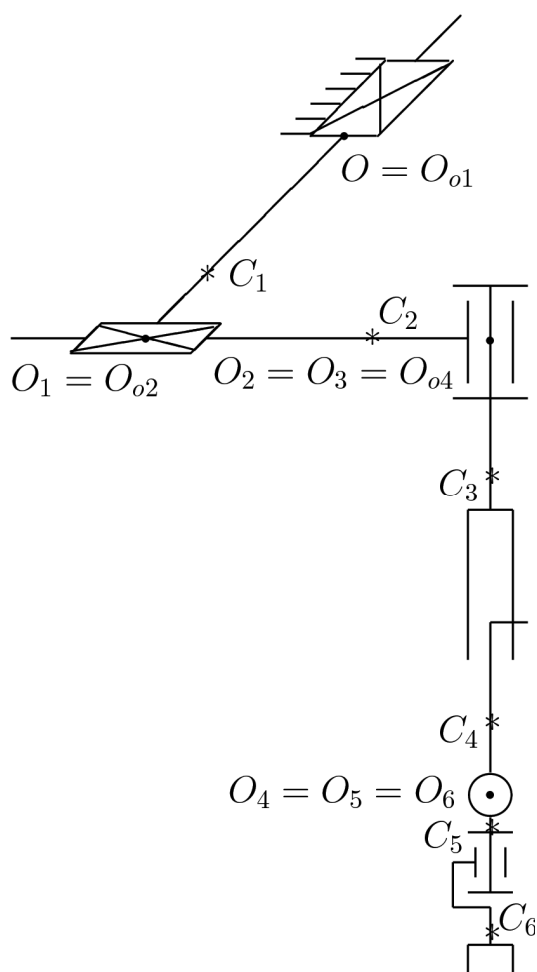


Рис. 1. МС с декартовой СК
Fig. 1 MS with cartesian CS

$$x = x_1 = x_2, x_3 = x_4; y = y_1 = y_2 = y_3 = y_4, \\ y_5 = y_6; z = z_1 = z_2, z_3 = z_4 = z_5.$$

Эти равенства используются для понижения, повышения и сближения индексов ОСК в операциях векторной алгебры. Например, в скалярном произведении $y_1 \cdot z_4 = y_4 \cdot z_4 = 0$ индекс орта y_1 повышен до четырех. В произведении $x_3 \cdot z_5 = x_3 \cdot z_3 = 0$ индекс орта z_5 понижен до трех. В векторном произведении $y_1 \times x_4 = y_3 \times x_3 = -z_3$ индексы сомножителей сближены до совпадения.

Орты КП(j) имеют следующие выражения через ОСК(j): $p_1 = z_1 = \text{const}$ – орт ПКП(1), направленный горизонтально к наблюдателю; $p_2 = x_2 = \text{const}$ – орт ПКП(2), направленный горизонтально вправо; $q_3 = y_3 = \text{const}$ – орт ВКП(3), направленный вертикально вверх; $p_4 = -y_4 = \text{const}$ – орт ПКП(4), направленный по вертикали вниз; $q_5 = z_5$ – орт ВКП(5), лежащий в горизонтальной плоскости и меняющий свою ориентацию вместе с вращением тела m_{03} ; $q_6 = y_6$ – орт ВКП(6), поворачивающийся на угол q_5 в вертикальной плоскости, которая вращается вокруг вертикальной оси вместе с телом m_{03} .

Межполюсные векторы $R_j = O_{j-1} O_j$ имеют следующие выражения через ОСК(j-1) и ОК ПКП(j):

$$R_1 = q_1 z, R_2 = q_2 x_1, R_3 = 0, \\ R_4 = -q_4 y_3, R_5 = R_6 = 0.$$

Орты c_j имеют следующие выражения через ОСК(j):

$$c_1 = -z_1, c_2 = -x_2, c_3 = -y_3, \\ c_4 = y_4, c_5 = -y_5, c_6 = -y_6.$$

Перечисленные выражения составляют формальное описание рассматриваемой МС и используются для перехода к ОСК в выписываемых формулах (детали в примерах).

2.1. Выписывание формул вычисления движущих сил

1. Выпишем формулы вычисления \mathbf{m}_i через ОСК с максимальным понижением индексов.

По формуле (1.23) выпишем

$$\mathbf{m}_6 = m_{c6}\mathbf{c}_6 = -m_{c6}\mathbf{y}_5; \mathbf{m}_5 = m_{c5}\mathbf{c}_5 + \mathbf{m}_6 = -a\mathbf{y}_5,$$

где $a = m_{c5} + m_{c6}$; $\mathbf{m}_4 = m_{c4}\mathbf{c}_4 + \mathbf{m}_5 = m_{c4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5$;

$$\mathbf{m}_3 = m_{c3}\mathbf{c}_3 + m_4\mathbf{R}_4 + \mathbf{m}_4 = -m_{c3}\mathbf{y} - m_4q_4\mathbf{y} + m_{c4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5 = m_{q4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5,$$

где $m_{q4} = m_{c4} - m_{c3} - m_4q_4$;

$$\mathbf{m}_2 = m_{c2}\mathbf{c}_2 + \mathbf{m}_3 = -m_{c2}\mathbf{x} + m_{q4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5;$$

$$\mathbf{m}_1 = m_{c1}\mathbf{c}_1 + m_2\mathbf{R}_2 + \mathbf{m}_2 = -m_{c1}\mathbf{z} + m_{q2}\mathbf{x} + m_{q4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5,$$

где $m_{q2} = m_2q_2 - m_{c2}$.

2. Выпишем формулы вычисления $\ddot{\mathbf{R}}_i$, $\ddot{\mathbf{r}}_j = \sum_{i=1}^j \ddot{\mathbf{R}}_i$ и $\ddot{\mathbf{m}}_i$ через ОСК, ОК, ОС и ОУ ПКП. Имеем

$$\ddot{\mathbf{R}}_1 = \ddot{q}_1\mathbf{z}; \ddot{\mathbf{R}}_2 = \ddot{q}_2\mathbf{x}; \ddot{\mathbf{R}}_3 = 0; \ddot{\mathbf{R}}_4 = -\ddot{q}_4\mathbf{y}; \ddot{\mathbf{R}}_5 = \ddot{\mathbf{R}}_6 = 0.$$

Следовательно,

$$\ddot{\mathbf{r}}_1 = \ddot{q}_1\mathbf{z}; \ddot{\mathbf{r}}_2 = \ddot{\mathbf{r}}_3 = \ddot{q}_1\mathbf{z} + \ddot{q}_2\mathbf{x}; \ddot{\mathbf{r}}_4 = \ddot{\mathbf{r}}_5 = \ddot{\mathbf{r}}_6 = \ddot{q}_1\mathbf{z} + \ddot{q}_2\mathbf{x} - \ddot{q}_4\mathbf{y};$$

$$\ddot{\mathbf{m}}_6 = -m_{c6}\ddot{\mathbf{y}}_5; \ddot{\mathbf{m}}_5 = -a\ddot{\mathbf{y}}_5; \ddot{\mathbf{m}}_4 = \ddot{\mathbf{m}}_5; \ddot{\mathbf{m}}_3 = -m_4\ddot{q}_4\mathbf{y} - a\ddot{\mathbf{y}}_5;$$

$$\ddot{\mathbf{m}}_2 = \ddot{\mathbf{m}}_3; \ddot{\mathbf{m}}_1 = m_2\ddot{q}_2\mathbf{x} - m_4\ddot{q}_4\mathbf{y} - a\ddot{\mathbf{y}}_5.$$

3. Выпишем формулы вычисления движущих сил $F_j = \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{F}_j$ через скалярные произведения ОСК на их производные по времени. Используя формулу (1.1), выпишем

$$F_1 = \mathbf{z} \cdot \mathbf{F}_1 = \mathbf{z} \cdot (m_1\ddot{\mathbf{r}}_1 + \ddot{\mathbf{m}}_1 + m_{g1}\mathbf{y}) = \mathbf{z} \cdot (m_1\ddot{q}_1\mathbf{z} + m_2\ddot{q}_2\mathbf{x} - m_4\ddot{q}_4\mathbf{y} - a\ddot{\mathbf{y}}_5 + m_{g1}\mathbf{y}) =$$

$$= m_1\ddot{q}_1 - a\mathbf{z} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5;$$

$$F_2 = \mathbf{x} \cdot \mathbf{F}_2 = \mathbf{x} \cdot (m_2\ddot{\mathbf{r}}_2 + \ddot{\mathbf{m}}_2 + m_{g2}\mathbf{y}) = \mathbf{x} \cdot [m_2(\ddot{q}_1\mathbf{z} + \ddot{q}_2\mathbf{x}) - m_4\ddot{q}_4\mathbf{y} - a\ddot{\mathbf{y}}_5 + m_{g2}\mathbf{y}] =$$

$$= m_2\ddot{q}_2 - a\mathbf{x} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5;$$

$$F_4 = -\mathbf{y} \cdot \mathbf{F}_4 = -\mathbf{y} \cdot (m_4\ddot{\mathbf{r}}_4 + \ddot{\mathbf{m}}_4 + m_{g4}\mathbf{y}) = -\mathbf{y} \cdot [m_4(\ddot{q}_1\mathbf{z} + \ddot{q}_2\mathbf{x} - \ddot{q}_4\mathbf{y}) - a\ddot{\mathbf{y}}_5 + m_{g4}\mathbf{y}] =$$

$$= m_4\ddot{q}_4 + a\mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5 - m_{g4}.$$

4. Выразим скалярные произведения $\mathbf{x} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$, $\mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$, $\mathbf{z} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$, т. е. $\xi \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$ через НК и квазискорости.

Для $\eta = \mathbf{y}$, $j = 5$ формула (1.20) принимает вид

$$\xi \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5 = \epsilon_{xyz} z_5^\xi \omega_5^y + (x_5^\xi \omega_5^y - y_5^\xi \omega_5^x) \omega_5^z + \epsilon_{zyx} x_5^\xi \omega_5^z + (z_5^\xi \omega_5^y - y_5^\xi \omega_5^z) \omega_5^x =$$

$$= z_5^\xi (\omega_5^x + \omega_5^y \omega_5^z) - x_5^\xi (\omega_5^z - \omega_5^x \omega_5^y) - y_5^\xi (\omega_5^z + \omega_5^x \omega_5^z). \quad (2.1)$$

5. Выпишем формулы вычисления ω_1^ξ через ОС ВКП и НК, взятые из табл. 1.

Первые два тела не вращаются. Поэтому $\omega_1 = \omega_2 = 0$, т. е. $\omega_1^\xi = \omega_2^\xi = 0$ для всех ξ .

Для $j = 3$ имеем $\mathbf{q}_3 = \mathbf{y}_3$. Поэтому по формуле (1.8) выпишем

$$\omega_3^\xi = \sum_{\eta} \xi_3 \cdot \eta_2 \omega_2^\eta + \mathbf{q}_3 \cdot \xi_3 \dot{q}_3 = \mathbf{q}_3 \cdot \xi_3 \dot{q}_3 = \mathbf{y}_3 \cdot \xi_3 \dot{q}_3,$$

т. е. $\omega_3^x = \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{x}_3 \dot{q}_3 = 0$, $\omega_3^y = \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{y}_3 \dot{q}_3 = \dot{q}_3$, $\omega_3^z = \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{z}_3 \dot{q}_3 = 0$.

КП(4) = ПКП. Поэтому $\omega_4 = \omega_3$, т. е. $\omega_4^\xi = \omega_3^\xi = 0$ для всех ξ .

Для $j = 5$ имеем $\mathbf{q}_5 = \mathbf{z}_5$. Поэтому по формуле (1.8) выпишем

$$\omega_5^x = \sum_{\eta} \mathbf{x}_5 \cdot \eta_4 \omega_4^\eta + \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{x}_5 \dot{q}_5 = \mathbf{x}_5 \cdot \mathbf{x}_4 \omega_4^x + \mathbf{x}_5 \cdot \mathbf{y}_4 \omega_4^y + \mathbf{x}_5 \cdot \mathbf{z}_4 \omega_4^z =$$

$$= \mathbf{x}_5 \cdot \mathbf{y}_4 \dot{q}_3 = x_{54}^y \dot{q}_3 = s_5 \dot{q}_3,$$

так как из третьего блока табл. 1 в ячейке, расположенной на пересечении столбца x_j и строки y_{j-1} , получим $x_{54}^y = s_5$. Аналогично

$$\omega_5^y = \sum_{\eta} \mathbf{y}_5 \cdot \eta_4 \omega_4^\eta + \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{y}_5 \dot{q}_5 = \mathbf{y}_5 \cdot \mathbf{x}_4 \omega_4^x + \mathbf{y}_5 \cdot \mathbf{y}_4 \omega_4^y + \mathbf{y}_5 \cdot \mathbf{z}_4 \omega_4^z = \mathbf{y}_5 \cdot \mathbf{y}_4 \dot{q}_3 =$$

$$= y_{54}^y \dot{q}_3 = c_5 \dot{q}_3;$$

$$\omega_5^z = \sum_{\eta} \mathbf{z}_5 \cdot \eta_4 \omega_4^\eta + \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{z}_5 \dot{q}_5 = \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{x}_4 \omega_4^x + \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{y}_4 \omega_4^y + \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{z}_4 \omega_4^z + \dot{q}_5 =$$

$$= \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{y}_4 \dot{q}_3 + \dot{q}_5 = z_{54}^y \dot{q}_3 + \dot{q}_5 = \dot{q}_5.$$

Для $j = 6$ имеем $\mathbf{q}_6 = \mathbf{y}_6 = \mathbf{y}_5$. Поэтому по формуле (1.8) для $\xi = \mathbf{y}$ выпишем

$$\omega_6^y = \sum_{\eta} \mathbf{y}_5 \cdot \eta_5 \omega_5^\eta + \mathbf{y}_6 \cdot \mathbf{y}_6 \dot{q}_6 = \omega_5^y + \dot{q}_6.$$

Для $\xi = x$ по формуле (1.8) выпишем

$$\omega_6^x = \sum_{\eta} \mathbf{x}_6 \cdot \boldsymbol{\eta}_5 \omega_5^{\eta} + \mathbf{y}_6 \cdot \mathbf{x}_6 \dot{q}_6 = x_{65}^x \omega_5^x + x_{65}^y \omega_5^y + x_{65}^z \omega_5^z = c_6 \omega_5^x - s_6 \omega_5^z,$$

так как из первого столбца второго блока табл. 1 имеем $x_{65}^x = c_6$, $x_{65}^y = 0$, $x_{65}^z = -s_6$. Аналогично

$$\omega_6^z = \sum_{\eta} \mathbf{z}_6 \cdot \boldsymbol{\eta}_5 \omega_5^{\eta} + \mathbf{y}_6 \cdot \mathbf{z}_6 \dot{q}_6 = z_{65}^x \omega_5^x + z_{65}^y \omega_5^y + z_{65}^z \omega_5^z = s_6 \omega_5^x + c_6 \omega_5^z.$$

Таким образом, $\omega_3^x = \omega_4^x = \omega_3^z = \omega_4^z = 0$, $\omega_3^y = \dot{q}_3$, $\omega_4^y = \dot{q}_3$, $\omega_5^y = \dot{q}_5$, $\omega_5^x = s_5 \dot{q}_3$, $\omega_5^z = c_5 \dot{q}_3$, $\omega_6^x = c_6 \omega_5^x - s_6 \dot{q}_5$, $\omega_6^y = \omega_5^y + \dot{q}_6$, $\omega_6^z = s_6 \omega_5^x + c_6 \dot{q}_5$.

6. Выпишем формулы вычисления $\dot{\omega}_i^{\xi}$ через ОС, ОУ ВКП и НК, взятые из табл. 1.

Из значений ω_3^{ξ} , ω_4^{ξ} имеем $\dot{\omega}_3^x = \dot{\omega}_4^x = \dot{\omega}_3^z = \dot{\omega}_4^z = 0$, $\dot{\omega}_3^y = \ddot{q}_3$, $\dot{\omega}_4^y = \ddot{q}_3$, $\dot{\omega}_5^z = \ddot{q}_5$.

Для $j = 5$, $\xi = x$ и $\mathbf{q}_5 = \mathbf{z}_5$ по формуле (1.10) выпишем

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_5^x &= \sum_{\eta} \mathbf{x}_5 \cdot \boldsymbol{\eta}_4 \dot{\omega}_4^{\eta} + \epsilon_{zxy} \omega_5^y \dot{q}_5 = x_{54}^x \dot{\omega}_4^x + x_{54}^y \dot{\omega}_4^y + x_{54}^z \dot{\omega}_4^z + \omega_5^y \dot{q}_5 = \\ &= x_{54}^y \ddot{q}_3 + \omega_5^y \dot{q}_5 = s_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_5 \omega_5^y, \end{aligned}$$

так как на 2-м этапе в табл. 1 было найдено $x_{54}^y = s_5$. Аналогично для

$$\begin{aligned} \xi = y \quad \dot{\omega}_5^y &= \sum_{\eta} \mathbf{y}_5 \cdot \boldsymbol{\eta}_4 \dot{\omega}_4^{\eta} + \epsilon_{zyx} \omega_5^x \dot{q}_5 = y_{54}^x \dot{\omega}_4^x + y_{54}^y \dot{\omega}_4^y + y_{54}^z \dot{\omega}_4^z - \omega_5^x \dot{q}_5 = \\ &= y_{54}^y \ddot{q}_3 - \omega_5^x \dot{q}_5 = c_5 \ddot{q}_3 - \dot{q}_5 \omega_5^x. \end{aligned}$$

Имеем $\mathbf{q}_6 = \mathbf{y}_6 = \mathbf{y}_5$. Поэтому для $j = 6$ и $\xi = y$ по формуле (1.9) выпишем

$$\dot{\omega}_6^y = \sum_{\eta} \mathbf{y}_6 \cdot \boldsymbol{\eta}_5 \dot{\omega}_5^{\eta} + \ddot{q}_6 = \dot{\omega}_5^y + \ddot{q}_6.$$

Для $\xi = x$ по формуле (1.10) выпишем

$$\dot{\omega}_6^x = \sum_{\eta} \mathbf{x}_6 \cdot \boldsymbol{\eta}_5 \dot{\omega}_5^{\eta} + \epsilon_{yxz} \dot{q}_6 \omega_6^z = x_{65}^x \dot{\omega}_5^x + x_{65}^y \dot{\omega}_5^y + x_{65}^z \dot{\omega}_5^z - \dot{q}_6 \omega_6^z.$$

Из второго блока первого столбца табл. 1 получим $x_{65}^x = c_6$, $x_{65}^y = 0$, $x_{65}^z = -s_6$. Следовательно, $\dot{\omega}_6^x = c_6 \dot{\omega}_5^x - s_6 \dot{\omega}_5^z - \dot{q}_6 \omega_6^z$. Аналогично для $\xi = z$ по формуле (1.10) выпишем

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_6^z &= \sum_{\eta} \mathbf{z}_6 \cdot \boldsymbol{\eta}_5 \dot{\omega}_5^{\eta} + \epsilon_{yzx} \omega_6^x \dot{q}_6 = z_{65}^x \dot{\omega}_5^x + z_{65}^y \dot{\omega}_5^y + z_{65}^z \dot{\omega}_5^z + \omega_6^x \dot{q}_6 = \\ &= s_6 \dot{\omega}_5^x + c_6 \dot{\omega}_5^z + \dot{q}_6 \omega_6^x. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$\dot{\omega}_3^x = \dot{\omega}_4^x = \dot{\omega}_3^z = \dot{\omega}_4^z = 0, \quad \dot{\omega}_3^y = \ddot{q}_3, \quad \dot{\omega}_4^y = \ddot{q}_3, \quad \dot{\omega}_5^x = s_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_5 \omega_5^y, \quad \dot{\omega}_5^y = c_5 \ddot{q}_3 - \dot{q}_5 \omega_5^x,$$

$$\dot{\omega}_5^z = \ddot{q}_5, \quad \dot{\omega}_6^x = c_6 \dot{\omega}_5^x - s_6 \dot{\omega}_5^z - \dot{q}_6 \omega_6^z, \quad \dot{\omega}_6^y = \dot{\omega}_5^y + \ddot{q}_6, \quad \dot{\omega}_6^z = s_6 \dot{\omega}_5^x + c_6 \ddot{q}_5 + \omega_6^x \dot{q}_6.$$

7. Выпишем формулы вычисления искомого движущих сил.

Учитывая простые значения векторов ω_1^{ξ} и $\dot{\omega}_1^{\xi}$ по формуле (3.1), выпишем

$$\boldsymbol{\xi} \cdot \dot{\mathbf{y}}_5 = z_5^{\xi} (\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^{\xi} (\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^{\xi} (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2}).$$

Следовательно,

$$F_1 = \mathbf{z} \cdot \mathbf{F}_1 = m_1 \ddot{q}_1 - a \mathbf{z} \cdot \dot{\mathbf{y}}_5 = m_1 \ddot{q}_1 - a [z_5^z (\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^z (\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^z (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})];$$

$$F_2 = \mathbf{x} \cdot \mathbf{F}_2 = m_2 \ddot{q}_2 - a \mathbf{x} \cdot \dot{\mathbf{y}}_5 = m_2 \ddot{q}_2 - a [z_5^x (\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^x (\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^x (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})];$$

$$F_4 = -\mathbf{y} \cdot \mathbf{F}_4 = m_4 \ddot{q}_4 + a \mathbf{y} \cdot \dot{\mathbf{y}}_5 = m_4 \ddot{q}_4 + a [z_5^y (\dot{\omega}_5^x - \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^y (\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^y (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})] - m_{g4}.$$

Из рис. 1 видно, что НК $\xi_5^{\eta} = \xi_{52}^{\eta}$ зависят от углов q_3 и q_5 , т. е. эти НК можно выбрать из табл. 2, где $j = 5$, $j - 1 = 3$. Так как $\mathbf{q}_5 = \mathbf{z}_5$, $\mathbf{q}_3 = \mathbf{y}_3$ искомым блоком расположен в правой колонке средней полосы. НК x_5^x , y_5^x , z_5^x ; x_5^y , y_5^y , z_5^y ; x_5^z , y_5^z , z_5^z расположены, соответственно, в первой, второй и третьей строках этого блока, т. е. $x_5^x = c_3 c_5$, $y_5^x = -c_3 s_5$, $z_5^x = s_3$; $x_5^y = s_5$, $y_5^y = c_5$, $z_5^y = 0$; $x_5^z = -s_3 c_5$, $y_5^z = s_3 s_5$, $z_5^z = c_3$. Следовательно,

$$F_1 = m_1 \ddot{q}_1 - a [c_3 (\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^z (\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^z (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})];$$

$$F_2 = m_2 \ddot{q}_2 - a [s_3 (\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^x (\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^x (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})];$$

$$F_4 = m_4 \ddot{q}_4 - a [s_5 (\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) + c_5 (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})] - m_{g4}.$$

2.2. Выписывание формул вычисления движущих моментов сил

1. Выпишем формулы вычисления моментов сил тяжести $G_j = g \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{m}_j \times \mathbf{y}$.

$$G_3 = g \mathbf{y} \cdot \mathbf{m}_3 \times \mathbf{y} = 0; \quad G_5 = g \mathbf{q}_5 \cdot \mathbf{m}_5 \times \mathbf{y} = -g a z_5 \times \mathbf{y}_5 \cdot \mathbf{y} = g a x_5 \cdot \mathbf{y} = a g x_5^y;$$

$$G_6 = g \mathbf{q}_6 \cdot \mathbf{m}_6 \times \mathbf{y} = -g m_{c6} \mathbf{y}_5 \times \mathbf{y}_5 \cdot \mathbf{y} = 0.$$

2. Выпишем формулы $M_{qj} = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{m}_j \times \dot{\mathbf{r}}_j$.

$$M_{q3} = \mathbf{q}_3 \cdot \mathbf{m}_3 \times \dot{\mathbf{r}}_3 = \mathbf{m}_3 \cdot (\dot{q}_1 \mathbf{z} + \dot{q}_2 \mathbf{x}) \times \mathbf{y} = (m_{q4} \mathbf{y} - a \mathbf{y}_5) \cdot (\dot{q}_2 \mathbf{z} - \dot{q}_1 \mathbf{x}) = a (y_5^x \dot{q}_1 - y_5^z \dot{q}_2);$$

$$M_{q_5} = \mathbf{q}_5 \cdot \mathbf{m}_5 \times \dot{\mathbf{r}}_5 = -a\mathbf{z}_5 \times \mathbf{y}_5 \cdot \dot{\mathbf{r}}_5 = a\mathbf{x}_5 \cdot (\ddot{q}_1\mathbf{z} + \ddot{q}_2\mathbf{x} - \ddot{q}_4\mathbf{y}) = a(x_5^z\ddot{q}_1 + x_5^x\ddot{q}_2 - x_5^y\ddot{q}_4);$$

$$M_{q_6} = \mathbf{q}_6 \cdot \mathbf{m}_6 \times \dot{\mathbf{r}}_6 = -m_{c_6}\mathbf{y}_5 \cdot \mathbf{y}_5 \times \dot{\mathbf{r}}_5 = 0.$$

3. Выпишем формулы $M_j^q = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j+1}^N (m_i\mathbf{R}_i \times \ddot{\mathbf{R}}_i + \mathbf{m}_i \times \ddot{\mathbf{R}}_i + \mathbf{R}_i \times \ddot{\mathbf{m}}_i)$.

$$M_3^q = \mathbf{y} \cdot (m_4\mathbf{R}_4 \times \ddot{\mathbf{R}}_4 + \mathbf{m}_4 \times \ddot{\mathbf{R}}_4 + \mathbf{R}_4 \times \ddot{\mathbf{m}}_4) = \\ = \mathbf{y} \cdot (-m_4q_4\mathbf{y} \times \ddot{\mathbf{R}}_4 - \mathbf{m}_4 \times \ddot{q}_4\mathbf{y} - q_4\mathbf{y} \times \ddot{\mathbf{m}}_4) = 0;$$

$$M_5^q = M_6^q = 0, \text{ так как } \mathbf{R}_5 = \mathbf{R}_6 = 0.$$

4. Выпишем формулы $K_j^q = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^N \dot{\mathbf{K}}_i$. Будем считать, что $\text{ССК}(j) = \text{ГСК}(j)$ для $j = 5, 6$ и $I_j^x = I_j^z$, т. е. $I_j^b = 0$, $I_j^c = I_j^y - I_j^x = I_j^y - I_j^z = -I_j^a$.

По формуле (1.6) с учетом равенств $\boldsymbol{\omega}_3 = \boldsymbol{\omega}_4 = \dot{q}_3\mathbf{y}$ выпишем

$$K_3^q = \mathbf{y}_3 \cdot \sum_{i=3}^6 \dot{\mathbf{K}}_i = (I_3^y + I_4^y)\dot{q}_3 + \sum_{i=5}^6 [x_{i3}^y(I_i^z\dot{\omega}_i^x + I_i^a\omega_i^y\omega_i^z) + \\ + I_{i3}^y y_{i3}^y \dot{\omega}_i^y + z_{i3}^y (I_i^z \dot{\omega}_i^z - I_i^a \omega_i^x \omega_i^y)].$$

Из второй строки третьего блока табл. 1 имеем $x_{53}^y = x_{54}^y = s_5$, $y_{53}^y = y_{54}^y = c_5$, $z_{53}^y = z_{54}^y = 0$.

Следовательно,

$$K_3^q = (I_3^y + I_4^y)\dot{q}_3 + s_5(I_5^z\dot{\omega}_5^x + I_5^a\omega_5^y\omega_5^z) + I_5^y c_5 \dot{\omega}_5^y + x_{64}^y (I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z) + \\ + I_6^y c_5 \dot{\omega}_6^y + z_{64}^y (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y),$$

где $x_{64}^y = s_5 c_6$, $z_{64}^y = s_5 s_6$, так как НК $\xi_{63}^y = \xi_{64}^y$ зависят от углов q_6 , q_5 и находятся во второй строке блока, расположенного во второй колонке (так как $\mathbf{q}_6 = \mathbf{y}_6$) нижней полосы (так как $\mathbf{q}_5 = \mathbf{z}_5$) табл. 2. Аналогично

$$K_5^q = \mathbf{z}_5 \cdot \sum_{i=5}^6 \dot{\mathbf{K}}_i = I_5^z \dot{\omega}_5^z - I_5^a \omega_5^x \omega_5^y + x_{65}^z (I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z) + I_6^y y_{65}^z \dot{\omega}_6^y + z_{65}^z (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y) = \\ = I_5^z \dot{\omega}_5^z - I_5^a \omega_5^x \omega_5^y - s_6 (I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z) + c_6 (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y),$$

так как в третьей строке второго блока табл. 1 имеем $x_{65}^z = -s_6$, $y_{65}^z = 0$, $z_{65}^z = c_6$.

$$K_6^q = \mathbf{y}_6 \cdot [(I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z)\mathbf{x}_6 + I_6^y \dot{\omega}_6^y \mathbf{y}_6 + (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y)\mathbf{z}_6] = I_6^y \dot{\omega}_6^y.$$

5. Выпишем формулы вычисления искомых моментов движущих сил M_j .

$$M_3 = \mathbf{q}_3 \cdot \mathbf{M}_3 = -\mathbf{y} \cdot \mathbf{M}_3 = M_{q_3} + K_3^q = a(y_5^x \ddot{q}_1 - y_5^z \ddot{q}_2) + (I_3^y + I_4^y)\dot{q}_3 + \\ + s_5 (I_5^z \dot{\omega}_5^x + I_5^a \omega_5^y \omega_5^z) + I_5^y c_5 \dot{\omega}_5^y + x_6^y (I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z) + I_6^y c_5 \dot{\omega}_6^y + z_6^y (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y);$$

$$M_5 = \mathbf{q}_5 \cdot \mathbf{M}_5 = \mathbf{z}_5 \cdot \mathbf{M}_5 = M_{q_5} + K_5^q + G_5 = a(x_5^z \ddot{q}_1 + x_5^x \ddot{q}_2 - x_5^y \ddot{q}_4) + I_5^z \dot{\omega}_5^z - I_5^a \omega_5^x \omega_5^y - \\ - s_6 (I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z) + c_6 (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y) + agx_5^y;$$

$$M_6 = \mathbf{q}_6 \cdot \mathbf{M}_6 = \mathbf{y}_6 \cdot \mathbf{M}_6 = K_6^q = I_6^y \dot{\omega}_6^y.$$

Таким образом, первый вид УД МС на рис. 1 представляется следующей системой дифференциальных уравнений, содержащих квазиускорения и квазискорости;

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{q}_1 - a[c_3(\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^z(\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^z(\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})] = F_1; \\ m_2 \ddot{q}_2 - a[s_3(\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_5^x(\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_5^x(\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})] = F_2; \\ a(y_5^x \ddot{q}_1 - y_5^z \ddot{q}_2) + (I_3^y + I_4^y)\dot{q}_3 + s_5 (I_5^z \dot{\omega}_5^x + I_5^a \omega_5^y \omega_5^z) + I_5^y c_5 \dot{\omega}_5^y + \\ + x_6^y (I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z) + I_6^y c_5 \dot{\omega}_6^y + z_6^y (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y) = M_3; \\ m_4 \ddot{q}_4 - a[s_5(\ddot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) + c_5(\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})] - m_4 g = F_4; \\ a(x_5^z \ddot{q}_1 + x_5^x \ddot{q}_2 - s_5 \ddot{q}_4) + I_5^z \dot{\omega}_5^z - I_5^a \omega_5^x \omega_5^y - \\ - s_6 (I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z) + c_6 (I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y) + ags_5 = M_5; \\ I_6^y \dot{\omega}_6^y = M_6. \end{array} \right.$$

К этим уравнениям необходимо добавить ранее выписанные уравнения кинематики, т. е. формулы вычисления $\dot{\omega}_i^x$.

Выписанные вручную УД могут содержать ошибки и описки. Поэтому их необходимо верифицировать. Один из этапов верификации связан с проверкой на симметричность матрицы инерционных коэффициентов (МИК), т. е. матрицы коэффициентов при ОУ.

2.3. Вывод МИК в УД МС на рис. 1. УД МС можно представить в следующем векторно-матричном виде $\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} + \mathbf{G} = \mathbf{Q}$, где \mathbf{H} – МИК; $\ddot{\mathbf{q}}$ – вектор-столбец ОУ; \mathbf{h} – вектор-столбец обобщенных инерционных сил с элементами h_1, h_2, \dots, h_N ; \mathbf{G} – вектор-столбец обобщенных сил тяжести с элементами G_1, G_2, \dots, G_N , которые не зависят от скоростей и ускорений; \mathbf{Q} – вектор-

столбец обобщенных движущих сил, т. е. сил F_i для ПКП(i) и моментов сил M_i для ВКП(i), где $i = 1, 2, \dots, N$. Для этого достаточно в первом виде УД заменить квазиускорения на их выражения через ОУ и ввести соответствующие обозначения.

Подставим $\dot{\omega}_5^x = s_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_5 \omega_5^y$ в формулы вычисления F_1, F_2 . Тогда получим

$$F_1 = m_1 \ddot{q}_1 - a c_3 s_5 \ddot{q}_3 + a x_5^z \ddot{q}_5 + h_1; F_2 = m_2 \ddot{q}_2 - a s_3 s_5 \ddot{q}_3 + a x_5^x \ddot{q}_5 + h_2,$$

где

$$h_1 = -a[2c_3 \dot{q}_5 \omega_5^y + x_5^z \omega_5^y \omega_5^x - y_5^z (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})]; h_2 = -a[2s_3 \dot{q}_5 \omega_5^y + x_5^x \omega_5^y \omega_5^x - y_5^x (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})].$$

В общем случае в УД МС квазиускорения входят в виде линейной комбинации. Обозначим через $\dot{\Omega}_{ji}$ линейную комбинацию квазиускорений $\dot{\omega}_i^x, \xi \in \{x, y, z\}$ в j-м УД.

В формуле вычисления M_3 имеем

$$\dot{\Omega}_{35} = I_5^z s_5 \dot{\omega}_5^x + I_5^y c_5 \dot{\omega}_5^y = I_5^z s_5 (s_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_5 \omega_5^y) + I_5^y c_5 (c_5 \ddot{q}_3 - \dot{q}_5 \omega_5^x) =$$

$$= (I_5^z s_5^2 + I_5^y c_5^2) \ddot{q}_3 + (I_5^z s_5 \omega_5^y - I_5^y c_5 \omega_5^x) \dot{q}_5;$$

$$\dot{\Omega}_{36} = I_6^z (x_6^y \dot{\omega}_6^x + z_6^y \dot{\omega}_6^z) + I_6^y c_5 \dot{\omega}_6^y,$$

где $\dot{\omega}_6^y = \dot{\omega}_5^y + \dot{q}_6 = c_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_6 - \dot{q}_5 \omega_5^x$;

$$x_6^y \dot{\omega}_6^x + z_6^y \dot{\omega}_6^z = s_5 c_6 (c_6 \dot{\omega}_5^x - s_6 \ddot{q}_5 - \omega_6^z \dot{q}_6) + s_5 s_6 (s_6 \dot{\omega}_5^x + c_6 \ddot{q}_5 + \omega_6^x \dot{q}_6) =$$

$$= s_5 \dot{\omega}_5^x + s_5 (s_6 \omega_6^x - c_6 \omega_6^z) \dot{q}_6,$$

т. е. $\dot{\Omega}_{36} = I_6^z [s_5 (s_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_5 \omega_5^y) + s_5 (s_6 \omega_6^x - c_6 \omega_6^z) \dot{q}_6] + I_6^y c_5 (c_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_6 - \dot{q}_5 \omega_5^x)$. Следовательно,

$$M_3 = a(y_5^x \ddot{q}_1 - y_5^z \ddot{q}_2) + (I_3^y + I_4^y) \ddot{q}_3 + (I_5^z s_5^2 + I_5^y c_5^2) \ddot{q}_3 + I_6^z s_5 s_5 \ddot{q}_3 + I_6^y c_5 (c_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_6) + h_3 =$$

$$= a(y_5^x \ddot{q}_1 - y_5^z \ddot{q}_2) + H_{33} \ddot{q}_3 + I_6^y c_5 \dot{q}_6 + h_3,$$

где с учетом обозначений $I_{36}^y = I_3^y + I_4^y + I_5^y + I_6^y, I_{56}^a = I_5^z + I_6^z - I_5^y - I_6^y$ имеем

$$H_{33} = I_3^y + I_4^y + (I_5^z + I_6^z) s_5^2 + (I_5^y + I_6^y) c_5^2 = I_3^y + I_4^y + I_5^y + I_6^y + (I_5^z + I_6^z - I_5^y - I_6^y) s_5^2 =$$

$$= I_{36}^y + I_{56}^a s_5^2;$$

$$h_3 = I_5^z s_5 \omega_5^y \dot{q}_5 + I_6^z x_6^y \omega_6^y \omega_6^z - I_6^z z_6^y \omega_6^x \omega_6^y + (I_5^z s_5 \omega_5^y - I_5^y c_5 \omega_5^x) \dot{q}_5 +$$

$$+ I_6^z [s_5 \dot{q}_5 \omega_5^y + s_5 (s_6 \omega_6^x - c_6 \omega_6^z) \dot{q}_6] - I_6^y c_5 \dot{q}_5 \omega_5^x =$$

$$= (I_5^z + I_6^z) s_5 \dot{q}_5 \omega_5^y - (I_5^y + I_6^y) c_5 \dot{q}_5 \omega_5^x + I_6^z (x_6^y \omega_6^z - z_6^y \omega_6^x) \omega_6^y + I_6^z s_5 (s_6 \omega_6^x - c_6 \omega_6^z) \dot{q}_6.$$

Для F_4 имеем

$$F_4 = m_4 \ddot{q}_4 - a s_5 \ddot{q}_5 + h_4 + G_4,$$

где $h_4 = a[s_5 \omega_5^y \omega_5^x - c_5 (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})]$; $G_4 = -m_4 g$.

В формуле вычисления M_5 имеем

$$\dot{\Omega}_{56} = I_6^z (c_6 \dot{\omega}_6^z - s_6 \dot{\omega}_6^x) = I_6^z [c_6 (s_6 \dot{\omega}_5^x + c_6 \ddot{q}_5 + \omega_6^x \dot{q}_6) - s_6 (c_6 \dot{\omega}_5^x - s_6 \ddot{q}_5 - \omega_6^z \dot{q}_6)] =$$

$$= I_6^z [\dot{q}_5 + \dot{q}_6 (c_6 \omega_6^x + s_6 \omega_6^z)].$$

Следовательно, $M_5 = a(x_5^z \ddot{q}_1 + x_5^x \ddot{q}_2 - s_5 \ddot{q}_4) + (I_5^z + I_6^z) \ddot{q}_5 + h_5 + G_5$, где $G_5 = a g s_5$,

$$h_5 = -I_5^z s_5 \omega_5^x \omega_5^y - I_6^z s_6 \omega_6^y \omega_6^z - I_6^z c_6 \omega_6^x \omega_6^y + I_6^z \dot{q}_6 (c_6 \omega_6^x + s_6 \omega_6^z) =$$

$$= -I_5^z s_5 \omega_5^x \omega_5^y - I_6^z (c_6 \omega_6^x + s_6 \omega_6^z) \omega_6^y + I_6^z \dot{q}_6 (c_6 \omega_6^x + s_6 \omega_6^z) =$$

$$= -I_5^z s_5 \omega_5^x \omega_5^y + (I_6^z \dot{q}_6 - I_6^z \omega_6^y) (c_6 \omega_6^x + s_6 \omega_6^z).$$

Для M_6 получим

$$M_6 = I_6^y \dot{\omega}_6^y = I_6^y (c_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_6 - \dot{q}_5 \omega_5^x) = I_6^y (c_5 \ddot{q}_3 + \dot{q}_6) + h_6,$$

где $h_6 = -I_6^y \dot{q}_5 \omega_5^x$.

Элемент H_{ji} МИК является множителем при ОУ \ddot{q}_i в формуле вычисления Q_j , т. е. в j-м УД.

Из полученных формул вычисления $F_1, F_2, M_3, F_4, M_5, M_6$, используя выписанные НК $x_5^x = c_3 c_5, y_5^x = -c_3 s_5, x_5^z = -s_3 c_5, y_5^z = s_3 s_5$, составим МИК МС на рис. 1. Она примет следующий вид

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & a y_5^x & 0 & a x_5^z & 0 \\ 0 & m_2 & -a y_5^z & 0 & a x_5^x & 0 \\ a y_5^x & -a y_5^z & I_{36}^y + I_{56}^a s_5^2 & 0 & 0 & I_6^y c_5 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & -a s_5 & 0 \\ a x_5^z & a x_5^x & 0 & -a s_5 & I_{56}^a & 0 \\ 0 & 0 & I_6^y c_5 & 0 & 0 & I_6^y \end{pmatrix},$$

где $I_{56}^z = I_5^z + I_6^z$. Видно, что эта МИК симметрична.

В формулах вычисления элементов h_j ($j = 1, 2, \dots, N$) можно выделить гироскопические инерционные силы (ГИС). Примеры практического использования ГИС приведены в двух последних пунктах.

2.4. Выделение ГИС в УД МС на рис. 1. Выделим в h_j центробежные, Кориолисовы и гироскопические обобщенные инерционные силы. Для этого в h_j необходимо заменить квазискорости на их выражения через ОС. Но прежде рекомендуем упростить формулу вычисления h_j , если она содержит линейные и/или квадратичные формы квазискоростей. Дело в том, что сумму произведений НК на квазискорости часто можно упростить. Например, для такого выражения в формуле вычисления h_4 получим

$$s_5 \omega_5^y \omega_5^x - c_5 \omega_5^{x2} = (s_5 \omega_5^y - c_5 \omega_5^x) \omega_5^x = (s_5 c_5 \dot{q}_3 - c_5 s_5 \dot{q}_3) \omega_5^x = 0,$$

т. е. после упрощения $h_4 = -a c_5 \dot{q}_5^2$ – центробежная инерционная сила, действующая на тело m_{o4} и обусловленная вращением тела m_{o5} с относительной скоростью \dot{q}_5 .

Обозначим через Ω_{ji} линейную и через Ω_{ji}^2 квадратичную форму квазискоростей ω_i^ξ , $\xi \in \{x, y, z\}$ в формуле вычисления h_j . В формуле вычисления h_1 имеем

$$\Omega_{15}^2 = x_5^z \omega_5^y \omega_5^x - y_5^z \omega_5^{x2} = (x_5^z \omega_5^y - y_5^z \omega_5^x) \omega_5^x = (-s_3 c_5 c_5 \dot{q}_3 - s_3 s_5 s_5 \dot{q}_3) \omega_5^x = -s_3 \dot{q}_3 \omega_5^x.$$

Следовательно, формула вычисления h_1 принимает вид

$$h_1 = -a(2c_3 \dot{q}_5 \omega_5^y - y_5^z \dot{q}_5^2 - s_3 \dot{q}_3 \omega_5^x) = a(y_5^z \dot{q}_5^2 - 2c_3 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 + s_3 s_5 \dot{q}_3^2).$$

Теперь с учетом обозначений x_5^x , y_5^z окончательно получим

$$h_1 = a[y_5^z (\dot{q}_5^2 + \dot{q}_3^2) - 2x_5^x \dot{q}_3 \dot{q}_5].$$

Аналогично для h_2 получим

$$\Omega_{25}^2 = (x_5^x \omega_5^y - y_5^x \omega_5^x) \omega_5^x = (c_3 c_5 c_5 \dot{q}_3 + c_3 s_5 s_5 \dot{q}_3) \omega_5^x = c_3 \dot{q}_3 \omega_5^x,$$

т. е.

$$h_2 = -a(2s_3 \dot{q}_5 \omega_5^y - y_5^x \dot{q}_5^2 + c_3 \dot{q}_3 \omega_5^x) = a(y_5^x \dot{q}_5^2 - 2s_3 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - c_3 s_5 \dot{q}_3^2) = a[y_5^x (\dot{q}_5^2 + \dot{q}_3^2) + 2x_5^z \dot{q}_3 \dot{q}_5].$$

В формуле вычисления h_3 имеем

$$\Omega_{36} = I_6^z s_5 (s_6 \omega_6^x - c_6 \omega_6^z) \dot{q}_6 = I_6^z s_5 [s_6 (c_6 \omega_5^x - s_6 \dot{q}_5) - c_6 (s_6 \omega_5^x + c_6 \dot{q}_5)] \dot{q}_6 = I_6^z s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6;$$

$$\Omega_{36}^2 = I_6^a (x_6^y \omega_6^z - z_6^y \omega_6^x) \omega_6^y = I_6^a [s_5 c_6 (s_6 \omega_5^x + c_6 \dot{q}_5) - s_5 s_6 (c_6 \omega_5^x - s_6 \dot{q}_5)] \omega_6^y = I_6^a s_5 \dot{q}_5 \omega_6^y,$$

т. е.

$$h_3 = (I_5^a + I_5^z + I_6^z) s_5 \dot{q}_5 \omega_5^y - (I_5^y + I_6^y) c_5 \dot{q}_5 \omega_5^x - I_6^z s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6 + I_6^a s_5 \dot{q}_5 (\omega_5^y + \dot{q}_6) =$$

$$= (I_{56}^a + I_{56}^z) s_5 \dot{q}_5 \omega_5^y - I_{56}^y c_5 \dot{q}_5 \omega_5^x + (I_6^a - I_6^z) s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6 =$$

$$= (I_{56}^a + I_{56}^z - I_{56}^y) s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6 = 2I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6,$$

где $I_{56}^y = I_5^y + I_6^y$, $I_{56}^a = I_5^a + I_6^a$.

В формуле h_5 имеем

$$\Omega_{56} = s_6 \omega_6^z + c_6 \omega_6^x = s_6 (s_6 \omega_5^x + c_6 \dot{q}_5) + c_6 (c_6 \omega_5^x - s_6 \dot{q}_5) = \omega_5^x,$$

т. е.

$$h_5 = -I_5^a \omega_5^x \omega_5^y + (I_6^z \dot{q}_6 - I_6^a \omega_6^y) \omega_5^x = I_6^z \dot{q}_6 \omega_5^x - I_5^a \omega_5^x \omega_5^y - I_6^a \omega_5^x (\omega_5^y + \omega_6^y) =$$

$$= (I_6^z - I_6^a) \dot{q}_6 \omega_5^x - (I_5^a + I_6^a) \omega_5^x \omega_5^y = I_6^y \dot{q}_6 \omega_5^x - I_{56}^a \omega_5^x \omega_5^y = (I_6^y \dot{q}_6 - I_{56}^a c_5 \dot{q}_3) s_5 \dot{q}_3.$$

Для формулы h_6 имеем

$$h_6 = -I_6^y s_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5.$$

По определению Тэта мощность ГИС равна нулю [11]. Поэтому для их выделения достаточно в выражении $\sum_{i=1}^6 h_i \dot{q}_i$ выделить равную нулю сумму, в которой каждое слагаемое без последнего множителя (последней ОС \dot{q}_i) является искомой ГИС g_i . В рассматриваемом примере

$$\sum_{i=1}^6 h_i \dot{q}_i = \{a[y_5^z (\dot{q}_5^2 + \dot{q}_3^2) - 2x_5^x \dot{q}_3 \dot{q}_5]\} \dot{q}_1 + \{a[y_5^x (\dot{q}_5^2 + \dot{q}_3^2) + 2x_5^z \dot{q}_3 \dot{q}_5]\} \dot{q}_2 +$$

$$+ (2I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6) \dot{q}_3 + (-a c_5 \dot{q}_5^2) \dot{q}_4 + [(I_6^y \dot{q}_6 - I_{56}^a c_5 \dot{q}_3) s_5 \dot{q}_3] \dot{q}_5 + (-I_6^y s_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5) \dot{q}_6.$$

Очевидно, что

$$(I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6) \dot{q}_3 + [(I_6^y \dot{q}_6 - I_{56}^a c_5 \dot{q}_3) s_5 \dot{q}_3] \dot{q}_5 = g_3 \dot{q}_3 + g_5 \dot{q}_5 = 0.$$

Следовательно,

$$h_3 = I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 + g_3, g_3 = (I_{56}^a c_5 \dot{q}_3 - I_6^y \dot{q}_6) s_5 \dot{q}_5;$$

$$h_5 = g_5 = (I_6^y \dot{q}_6 - I_{56}^a c_5 \dot{q}_3) s_5 \dot{q}_3.$$

3. Выписывание УД МС с двумя ПКП (Пример 2)

На рис. 2 изображена схема портальной МС с цилиндрической СК. Она имеет следующее формальное описание.

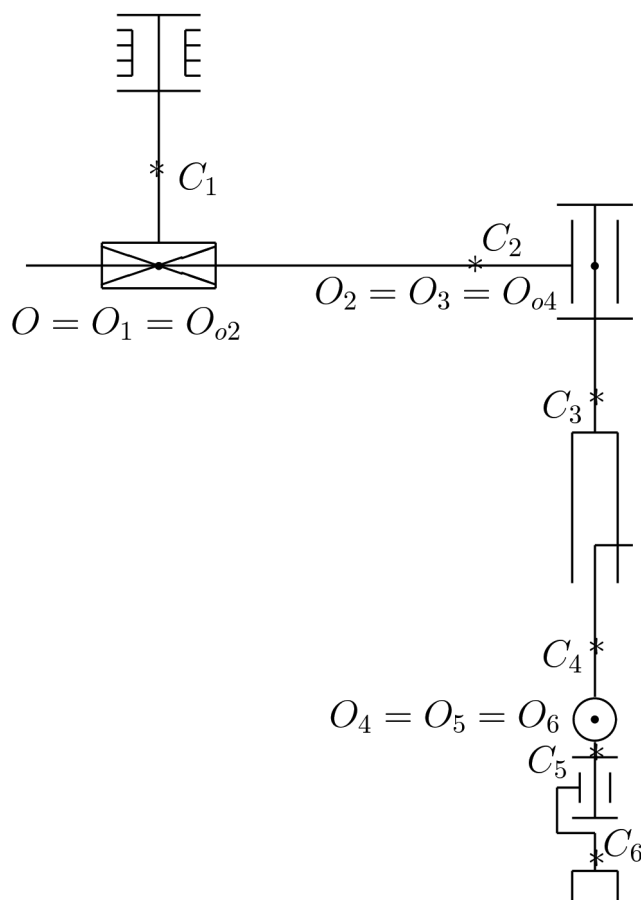


Рис. 2. МС с цилиндрической СК
Fig. MS with cylindrical CS

Из рис. 2 видно, что имеют место следующие равенства ОСК:

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

Орты КП(j) имеют следующие выражения через ОСК(j): $\mathbf{q}_1 = \mathbf{y}_1 = \text{const}$ – орт ВКП(1), направленный вертикально вверх; $\mathbf{p}_2 = \mathbf{x}_2$ – орт ПКП(2), лежащий в горизонтальной плоскости и меняющий свою ориентацию вместе с поворотом тела m_{o1} ; $\mathbf{q}_3 = \mathbf{y}_3 = \text{const}$ – орт ВКП(3), поворачивающийся на угол q_2 в вертикальной плоскости, которая вращается вокруг вертикальной оси вместе с телом m_{o1} ; $\mathbf{p}_4 = -\mathbf{y}_4 = \text{const}$ – орт ПКП(4), направленный по вертикали вниз; $\mathbf{q}_5 = \mathbf{z}_5$ – орт ВКП(5), лежащий в горизонтальной плоскости и меняющий свою ориентацию вместе с вращением тел m_{o1}, m_{o3} ; $\mathbf{q}_6 = \mathbf{y}_6$ – орт ВКП(6), поворачивающийся на угол q_5 в вертикальной плоскости, которая вращается вокруг вертикальной оси вместе с телом m_{o3} .

Межполюсные векторы $\mathbf{R}_j = \mathbf{O}_{j-1}\mathbf{O}_j$ имеют следующие выражения через ОСК(j-1) и ОК ПКП(j):

$$\mathbf{R}_1 = 0, \mathbf{R}_2 = q_2\mathbf{x}_1, \mathbf{R}_3 = 0, \\ \mathbf{R}_4 = -q_4\mathbf{y}_3, \mathbf{R}_5 = \mathbf{R}_6 = 0.$$

Орты \mathbf{c}_j имеют следующие выражения через ОСК(j):

$$\mathbf{c}_1 = \mathbf{x}_1, \mathbf{c}_2 = -\mathbf{x}_2, \mathbf{c}_3 = -\mathbf{y}_3, \mathbf{c}_4 = \mathbf{y}_4, \mathbf{c}_5 = -\mathbf{y}_5, \mathbf{c}_6 = -\mathbf{y}_6.$$

3.1. Выписывание формул вычисления движущих сил

1. Выпишем формулы вычисления \mathbf{m}_i через ОСК с максимальным понижением индексов.

Из МС на рис. 1 и 2 видно, что их подсистемы m_3 совпадают. Поэтому формулы вычисления \mathbf{m}_i , где $i = 6, 5, 4, 3$, выписанные в Примере 1, можно использовать повторно, т. е. для МС на рис. 2 $\mathbf{m}_6 = -m_{c6}\mathbf{y}_5$; $\mathbf{m}_5 = -a\mathbf{y}_5$; $\mathbf{m}_4 = m_{c4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5$; $\mathbf{m}_3 = m_{q4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5$. Теперь по формуле (1.23) выпишем

$$\mathbf{m}_2 = m_{c2}\mathbf{c}_2 + \mathbf{m}_3 = -m_{c2}\mathbf{x}_1 + m_{q4}\mathbf{y} - a\mathbf{y}_5.$$

2. Выпишем формулы вычисления $\ddot{\mathbf{R}}_i, \ddot{\mathbf{r}}_j = \sum_{i=1}^j \ddot{\mathbf{R}}_i$ и $\ddot{\mathbf{m}}_i$.

Имеем $\ddot{\mathbf{R}}_1 = 0, \ddot{\mathbf{R}}_2 = (q_2\mathbf{x}_1)''_{t^2}, \ddot{\mathbf{R}}_3 = 0, \ddot{\mathbf{R}}_4 = -\ddot{q}_4\mathbf{y}, \ddot{\mathbf{R}}_5 = \ddot{\mathbf{R}}_6 = 0$. Следовательно,

$$\ddot{\mathbf{r}}_1 = 0, \ddot{\mathbf{r}}_2 = \ddot{\mathbf{r}}_3 = (q_2\mathbf{x}_1)''_{t^2}; \ddot{\mathbf{r}}_4 = \ddot{\mathbf{r}}_5 = \ddot{\mathbf{r}}_6 = (q_2\mathbf{x}_1)''_{t^2} - \ddot{q}_4\mathbf{y}; \ddot{\mathbf{m}}_6 = -m_{c6}\ddot{\mathbf{y}}_5;$$

$$\ddot{\mathbf{m}}_5 = -a\ddot{\mathbf{y}}_5; \ddot{\mathbf{m}}_4 = \ddot{\mathbf{m}}_5; \ddot{\mathbf{m}}_3 = -m_4\ddot{q}_4\mathbf{y} - a\ddot{\mathbf{y}}_5; \ddot{\mathbf{m}}_2 = -m_{c2}\ddot{\mathbf{x}}_1 - m_4\ddot{q}_4\mathbf{y} - a\ddot{\mathbf{y}}_5.$$

3. Выпишем формулы вычисления движущих сил $\mathbf{F}_j = \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{F}_j$.

Используя формулы (1.1), (1.12), (1.15), выпишем

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{F}_2 = \mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{F}_2 = m_2\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{r}}_2 + \mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{m}}_2 + m_{g2}\mathbf{x}_1 \cdot \mathbf{y} =$$

$$= m_2\mathbf{x}_1 \cdot (q_2\mathbf{x}_1)''_{t^2} - \mathbf{x}_1 \cdot (m_{c2}\ddot{\mathbf{x}}_1 + m_4\ddot{q}_4\mathbf{y} + a\ddot{\mathbf{y}}_5) =$$

$$= m_2\mathbf{x}_1 \cdot (\ddot{q}_2\mathbf{x}_1 + 2\dot{q}_2\dot{\mathbf{x}}_1 + q_2\ddot{\mathbf{x}}_1) - m_{c2}\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{x}}_1 - a\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5 = m_2\ddot{q}_2 + m_{q2}\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{x}}_1 - a\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5,$$

где $m_{q2} = m_2q_2 - m_{c2}$.

Аналогично для $j = 4$ выпишем

$$\begin{aligned} F_4 &= \mathbf{p}_4 \cdot \mathbf{F}_4 = -\mathbf{y} \cdot \mathbf{F}_4 = -m_4 \mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{r}}_4 - \mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{m}}_4 - m_{g4} \mathbf{y} \cdot \mathbf{y} = \\ &= -m_4 \mathbf{y} \cdot [(\mathbf{q}_2 \mathbf{x}_1)''_{t^2} - \ddot{\mathbf{q}}_4 \mathbf{y}] + \mathbf{y} \cdot \mathbf{a} \ddot{\mathbf{y}}_5 - m_{g4} = \\ &= -m_4 (\mathbf{q}_2 \mathbf{y}_1 \cdot \mathbf{x}_1)''_{t^2} + m_4 \ddot{\mathbf{q}}_4 + \mathbf{a} \mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5 - m_{g4} = m_4 \ddot{\mathbf{q}}_4 + \mathbf{a} \mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5 - m_{g4}. \end{aligned}$$

4. Выразим скалярные произведения $\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{x}}_1$, $\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$, $\mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$ через квазискорости.

По формуле (1.21) выпишем $\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{x}}_1 = -\omega_1^{y^2} - \omega_1^{z^2}$.

Полагая в формуле (1.19) $\xi = x, i = 1, \eta = y, j = 5$, выпишем

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5 &= \sum_{\zeta \neq y} [\epsilon_{\zeta y v} v_{51}^x \omega_5^\zeta + (\zeta_{51}^x \omega_5^y - y_{51}^x \omega_5^\zeta) \omega_5^\zeta] = \\ &= z_{51}^x \omega_5^x + (x_{51}^x \omega_5^y - y_{51}^x \omega_5^x) \omega_5^x - x_{51}^x \omega_5^z + (z_{51}^x \omega_5^y - y_{51}^x \omega_5^z) \omega_5^z = \\ &= s_3 (\omega_5^x + \omega_5^y \omega_5^z) - x_{51}^x (\omega_5^z - \omega_5^x \omega_5^y) - y_{51}^x (\omega_5^{x^2} + \omega_5^{z^2}). \end{aligned}$$

Здесь приведены подобные при НК и их значения $x_{51}^x = c_3 c_5$, $y_{51}^x = -c_3 s_5$, $z_{51}^x = s_3$ находятся в блоке, стоящем на пересечении третьей колонки и средней полосы табл. 2.

Полагая в формуле (1.20) $\xi = y, \eta = y, j = 5$, выпишем

$$\begin{aligned} \mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5 &= \sum_{\zeta \neq y} [\epsilon_{\zeta y v} v_5^y \omega_5^\zeta + (\zeta_5^y \omega_5^y - y_5^y \omega_5^\zeta) \omega_5^\zeta] = \\ &= z_5^y \omega_5^x + (x_5^y \omega_5^y - y_5^y \omega_5^x) \omega_5^x - x_5^y \omega_5^z + (z_5^y \omega_5^y - y_5^y \omega_5^z) \omega_5^z = \\ &= -s_5 (\omega_5^z - \omega_5^x \omega_5^y) - c_5 (\omega_5^{x^2} + \omega_5^{z^2}), \end{aligned}$$

так как во второй строке третьего блока табл. 1 имеем

$$x_5^y = x_{54}^y = s_5, y_5^y = y_{54}^y = c_5, z_5^y = z_{54}^y = 0.$$

5. Выпишем формулы вычисления ω_1^ξ .

Из рис. 2 видно, что $\omega_1^y = \omega_2^y = \dot{q}_1$, $\omega_3^y = \omega_4^y = \dot{q}_1 + \dot{q}_3$, $\omega_i^x = \omega_i^z = 0$, где $i = 1, 2, 3, 4$. Следовательно, повторно используя формулы вычисления ω_1^ξ в Примере 1 и меняя в них q_3 на $q_{13} = q_1 + q_3$, получим

$$\omega_5^x = s_5 \dot{q}_{13}, \omega_5^y = c_5 \dot{q}_{13}, \omega_5^z = \dot{q}_5, \omega_6^x = c_6 \omega_5^x - s_6 \dot{q}_5, \omega_6^y = \omega_5^y + \dot{q}_6, \omega_6^z = s_6 \omega_5^x + c_6 \dot{q}_5,$$

где $\dot{q}_{13} = \dot{q}_1 + \dot{q}_3$.

6. Выпишем формулы вычисления $\dot{\omega}_1^\xi$.

Повторно используя формулы вычисления $\dot{\omega}_1^\xi$ в Примере 1, где $\dot{q}_{13} = \dot{q}_1 + \dot{q}_3$, для МС на рис. 2 получим

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_5^x &= s_5 \ddot{q}_{13} + \dot{q}_5 \omega_5^y, \dot{\omega}_5^z = \ddot{q}_5, \dot{\omega}_5^y = c_5 \ddot{q}_{13} - \dot{q}_5 \omega_5^x, \dot{\omega}_6^x = c_6 \dot{\omega}_5^x - s_6 \ddot{q}_5 - \omega_6^z \dot{q}_6; \\ \dot{\omega}_6^y &= \dot{\omega}_5^y + \ddot{q}_6, \dot{\omega}_6^z = s_6 \dot{\omega}_5^x + c_6 \ddot{q}_5 + \omega_6^x \dot{q}_6. \end{aligned}$$

7. Выпишем формулы вычисления искомых движущих сил.

С учетом выписанных значений $\omega_1^y = \dot{q}_1$, $\omega_1^z = 0$, $\omega_5^z = \dot{q}_5$ и выражений $\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{x}}_1$, $\mathbf{x}_1 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$, $\mathbf{y} \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5$ получим

$$\begin{aligned} F_2 &= m_2 \ddot{q}_2 - m_{q2} \dot{q}_1^2 - a [s_3 (\omega_5^x + \dot{q}_5 \omega_5^y) - x_{51}^x (\dot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) - y_{51}^x (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x^2})]; \\ F_4 &= m_4 \ddot{q}_4 - a [s_5 (\dot{q}_5 - \omega_5^y \omega_5^x) + c_5 (\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x^2})] - m_{g4}. \end{aligned}$$

3.2. Выписывание формул вычисления движущих моментов сил

1. Выпишем формулу вычисления M_1 .

$\mathbf{q}_1 = \mathbf{q}_3 = \mathbf{y}$. Следовательно, по формуле (1.24) для $j = 1, k = 3$ выпишем

$$M_1 = \mathbf{y} \cdot [(m_{c2} \mathbf{c}_2 + m_2 \mathbf{R}_2) \times \ddot{\mathbf{R}}_2 + \mathbf{R}_2 \times \ddot{\mathbf{m}}_2] + \mathbf{y} \cdot (\dot{\mathbf{K}}_1 + \dot{\mathbf{K}}_2) + M_3,$$

так как $\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_3 = 0$. По формуле (1.5) выпишем $\dot{\mathbf{K}}_1 = I_1^y \dot{q}_1 \mathbf{y}_1$, $\dot{\mathbf{K}}_2 = I_2^y \dot{q}_1 \mathbf{y}_1$. Теперь

$$\begin{aligned} M_1 &= \mathbf{y} \cdot (m_2 \mathbf{q}_2 - m_{c2}) \mathbf{x}_1 \times \ddot{\mathbf{R}}_2 + \mathbf{q}_2 \mathbf{y} \cdot \mathbf{x}_1 \times \ddot{\mathbf{m}}_2 + \mathbf{y} \cdot (I_1^y \dot{q}_1 \mathbf{y}_1 + I_2^y \dot{q}_1 \mathbf{y}_1) + M_3 = \\ &= -m_{q2} \mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{R}}_2 - \mathbf{q}_2 \mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{m}}_2 + I_{12}^y \dot{q}_1 + M_3, \end{aligned}$$

где $I_{12}^y = I_1^y + I_2^y$.

По формуле (1.12)

$$\mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{R}}_2 = \mathbf{z}_1 \cdot (\mathbf{q}_2 \mathbf{x}_1)''_{t^2} = \mathbf{z}_1 \cdot (\ddot{\mathbf{q}}_2 \mathbf{x}_1 + 2\dot{q}_2 \dot{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{q}_2 \ddot{\mathbf{x}}_1);$$

$$\mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{m}}_2 = \mathbf{z}_1 \cdot (-m_{c2} \ddot{\mathbf{x}}_1 - m_4 \ddot{\mathbf{q}}_4 \mathbf{y} - \mathbf{a} \ddot{\mathbf{y}}_5) = -m_{c2} \mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{a} \mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_5.$$

По формулам (1.18), (1.22), (1.19) выпишем

$$\mathbf{z}_1 \cdot \dot{\mathbf{x}}_1 = \epsilon_{\zeta x z} \omega_1^\zeta = \epsilon_{y x z} \omega_1^y = -\dot{q}_1, \mathbf{z}_1 \cdot \dot{\mathbf{x}}_1 = \epsilon_{x z v} \omega_1^v + \omega_1^z \omega_1^x = \epsilon_{x z y} \omega_1^y = -\dot{q}_1;$$

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_1 \cdot \dot{\mathbf{y}}_5 &= \sum_{\zeta \neq y} \left[\epsilon_{\zeta yv} v_{15}^z \dot{\omega}_5^\zeta + \left(\zeta_{15}^z \omega_5^y - y_{51}^z \omega_5^\zeta \right) \omega_5^\zeta \right] = \\ &= \epsilon_{xyz} z_{51}^z \dot{\omega}_5^x + \left(x_{51}^z \omega_5^y - y_{51}^z \omega_5^x \right) \omega_5^x + \epsilon_{zyx} x_{51}^z \dot{\omega}_5^z + \left(z_{51}^z \omega_5^y - y_{51}^z \omega_5^z \right) \omega_5^z = \\ &= z_{51}^z \left(\dot{\omega}_5^x + \omega_5^y \omega_5^z \right) - x_{51}^z \left(\dot{\omega}_5^z - \omega_5^x \omega_5^y \right) - y_{51}^z \left(\omega_5^{x2} + \omega_5^{z2} \right). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{R}}_2 &= -q_2 \ddot{q}_1 - 2\dot{q}_1 \dot{q}_2; \\ \mathbf{z}_1 \cdot \ddot{\mathbf{m}}_2 &= -m_{c2} \ddot{q}_1 + a \left[z_{51}^z \left(\dot{\omega}_5^x + \omega_5^y \omega_5^z \right) - x_{51}^z \left(\dot{\omega}_5^z - \omega_5^x \omega_5^y \right) - y_{51}^z \left(\omega_5^{x2} + \omega_5^{z2} \right) \right]. \end{aligned}$$

Таким образом, с учетом равенств $\omega_5^z = \dot{q}_2$, $z_{51}^z = c_3$ получим

$$\begin{aligned} M_1 &= m_{q2} (q_2 \ddot{q}_1 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2) + I_{12}^y \ddot{q}_1 - \\ &- q_2 \left\{ m_{c2} \ddot{q}_1 - a \left[z_{51}^z \left(\dot{\omega}_5^x + \omega_5^y \omega_5^z \right) - x_{51}^z \left(\dot{\omega}_5^z - \omega_5^x \omega_5^y \right) - y_{51}^z \left(\omega_5^{x2} + \omega_5^{z2} \right) \right] \right\} + M_3 = \\ &= \left[I_{12}^y + (m_{q2} - m_{c2}) q_2 \right] \ddot{q}_1 + 2m_{q2} \dot{q}_1 \dot{q}_2 - \\ &- a q_2 \left[c_3 \left(\dot{\omega}_5^x + \omega_5^y \omega_5^z \right) - x_{51}^z \left(\dot{\omega}_5^z - \omega_5^x \omega_5^y \right) - y_{51}^z \left(\omega_5^{x2} + \omega_5^{z2} \right) \right] + M_3. \end{aligned}$$

2. Выпишем формулы $G_j = \mathbf{g} \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{m}_j \times \mathbf{y}$ для $j = 3, 5, 6$.

Так как подсистемы m_3 для МС на рис. 1 и 2 совпадают и $\mathbf{y} = \mathbf{y}_3$, то выражения G_3, G_5, G_6 , выписанные в Примере 1, можно повторно использовать в этом примере. Следовательно, $G_3 = G_6 = 0, G_5 = g a s_5$.

3. Выпишем формулы $M_{qj} = \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{m}_j \times \dot{\mathbf{r}}_j$ для $j = 3, 5, 6$.

$$\begin{aligned} M_{q3} &= \mathbf{q}_3 \cdot \mathbf{m}_3 \times \dot{\mathbf{r}}_3 = \mathbf{y} \times (m_{q4} \mathbf{y} - a \mathbf{y}_5) \cdot \dot{\mathbf{r}}_3 = -a \mathbf{y}_5 \cdot \dot{\mathbf{r}}_3 \times \mathbf{y} = -a \mathbf{y}_5 \cdot (q_2 \mathbf{x}_1 \times \mathbf{y})''_{t^2} = \\ &= -a \mathbf{y}_5 \cdot (q_2 \mathbf{z}_1)''_{t^2} = -a \mathbf{y}_5 \cdot (\ddot{q}_2 \mathbf{z}_1 + 2\dot{q}_2 \dot{\mathbf{z}}_1 + q_2 \ddot{\mathbf{z}}_1). \end{aligned}$$

По формулам (1.16), (1.19) выпишем

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_5 \cdot \dot{\mathbf{z}}_1 &= \sum_{\zeta} \epsilon_{\zeta yv} v_{15}^y \omega_1^\zeta = \epsilon_{yzx} x_{15}^y \omega_1^y = y_{51}^x \dot{q}_1; \\ \mathbf{y}_5 \cdot \ddot{\mathbf{z}}_1 &= \sum_{\zeta \neq z} \left[\epsilon_{\zeta yv} v_{15}^y \dot{\omega}_1^\zeta + \left(\zeta_{15}^y \omega_1^z - z_{15}^y \omega_1^\zeta \right) \omega_1^\zeta \right] = \\ &= \epsilon_{yzx} x_{15}^y \dot{\omega}_1^y - z_{15}^y \omega_1^y \omega_1^y = y_{51}^x \dot{q}_1 - y_{51}^z \dot{q}_1^2. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} M_{q3} &= -a \left[y_{51}^z \ddot{q}_2 + 2y_{51}^x \dot{q}_1 \dot{q}_2 + q_2 (y_{51}^x \ddot{q}_1 - y_{51}^z \dot{q}_1^2) \right] = \\ &= -a \left[y_{51}^z (\ddot{q}_2 - q_2 \dot{q}_1^2) + y_{51}^x (q_2 \ddot{q}_1 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2) \right]; \\ M_{q5} &= \mathbf{q}_5 \cdot \mathbf{m}_5 \times \dot{\mathbf{r}}_5 = -a \mathbf{z}_5 \times \mathbf{y}_5 \cdot \dot{\mathbf{r}}_5 = a \mathbf{x}_5 \cdot \dot{\mathbf{r}}_5 = a \mathbf{x}_5 \cdot [(q_2 \mathbf{x}_1)''_{t^2} - \ddot{q}_4 \mathbf{y}] = \\ &= a \mathbf{x}_5 \cdot (\ddot{q}_2 \mathbf{x}_1 + 2\dot{q}_2 \dot{\mathbf{x}}_1 + q_2 \ddot{\mathbf{x}}_1) - a x_5^y \ddot{q}_4. \end{aligned}$$

По формулам (1.16), (1.19) выпишем

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_5 \cdot \dot{\mathbf{x}}_1 &= \sum_{\zeta} \epsilon_{\zeta xv} v_{15}^x \omega_1^\zeta = \epsilon_{yxz} z_{15}^x \omega_1^y = -x_{51}^z \dot{q}_1; \\ \mathbf{x}_5 \cdot \ddot{\mathbf{x}}_1 &= \sum_{\zeta \neq x} \left[\epsilon_{\zeta xv} v_{15}^x \dot{\omega}_1^\zeta + \left(\zeta_{15}^x \omega_1^z - x_{15}^x \omega_1^\zeta \right) \omega_1^\zeta \right] = \epsilon_{yxz} z_{15}^x \dot{\omega}_1^y - x_{15}^x \omega_1^y \omega_1^y = \\ &= -x_{51}^z \dot{q}_1 - x_{51}^x \dot{q}_1^2. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} M_{q5} &= a \left[x_{51}^x \ddot{q}_2 - 2x_{51}^z \dot{q}_1 \dot{q}_2 - q_2 (x_{51}^z \ddot{q}_1 + x_{51}^x \dot{q}_1^2) - x_5^y \ddot{q}_4 \right] = \\ &= a \left[x_{51}^x (\ddot{q}_2 - q_2 \dot{q}_1^2) - x_{51}^z (q_2 \ddot{q}_1 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2) - x_5^y \ddot{q}_4 \right]; \\ M_{q6} &= \mathbf{y}_6 \cdot \mathbf{m}_6 \times \dot{\mathbf{r}}_6 = -m_{c6} \mathbf{y}_6 \cdot \mathbf{y}_6 \times \dot{\mathbf{r}}_6 = 0. \end{aligned}$$

4. Выпишем формулы $M_j^q = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j+1}^6 (m_i \mathbf{R}_i \times \ddot{\mathbf{R}}_i + \mathbf{m}_i \times \ddot{\mathbf{R}}_i + \mathbf{R}_i \times \ddot{\mathbf{m}}_i)$ для $j = 3, 5, 6$.

$$M_3^q = \mathbf{y}_1 \cdot (m_4 \mathbf{R}_4 \times \ddot{\mathbf{R}}_4 + \mathbf{m}_4 \times \ddot{\mathbf{R}}_4 + \mathbf{R}_4 \times \ddot{\mathbf{m}}_4) = 0,$$

так как $\ddot{\mathbf{R}}_4 = -\ddot{q}_4 \mathbf{y}$, $M_5^q = M_6^q = 0$, так как $\mathbf{R}_5 = \mathbf{R}_6 = 0$.

5. Выпишем формулы $K_j^q = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^6 \dot{\mathbf{K}}_i$ для $j = 3, 5, 6$.

Формулы вычисления K_3^q, K_5^q, K_6^q для МС на рис.1 можно повторно использовать для рассматриваемой МС, так как их третьи подсистемы совпадают. При этом q_3 необходимо заменить на q_{13} . Таким образом, с учетом обозначения $I_{34}^y = I_3^y + I_4^y$ получим

$$\begin{aligned} K_3^q &= I_{34}^y \ddot{q}_{13} + s_5 \left(I_5^z \dot{\omega}_5^x + I_5^a \omega_5^y \omega_5^z \right) + I_5^y c_5 \dot{\omega}_5^y + x_6^y \left(I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z \right) + \\ &+ I_6^y c_5 \dot{\omega}_6^y + z_6^y \left(I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y \right), \\ K_5^q &= I_5^z \dot{\omega}_5^z - I_5^a \omega_5^x \omega_5^y - s_6 \left(I_6^z \dot{\omega}_6^x + I_6^a \omega_6^y \omega_6^z \right) + c_6 \left(I_6^z \dot{\omega}_6^z - I_6^a \omega_6^x \omega_6^y \right), K_6^q = I_6^y \dot{\omega}_6^y. \end{aligned}$$

6. Выпишем формулы вычисления M_j , где $j = 3, 5, 6$.

$$M_3 = M_{q_3} + K_3^q = -a[y_{51}^z(\ddot{q}_2 - q_2\dot{q}_1^2) + y_{51}^x(q_2\ddot{q}_1 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2)] + I_{34}^y\ddot{q}_{13} + s_5(I_5^z\dot{\omega}_5^x + I_5^a\omega_5^y\omega_5^z) + I_5^y c_5 \dot{\omega}_5^y + x_6^y(I_6^z\dot{\omega}_6^x + I_6^a\omega_6^y\omega_6^z) + I_6^y c_5 \dot{\omega}_6^y + z_6^y(I_6^z\dot{\omega}_6^z - I_6^a\omega_6^x\omega_6^y);$$

$$M_5 = M_{q_5} + K_5^q = a[x_{51}^x(\ddot{q}_2 - q_2\dot{q}_1^2) - x_{51}^z(q_2\ddot{q}_1 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2) - x_{54}^y\ddot{q}_4] + I_5^z\dot{\omega}_5^z - I_5^a\omega_5^x\omega_5^y - s_6(I_6^z\dot{\omega}_6^x + I_6^a\omega_6^y\omega_6^z) + c_6(I_6^z\dot{\omega}_6^z - I_6^a\omega_6^x\omega_6^y), M_6 = K_6^q = I_6^y\dot{\omega}_6^y.$$

Используемые здесь НК взяты из табл. 2 и имеют следующие значения: $x_{51}^x = c_3 c_5$, $x_{51}^y = s_5$, $x_{51}^z = -s_3 c_5$, $y_{51}^x = -c_3 s_5$, $y_{51}^y = s_3 s_5$, $y_{51}^z = c_3$, $x_6^y = x_{64}^y = s_5 c_6$, $z_6^y = z_{64}^y = s_5 s_6$.

Таким образом, первый вид УД МС на рис. 2 представляется следующей системой дифференциальных уравнений, содержащих квазиускорения и квазискорости:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_1\ddot{q}_1 + 2m_{q_2}\dot{q}_1\dot{q}_2 - aq_2[c_3(\dot{\omega}_5^x + \dot{\omega}_5^y\dot{q}_5) - x_{51}^z(\ddot{q}_5 - \omega_5^x\omega_5^y) - y_{51}^z(\omega_5^{x2} + \dot{q}_5^2)] + M_3 = M_1; \\ m_2\ddot{q}_2 - m_{q_2}\dot{q}_1^2 - a[s_3(\dot{\omega}_5^x + \dot{q}_5\omega_5^y) - x_{51}^x(\ddot{q}_5 - \omega_5^y\omega_5^x) - y_{51}^x(\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})] = F_2; \\ -a[y_{51}^z(\ddot{q}_2 - q_2\dot{q}_1^2) + y_{51}^x(q_2\ddot{q}_1 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2)] + I_{34}^y\ddot{q}_{13} + s_5(I_5^z\dot{\omega}_5^x + I_5^a\omega_5^y\dot{q}_5) + I_5^y c_5 \dot{\omega}_5^y + x_6^y(I_6^z\dot{\omega}_6^x + I_6^a\omega_6^y\omega_6^z) + I_6^y c_5 \dot{\omega}_6^y + z_6^y(I_6^z\dot{\omega}_6^z - I_6^a\omega_6^x\omega_6^y) = M_3; \\ m_4\ddot{q}_4 - a[s_5(\ddot{q}_5 - \omega_5^y\omega_5^x) + c_5(\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})] - m_{g4} = F_4; \\ a[x_{51}^x(\ddot{q}_2 - q_2\dot{q}_1^2) - x_{51}^z(q_2\ddot{q}_1 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2) - s_5\ddot{q}_4] + I_5^z\ddot{q}_5 - I_5^a\omega_5^x\omega_5^y - s_6(I_6^z\dot{\omega}_6^x + I_6^a\omega_6^y\omega_6^z) + c_6(I_6^z\dot{\omega}_6^z - I_6^a\omega_6^x\omega_6^y) + ags_5 = M_5; \\ I_6^y\dot{\omega}_6^y = M_6, \end{array} \right.$$

где $H_1 = I_{12}^y + (m_2 q_2 - 2m_{c2})q_2$.

3.3. Вывод МИК в УД МС на рис. 2. Подставим $\dot{\omega}_5^x = s_5\ddot{q}_{13} + \dot{q}_5\omega_5^y$ в формулу вычисления F_2 .

Тогда получим $F_2 = m_2\ddot{q}_2 - as_3s_5\ddot{q}_{13} + ax_{51}^x\ddot{q}_5 + h_2$, где

$$h_2 = -m_{q_2}\dot{q}_1^2 - a[2s_3\dot{q}_5\omega_5^y + x_{51}^x\omega_5^y\omega_5^x - y_{51}^x(\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})].$$

Для формулы вычисления M_3 по аналогии с Примером 1 и учитывая, что подсистемы m_3 у МС на рис. 2 и 1 совпадают, получим

$$M_3 = -a(y_{51}^z\ddot{q}_2 + y_{51}^x q_2\ddot{q}_1) + H_{33}\ddot{q}_{13} + I_6^y c_5 \dot{q}_6 + h_3, \text{ где } H_{33} = I_{36}^y + I_{56}^a s_5^2;$$

$$h_3 = a(y_{51}^z q_2\dot{q}_1^2 - 2y_{51}^x \dot{q}_1\dot{q}_2) + (I_5^a + I_{56}^a)s_5\dot{q}_5\omega_5^y - I_{56}^y c_5 \dot{q}_5\omega_5^x + I_6^a(x_6^y\omega_6^z - z_6^y\omega_6^x)\omega_6^y + I_6^z s_5(s_6\omega_6^x - c_6\omega_6^z)\dot{q}_6.$$

С использованием выражения M_3 формула вычисления M_1 принимает вид

$$M_1 = H_{11}\ddot{q}_1 - aq_2(c_3s_5\ddot{q}_{13} - x_{51}^z\ddot{q}_5) - a(y_{51}^z\ddot{q}_2 + y_{51}^x q_2\ddot{q}_1) + H_{33}\ddot{q}_{13} + I_6^y c_5 \dot{q}_6 + h_1 = H_{11}\ddot{q}_1 - ay_{51}^z\ddot{q}_2 + H_{33}\ddot{q}_3 + aq_2x_{51}^z\ddot{q}_5 + I_6^y c_5 \dot{q}_6 + h_1,$$

где $H_{11} = H_1 - aq_2c_3s_5 - aq_2y_{51}^x + H_{33} = H_1 + H_{33}$,

$$h_1 = 2m_{q_2}\dot{q}_1\dot{q}_2 - aq_2[2c_3\dot{\omega}_5^y\dot{q}_5 + x_{51}^z\omega_5^x\omega_5^y - y_{51}^z(\omega_5^{x2} + \dot{q}_5^2)] + a(y_{51}^z q_2\dot{q}_1^2 - 2y_{51}^x \dot{q}_1\dot{q}_2) + (I_5^a + I_{56}^a)s_5\dot{q}_5\omega_5^y - I_{56}^y c_5 \dot{q}_5\omega_5^x + I_6^a(x_6^y\omega_6^z - z_6^y\omega_6^x)\omega_6^y + I_6^z s_5(s_6\omega_6^x - c_6\omega_6^z)\dot{q}_6.$$

Для F_4 имеем $F_4 = m_4\ddot{q}_4 - as_5\ddot{q}_5 + h_4 - m_{g4}$, где $h_4 = a[s_5\omega_5^y\omega_5^x - c_5(\dot{q}_5^2 + \omega_5^{x2})]$.

Для формулы вычисления M_5 по аналогии с Примером 1 получим

$$M_5 = a(x_{51}^x\ddot{q}_2 - x_{51}^z q_2\ddot{q}_1 - s_5\ddot{q}_4) + I_{56}^z\ddot{q}_5 + h_5 + ags_5, \text{ где } I_{56}^z = I_5^z + I_6^z;$$

$$h_5 = -a(x_{51}^x q_2\dot{q}_1^2 + 2x_{51}^z \dot{q}_1\dot{q}_2) - I_5^a\omega_5^x\omega_5^y + (I_6^z\dot{q}_6 - I_6^a\omega_6^y)(c_6\omega_6^x + s_6\omega_6^z).$$

Для M_6 получим $M_6 = I_6^y\dot{\omega}_6^y = I_6^y(c_5\ddot{q}_{13} + \ddot{q}_6 - \dot{q}_5\omega_5^x) = I_6^y(c_5\ddot{q}_{13} + \ddot{q}_6) + h_6$, где $h_6 = -I_6^y\dot{q}_5\omega_5^x$.

Из формул вычисления $M_1, F_2, M_3, F_4, M_5, M_6$, используя выписанные НК, составим МИК МС на рис. 2. Она примет следующий вид

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} I_{12}^y + H_{33} + (m_2 q_2 - 2m_{c2})q_2 & -ay_{51}^z & H_{33} - aq_2y_{51}^x & 0 & -aq_2x_{51}^z & I_6^y c_5 \\ -ay_{51}^z & m_2 & -ay_{51}^z & 0 & ax_{51}^x & 0 \\ H_{33} - aq_2y_{51}^x & -ay_{51}^z & H_{33} & 0 & 0 & I_6^y c_5 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & -as_5 & 0 \\ -aq_2x_{51}^z & ax_{51}^x & 0 & -as_5 & I_{56}^z & 0 \\ I_6^y c_5 & 0 & I_6^y c_5 & 0 & 0 & I_6^y \end{pmatrix},$$

где $H_{33} = I_{36}^y + I_{56}^a s_5^2$. Видно, что эта МИК симметрична.

3.4. Выделение ГИС в УДМС на рис. 2. В формуле вычисления h_1 имеем:

$$\begin{aligned}\Omega_{15} &= [(I_5^a + I_{56}^z)s_5\omega_5^y - I_{56}^y c_5\omega_5^x]\dot{q}_5 = [(I_5^a + I_{56}^z)s_5c_5\dot{q}_{13} - I_{56}^y c_5s_5\dot{q}_{13}]\dot{q}_5 = \\ &= (I_5^a + I_{56}^z - I_{56}^y)c_5s_5\dot{q}_{13}\dot{q}_5; \\ \Omega_{15}^2 &= x_{51}^z\omega_5^x\omega_5^y - y_{51}^z\omega_5^x\omega_5^y = (x_{51}^z\omega_5^y - y_{51}^z\omega_5^x)\omega_5^x = \\ &= (-s_3c_5c_5\dot{q}_{13} - s_3s_5s_5\dot{q}_{13})\omega_5^x = -s_3s_5\dot{q}_{13}^2; \\ \Omega_{16} &= I_6^z s_5(s_6\omega_6^x - c_6\omega_6^z)\dot{q}_6 = I_6^z s_5[s_6(c_6\omega_6^x - s_6\dot{q}_5) - c_6(s_6\omega_6^x + c_6\dot{q}_5)]\dot{q}_6 = -I_6^z s_5\dot{q}_5\dot{q}_6; \\ \Omega_{16}^2 &= I_6^a(x_6^y\omega_6^z - z_6^y\omega_6^x)\omega_6^y = I_6^a[s_5c_6(s_6\omega_6^x + c_6\dot{q}_5) - s_5s_6(c_6\omega_6^x - s_6\dot{q}_5)]\omega_6^y = \\ &= I_6^a s_5\dot{q}_5(c_5\dot{q}_{13} + \dot{q}_6).\end{aligned}$$

Следовательно, формула вычисления h_1 принимает вид

$$h_1 = 2m_{q2}\dot{q}_1\dot{q}_2 - aq_2(2c_3c_5\dot{q}_{13}\dot{q}_5 - s_3s_5\dot{q}_{13}^2 - y_{51}^z\dot{q}_5^2) + a(y_{51}^z q_2\dot{q}_1^2 - 2y_{51}^x\dot{q}_1\dot{q}_2) + (I_5^a + I_{56}^z - I_{56}^y)c_5s_5\dot{q}_{13}\dot{q}_5 - I_6^z s_5\dot{q}_5\dot{q}_6 + I_6^a s_5\dot{q}_5(c_5\dot{q}_{13} + \dot{q}_6).$$

Теперь с учетом обозначений x_{51}^x, y_{51}^z окончательно получим

$$\begin{aligned}h_1 &= aq_2 y_{51}^z (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_{13}^2 + \dot{q}_5^2) + 2(m_{q2} - ay_{51}^x)\dot{q}_1\dot{q}_2 + \\ &+ [(I_5^a + I_{56}^z - I_{56}^y + I_6^a)s_5c_5 - 2aq_2 x_{51}^x]\dot{q}_{13}\dot{q}_5 + (I_6^a - I_6^z)s_5\dot{q}_5\dot{q}_6 = \\ &= aq_2 y_{51}^z (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_{13}^2 + \dot{q}_5^2) + 2(m_{q2} - ay_{51}^x)\dot{q}_1\dot{q}_2 + 2(I_{56}^a s_5 c_5 - aq_2 x_{51}^x)\dot{q}_{13}\dot{q}_5 - I_6^y s_5\dot{q}_5\dot{q}_6.\end{aligned}$$

В формуле вычисления h_2 имеем

$$\Omega_{25}^2 = (x_{51}^x\omega_5^y - y_{51}^x\omega_5^x)\omega_5^x = (c_3c_5c_5\dot{q}_{13} + c_3s_5s_5\dot{q}_{13})\omega_5^x = c_3\dot{q}_{13}\omega_5^x,$$

т. е.

$$\begin{aligned}h_2 &= -m_{q2}\dot{q}_1^2 + a(y_{51}^x\dot{q}_5^2 - 2s_3c_5\dot{q}_{13}\dot{q}_5 - c_3s_5\dot{q}_{13}^2) = \\ &= -m_{q2}\dot{q}_1^2 + a[y_{51}^x(\dot{q}_{13}^2 + \dot{q}_5^2) + 2x_{51}^z\dot{q}_{13}\dot{q}_5].\end{aligned}$$

В формуле вычисления h_3 имеем

$$\Omega_{35} = (I_5^a + I_{56}^z)s_5\dot{q}_5\omega_5^y - I_{56}^y c_5\dot{q}_5\omega_5^x = (I_5^a + I_{56}^z)s_5c_5\dot{q}_{13}\dot{q}_5 = 2I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6$$

и, повторно используя формулы Примера 1, получим $\Omega_{36} = -I_6^z s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6, \Omega_{36}^2 = I_6^a s_5 \dot{q}_5 \omega_6^y$. Следовательно, $h_3 = ay_{51}^z q_2 \dot{q}_1^2 - 2ay_{51}^x \dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_{13} \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6$.

В формуле h_4 имеем

$$\Omega_{45}^2 = s_5\omega_5^x\omega_5^y - c_5\omega_5^x\omega_5^z = (s_5\omega_5^y - c_5\omega_5^x)\omega_5^x = (s_5c_5\dot{q}_{13} - c_5s_5\dot{q}_{13})\omega_5^x = 0,$$

т. е. $h_4 = -ac_5\dot{q}_5^2$.

В формуле h_5 имеем $\Omega_{56} = s_6\omega_6^z + c_6\omega_6^x = s_6(s_6\omega_6^x + c_6\dot{q}_5) + c_6(c_6\omega_6^x - s_6\dot{q}_5) = \omega_6^x$. Теперь

$$\begin{aligned}\Omega_{55}^2 &= I_5^a\omega_5^x\omega_5^y + (I_6^z\dot{q}_6 - I_6^a\omega_6^y)\omega_5^x = I_6^z\dot{q}_6\omega_5^x - I_5^a\omega_5^x\omega_5^y - I_6^a\omega_5^x(\omega_5^y + \dot{q}_6) = \\ &= (I_6^z - I_6^a)\dot{q}_6\omega_5^x - (I_5^a + I_6^a)\omega_5^x\omega_5^y = I_6^y\dot{q}_6\omega_5^x - I_{56}^a\omega_5^x\omega_5^y = (I_6^y\dot{q}_6 - I_{56}^a c_5\dot{q}_{13})s_5\dot{q}_{13}.\end{aligned}$$

Следовательно, $h_5 = -a(x_{51}^x q_2 \dot{q}_1^2 + 2x_{51}^z \dot{q}_1 \dot{q}_2) + (I_6^y \dot{q}_6 - I_{56}^a c_5 \dot{q}_{13})s_5 \dot{q}_{13}$.

Для формулы h_6 получим $h_6 = -I_6^y s_5 \dot{q}_{13} \dot{q}_5$.

Запишем формулу вычисления мощности обобщенных инерционных сил. Получим

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^6 h_i \dot{q}_i &= \\ &= [aq_2 y_{51}^z (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_{13}^2 + \dot{q}_5^2) + 2(m_{q2} - ay_{51}^x)\dot{q}_1\dot{q}_2 + 2(I_{56}^a s_5 c_5 - aq_2 x_{51}^x)\dot{q}_{13}\dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6]\dot{q}_1 + \\ &+ [-m_{q2}\dot{q}_1^2 + ay_{51}^x(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_3^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_3) + ay_{51}^z\dot{q}_5^2 + 2ax_{51}^z\dot{q}_{13}\dot{q}_5]\dot{q}_2 + \\ &+ (ay_{51}^z q_2 \dot{q}_1^2 - 2ay_{51}^x \dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_{13} \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6)\dot{q}_3 + (-ac_5\dot{q}_5^2)\dot{q}_4 + \\ &+ (-ax_{51}^x q_2 \dot{q}_1^2 - 2ax_{51}^z \dot{q}_1 \dot{q}_2 + I_6^y s_5 \dot{q}_{13} \dot{q}_6 - I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_{13}^2)\dot{q}_5 + (-I_6^y s_5 \dot{q}_{13} \dot{q}_5)\dot{q}_6.\end{aligned}$$

После сокращения слагаемых, сумма которых равна нулю, получим

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^6 h_i \dot{q}_i &= [aq_2 y_{51}^z (\dot{q}_5^2 + \dot{q}_3^2) + (m_{q2} - ay_{51}^x)\dot{q}_1\dot{q}_2 - aq_2 y_{51}^z \dot{q}_1 \dot{q}_3 + \\ &+ 2(I_{56}^a s_5 c_5 + aq_2 x_{51}^x)\dot{q}_{13}\dot{q}_5]\dot{q}_1 + [ay_{51}^x(\dot{q}_3^2 + \dot{q}_5^2) + 2ax_{51}^z\dot{q}_3\dot{q}_5]\dot{q}_2 + \\ &+ (I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5)\dot{q}_3 + (-ac_5\dot{q}_5^2)\dot{q}_4 + (-I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_{13})\dot{q}_6.\end{aligned}$$

Сокращенные слагаемые равны выражению $\sum_{i=1}^6 g_i \dot{q}_i = 0$. Следовательно, искомые ГИС имеют вид

$$\begin{aligned}g_1 &= (m_{q2} - ay_{51}^x)\dot{q}_1\dot{q}_2 - aq_2 y_{51}^z \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2(I_{56}^a s_5 c_5 + aq_2 x_{51}^x)\dot{q}_{13}\dot{q}_5; \\ g_2 &= -m_{q2}\dot{q}_1^2 + ay_{51}^x\dot{q}_1^2 + 2ay_{51}^z\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2ax_{51}^z\dot{q}_1\dot{q}_5; \\ g_3 &= ay_{51}^z q_2 \dot{q}_1^2 - 2ay_{51}^x \dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_1 \dot{q}_5 + I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_3 \dot{q}_5 - I_6^y s_5 \dot{q}_5 \dot{q}_6; \\ g_5 &= -ax_{51}^x q_2 \dot{q}_1^2 - 2ax_{51}^z \dot{q}_1 \dot{q}_2 + I_6^y s_5 \dot{q}_{13} \dot{q}_6 - I_{56}^a s_5 c_5 \dot{q}_{13}^2.\end{aligned}$$

4. Выписывание УД МС с одной ПКП (Пример 3)

На рис. 3 изображена схема портальной МС со сферической СК. Два последних ориентирующих движения захвата здесь не рассматриваются, т. е. $N = 4$. Рассматриваемая МС имеет следующее формальное описание.

Из рис. 3 видно $\mathbf{x}_3 = \mathbf{x}_4$, $\mathbf{y} = \mathbf{y}_1$, $\mathbf{y}_2 = \mathbf{y}_3 = \mathbf{y}_4$, $\mathbf{z}_1 = \mathbf{z}_2$, $\mathbf{z}_3 = \mathbf{z}_4$. Орты КП имеют следующие направления: $\mathbf{q}_1 = \mathbf{y}_1 = \text{const}$ – орт ВКП(1), направленный вертикально вверх; $\mathbf{q}_2 = \mathbf{z}_2$ – орт ВКП(2), меняющий свое направление в горизонтальной плоскости вместе с вращением тела m_{o1} ; $\mathbf{q}_3 = \mathbf{y}_3$ – орт ВКП(3), поворачивающийся на угол q_2 в вертикальной плоскости, которая вращается вокруг вертикальной оси вместе с телом m_{o1} ; $\mathbf{p}_4 = -\mathbf{y}_4$ – орт ПКП(4), направленный противоположно орту \mathbf{q}_3 .

Из рис. 3 видно, что

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_3 = 0, \mathbf{R}_4 = -q_4 \mathbf{y}_3,$$

$$\mathbf{c}_1 = \mathbf{y}_1, \mathbf{c}_2 = \mathbf{c}_3 = -\mathbf{y}_2, \mathbf{c}_4 = \mathbf{m}_4 = 0,$$

так как $C_4 = O_4$. Поэтому

$$\ddot{\mathbf{r}}_1 = \ddot{\mathbf{r}}_2 = \ddot{\mathbf{r}}_3 = 0, \ddot{\mathbf{r}}_4 = \ddot{\mathbf{R}}_4 = -(q_4 \mathbf{y}_3)''_t.$$

4.1. Выписывание УД в квазиускорениях. По формуле (1.23) выпишем:

$$\mathbf{m}_3 = m_{c3} \mathbf{c}_3 + m_4 \mathbf{R}_4 = -m_{c3} \mathbf{y}_2 - m_4 q_4 \mathbf{y}_2 = -m_{q4} \mathbf{y}_2,$$

где $m_{q4} = m_{c3} + m_4 q_4$;

$$\mathbf{m}_2 = m_{c2} \mathbf{c}_2 + \mathbf{m}_3 = -m_{c2} \mathbf{y}_2 - m_{q4} \mathbf{y}_2 = -m_4^q \mathbf{y}_2,$$

где $m_4^q = m_{c2} + m_{q4}$.

С учетом равенства $\mathbf{m}_4 = 0$ по формулам (1.1), (1.12),

(1.15) выпишем

$$\begin{aligned} F_4 &= \mathbf{p}_4 \cdot \mathbf{F}_4 = -\mathbf{y}_2 \cdot \mathbf{F}_4 = m_4 \mathbf{y}_2 \cdot (q_4 \mathbf{y}_2)''_t - m_{g4} \mathbf{y}_2 \cdot \mathbf{y} = \\ &= m_4 (\ddot{q}_4 \mathbf{y}_2 \cdot \mathbf{y}_2 + q_4 \mathbf{y}_2 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_2) - m_{g4} y_{21}^y. \end{aligned}$$

По формуле (1.21) выпишем $\mathbf{y}_2 \cdot \ddot{\mathbf{y}}_2 = -\omega_2^{x2} - \omega_2^{z2}$. Следовательно,

$$F_4 = m_4 [\ddot{q}_4 - q_4 (\omega_2^{x2} + \omega_2^{z2})] - m_{g4} y_{21}^y.$$

Из рис. 3 видно $\omega_1^x = \omega_1^z = 0$, $\omega_1^y = \dot{q}_1$. Теперь по формуле (1.8) выпишем

$$\Omega_2^x = \xi_2 \cdot \mathbf{y}_1 \omega_1^y + \mathbf{q}_2 \cdot \xi_2 \dot{q}_2, \text{ т. е. } \omega_2^x = \mathbf{x}_2 \cdot \mathbf{y}_1 \dot{q}_1 + \mathbf{z}_2 \cdot \mathbf{x}_2 \dot{q}_2 = x_{21}^y \dot{q}_1 = s_2 \dot{q}_1;$$

$$\omega_2^y = \mathbf{y}_2 \cdot \mathbf{y}_1 \dot{q}_1 + \mathbf{z}_2 \cdot \mathbf{y}_2 \dot{q}_2 = y_{21}^y \dot{q}_1 = c_2 \dot{q}_1;$$

$$\omega_2^z = \mathbf{z}_2 \cdot \mathbf{y}_1 \dot{q}_1 + \mathbf{z}_2 \cdot \mathbf{z}_2 \dot{q}_2 = z_{21}^y \dot{q}_1 + \dot{q}_2 = \dot{q}_2,$$

так как из второй строки третьего блока табл. 1 имеем $x_{21}^y = s_2$, $y_{21}^y = c_2$, $z_{21}^y = 0$. Таким образом, $F_4 = m_4 [\ddot{q}_4 - q_4 (\omega_2^{x2} + \dot{q}_2^2)] - m_{g4} c_2$.

Для $j = 3$ по формуле (1.8) выпишем $\omega_3^x = \sum_{\eta} \xi_3 \cdot \boldsymbol{\eta}_2 \omega_2^{\eta} + \mathbf{q}_3 \cdot \xi_3 \dot{q}_3$, т. е.

$$\omega_3^x = \sum_{\eta} \mathbf{x}_3 \cdot \boldsymbol{\eta}_2 \omega_2^{\eta} + \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{x}_3 \dot{q}_3 = x_{32}^x \omega_2^x + x_{32}^y \omega_2^y + x_{32}^z \omega_2^z = c_3 \omega_2^x - s_3 \dot{q}_2;$$

$$\omega_3^y = \sum_{\eta} \mathbf{y}_3 \cdot \boldsymbol{\eta}_2 \omega_2^{\eta} + \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{y}_3 \dot{q}_3 = y_{32}^x \omega_2^x + y_{32}^y \omega_2^y + y_{32}^z \omega_2^z + \dot{q}_3 = \omega_2^y + \dot{q}_3;$$

$$\omega_3^z = \sum_{\eta} \mathbf{z}_3 \cdot \boldsymbol{\eta}_2 \omega_2^{\eta} + \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{z}_3 \dot{q}_3 = z_{32}^x \omega_2^x + z_{32}^y \omega_2^y + z_{32}^z \omega_2^z = s_3 \omega_2^x + c_3 \dot{q}_2,$$

так как из второго блока табл. 1 имеем

$$x_{32}^x = c_3, x_{32}^y = 0, x_{32}^z = -s_3; y_{32}^x = 0, y_{32}^y = 1, y_{32}^z = 0; z_{32}^x = s_3, z_{32}^y = 0, z_{32}^z = c_3.$$

Так как КП(4) = ПКП, то имеем $\omega_4^x = \omega_3^x$.

По формуле (1.2) для $j = 1, 2, 3$ получим $M_j = K_j^q + M_j^q + G_j$, где

$$K_j^q = \mathbf{q}_j \cdot \sum_{i=j}^4 \dot{\mathbf{K}}_i, M_j^q = m_4 \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{R}_4 \times \ddot{\mathbf{R}}_4, G_j = g \mathbf{q}_j \cdot \mathbf{m}_j \times \mathbf{y}.$$

Выпишем моменты сил тяжести:

$$G_1 = g \mathbf{y} \cdot \mathbf{m}_1 \times \mathbf{y} = 0;$$

$$G_2 = g \mathbf{z}_2 \cdot \mathbf{m}_2 \times \mathbf{y} = -g m_4^q \mathbf{z}_2 \times \mathbf{y}_2 \cdot \mathbf{y} = g m_4^q \mathbf{x}_2 \cdot \mathbf{y} = g m_4^q x_{21}^y = g m_4^q s_2;$$

$$G_3 = g \mathbf{y}_3 \cdot \mathbf{m}_3 \times \mathbf{y} = -m_{q4} \mathbf{y}_2 \times \mathbf{y}_2 \cdot \mathbf{y} = 0.$$

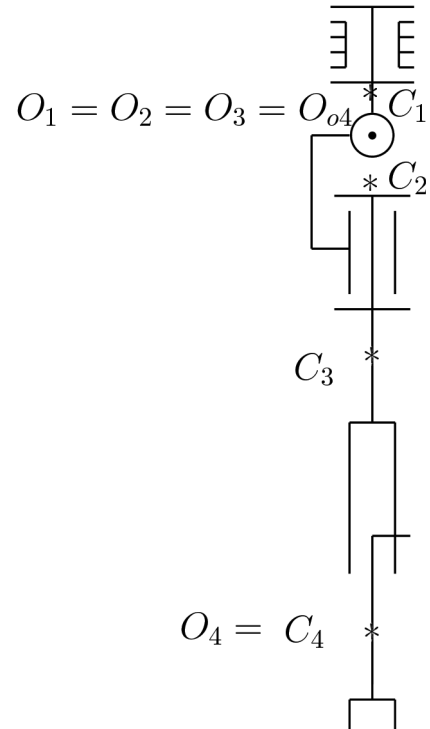


Рис. 3. МС со сферической СК
Fig. 3. MS with spherical CS

Выпишем выражения M_j^q . Для $j = 3$ получим

$$M_3^q = m_4 y_3 \cdot \mathbf{R}_4 \times \dot{\mathbf{R}}_4 = m_4 q_4 y_3 \times y_3 \cdot \dot{\mathbf{R}}_4 = 0.$$

Используя формулу (1.12), получим

$$M_2^q = m_4 z_2 \cdot \mathbf{R}_4 \times \dot{\mathbf{R}}_4 = -m_4 q_4 z_2 \times y_2 \cdot \dot{\mathbf{R}}_4 = -m_4 q_4 x_2 \cdot (q_4 y_2)''_t =$$

$$= -m_4 q_4 x_2 \cdot (\ddot{q}_4 y_2 + 2\dot{q}_4 \dot{y}_2 + q_4 \ddot{y}_2).$$

По формулам (1.18), (1.22) выпишем

$$x_2 \cdot \dot{y}_2 = \epsilon_{zyx} \omega_2^z = -\omega_2^z, \quad x_2 \cdot \ddot{y}_2 = \epsilon_{zyx} \dot{\omega}_2^z + \omega_2^x \omega_2^y = -\dot{\omega}_2^z + \omega_2^x \omega_2^y.$$

Следовательно,

$$M_2^q = -m_4 q_4 (-2\dot{q}_4 \omega_2^z - q_4 \dot{\omega}_2^z + q_4 \omega_2^x \omega_2^y) = -m_4 q_4 (-2\dot{q}_4 \dot{q}_2 - q_4 \ddot{q}_2 + q_4 \omega_2^x \omega_2^y).$$

Используя разложение $y_2 = y_{21}^x x_1 + y_{21}^y y_1 + y_{21}^z z_1 = c_2 y_1 - s_2 x_1$, получим

$$M_1^q = m_4 y_1 \cdot \mathbf{R}_4 \times \dot{\mathbf{R}}_4 = -m_4 y_1 \times (q_4 y_2) \cdot \dot{\mathbf{R}}_4 = -m_4 q_4 y_1 \times (c_2 y_1 - s_2 x_1) \cdot \dot{\mathbf{R}}_4 =$$

$$= m_4 q_4 s_2 z_1 \cdot (q_4 y_2)''_t = m_4 q_4 s_2 z_2 \cdot (\ddot{q}_4 y_2 + 2\dot{q}_4 \dot{y}_2 + q_4 \ddot{y}_2) = m_4 q_4 s_2 (2\dot{q}_4 z_2 \cdot \dot{y}_2 + q_4 z_2 \cdot \ddot{y}_2).$$

По формуле (1.18) выпишем $z_2 \cdot \dot{y}_2 = \epsilon_{zyz} \omega_2^z = \omega_2^x$. По формуле (1.22) выпишем

$$z_2 \cdot \ddot{y}_2 = \epsilon_{zyz} \dot{\omega}_2^z + \omega_2^y \omega_2^z = \dot{\omega}_2^z + \omega_2^y \omega_2^z = \dot{\omega}_2^z + \omega_2^y \dot{q}_2.$$

Следовательно, $M_1^q = m_4 q_4 s_2 [q_4 (\dot{\omega}_2^x + \dot{q}_2 \omega_2^y) + 2\dot{q}_4 \omega_2^x]$.

Выпишем выражения K_j^q . Будем считать, что для всех i имеют место равенства $ССК(i) = ГСК(i)$,

$I_i^x = I_i^z$, т. е. $I_i^b = 0$, $I_i^c = -I_i^a$. Тогда для $j = 3$ по формуле (1.6) с учетом равенств $\omega_3^x = \omega_3^z$,

$u_3 = u_4$ и $x_{33}^y = z_{33}^y = 0$, $x_{43}^y = z_{43}^y = 0$ выпишем

$$K_3^q = y_3 \cdot \sum_{i=3}^4 \dot{\mathbf{K}}_i = \sum_{i=3}^4 [x_{i3}^y (I_i^z \dot{\omega}_i^x + I_i^a \omega_i^y \omega_i^z) + I_i^y y_{i3}^y \dot{\omega}_i^y + z_{i3}^y (I_i^z \dot{\omega}_i^z - I_i^a \omega_i^x \omega_i^y)] =$$

$$= (I_3^y + I_4^y) \dot{\omega}_3^y = I_{34}^y \dot{\omega}_3^y,$$

где $I_{34}^y = I_3^y + I_4^y$.

$$K_2^q = z_2 \cdot \sum_{i=2}^4 \dot{\mathbf{K}}_i = \sum_{i=2}^4 [x_{i2}^z (I_i^z \dot{\omega}_i^x + I_i^a \omega_i^y \omega_i^z) + I_i^y y_{i2}^z \dot{\omega}_i^y + z_{i2}^z (I_i^z \dot{\omega}_i^z - I_i^a \omega_i^x \omega_i^y)] =$$

$$= I_2^z \dot{\omega}_2^z - I_2^a \omega_2^x \omega_2^y + x_{32}^z (I_{34}^z \dot{\omega}_3^x + I_{34}^a \omega_3^y \omega_3^z) + I_{34}^y y_{32}^z \dot{\omega}_3^y + z_{32}^z (I_{34}^z \dot{\omega}_3^z - I_{34}^a \omega_3^x \omega_3^y) =$$

$$= I_2^z \dot{q}_2 - I_2^a \omega_2^x \omega_2^y - s_3 (I_{34}^z \dot{\omega}_3^x + I_{34}^a \omega_3^y \omega_3^z) + c_3 (I_{34}^z \dot{\omega}_3^z - I_{34}^a \omega_3^x \omega_3^y),$$

где $I_{34}^z = I_3^z + I_4^z$, $I_{34}^a = I_3^a + I_4^a = I_3^z + I_4^z - I_3^y - I_4^y$.

$$K_1^q = y_1 \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{\mathbf{K}}_i = I_1^y \dot{q}_1 + \sum_{i=2}^4 [x_{i1}^y (I_i^z \dot{\omega}_i^x + I_i^a \omega_i^y \omega_i^z) + I_i^y y_{i1}^y \dot{\omega}_i^y + z_{i1}^y (I_i^z \dot{\omega}_i^z - I_i^a \omega_i^x \omega_i^y)] =$$

$$= I_1^y \dot{q}_1 + x_{21}^y (I_2^z \dot{\omega}_2^x + I_2^a \omega_2^y \omega_2^z) + I_2^y y_{21}^y \dot{\omega}_2^y + z_{21}^y (I_2^z \dot{\omega}_2^z - I_2^a \omega_2^x \omega_2^y) +$$

$$+ x_{31}^y (I_{34}^z \dot{\omega}_3^x + I_{34}^a \omega_3^y \omega_3^z) + I_{34}^y y_{31}^y \dot{\omega}_3^y + z_{31}^y (I_{34}^z \dot{\omega}_3^z - I_{34}^a \omega_3^x \omega_3^y) =$$

$$= I_1^y \dot{q}_1 + s_2 (I_2^z \dot{\omega}_2^x + I_2^a \dot{q}_2 \omega_2^y) + I_2^y c_2 \dot{\omega}_2^y + x_{31}^y (I_{34}^z \dot{\omega}_3^x + I_{34}^a \omega_3^y \omega_3^z) +$$

$$+ I_{34}^y c_2 \dot{\omega}_3^y + z_{31}^y (I_{34}^z \dot{\omega}_3^z - I_{34}^a \omega_3^x \omega_3^y),$$

так как из второй строки блока, стоящего на пересечении средней колонки нижней полосы табл. 2, имеем $x_{31}^y = s_2 c_3$, $y_{31}^y = c_2$, $z_{31}^y = s_2 s_3$.

Таким образом, первый вид УД МС на рис. 3 представляется следующей системой дифференциальных уравнений, содержащих квазиускорения и квазискорости:

$$\begin{cases} I_1^y \dot{q}_1 + m_4 q_4 s_2 [q_4 (\dot{\omega}_2^x + \dot{q}_2 \omega_2^y) + 2\dot{q}_4 \omega_2^x] + s_2 (I_2^z \dot{\omega}_2^x + I_2^a \dot{q}_2 \omega_2^y) + \\ + I_2^y c_2 \dot{\omega}_2^y + x_{31}^y (I_{34}^z \dot{\omega}_3^x + I_{34}^a \omega_3^y \omega_3^z) + I_{34}^y c_2 \dot{\omega}_3^y + z_{31}^y (I_{34}^z \dot{\omega}_3^z - I_{34}^a \omega_3^x \omega_3^y) = M_1; \\ (I_2^z + m_4 q_4^2) \dot{q}_2 + 2m_4 q_4 \dot{q}_4 \dot{q}_2 - (I_2^a + m_4 q_4^2) \omega_2^x \omega_2^y - \\ - s_3 (I_{34}^z \dot{\omega}_3^x + I_{34}^a \omega_3^y \omega_3^z) + c_3 (I_{34}^z \dot{\omega}_3^z - I_{34}^a \omega_3^x \omega_3^y) + gm_4^q s_2 = M_2; \\ I_{34}^y \dot{\omega}_3^y = M_3; \\ m_4 [\ddot{q}_4 - q_4 (\omega_2^{x2} + \dot{q}_2^2)] - m_{g4} c_2 = F_4. \end{cases}$$

4.2. Вывод МИК в УД МС на рис. 3. В формуле вычисления M_1 имеем:

$$\dot{\Omega}_{12} = (m_4 q_4^2 s_2 + s_2 I_2^z) \dot{\omega}_2^x + I_2^y c_2 \dot{\omega}_2^y, \quad \dot{\Omega}_{13} = I_{34}^z (x_{31}^y \dot{\omega}_3^x + z_{31}^y \dot{\omega}_3^z) + I_{34}^y c_2 \dot{\omega}_3^y.$$

Используя выписанные выражения квазиускорений и НК x_{31}^y , z_{31}^y , получим:

$$\dot{\Omega}_{12} = (m_4 q_4^2 s_2 + s_2 I_2^z) (s_2 \dot{q}_1 + c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) + I_2^y c_2 (c_2 \dot{q}_1 - s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) =$$

$$= [(I_2^z + m_4 q_4^2) s_2^2 + I_2^y c_2^2] \dot{q}_1 + (I_2^z + m_4 q_4^2 - I_2^y) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 =$$

$$= [I_2^y + (I_2^z - I_2^y + m_4 q_4^2) s_2^2] \dot{q}_1 + (I_2^z + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2;$$

$$\begin{aligned}\dot{\Omega}_{13} &= I_{34}^z [s_2 c_3 (c_3 \dot{\omega}_2^x - s_3 \ddot{q}_2 - s_3 \dot{q}_3 \dot{\omega}_2^x - c_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3) + s_2 s_3 (s_3 \dot{\omega}_2^x + c_3 \ddot{q}_2 + c_3 \dot{q}_3 \dot{\omega}_2^x - s_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3)] + \\ &+ I_{34}^y c_2 (\dot{\omega}_2^y + \ddot{q}_3) = I_{34}^y c_2 \ddot{q}_3 + I_{34}^z s_2 \dot{\omega}_2^x + I_{34}^y c_2 \dot{\omega}_2^y - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 = \\ &= I_{34}^y c_2 \ddot{q}_3 + I_{34}^z s_2 (s_2 \ddot{q}_1 + c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) + I_{34}^y c_2 (c_2 \ddot{q}_1 - s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 = \\ &= I_{34}^y c_2 \ddot{q}_3 + (I_{34}^z s_2^2 + I_{34}^y c_2^2) \ddot{q}_1 + (I_{34}^z - I_{34}^y) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 = \\ &= [I_{34}^y + (I_{34}^z - I_{34}^y) s_2^2] \ddot{q}_1 + I_{34}^y c_2 \ddot{q}_3 + I_{34}^z s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3.\end{aligned}$$

Следовательно,

$$\dot{\Omega}_{12} + \dot{\Omega}_{13} = [I_2^y + (I_2^a + m_4 q_4^2) s_2^2 + I_{34}^y + I_{34}^a s_2^2] \ddot{q}_1 + I_{34}^y c_2 \ddot{q}_3 + (I_2^a + I_{34}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3.$$

Таким образом,

$$\begin{aligned}M_1 &= I_1^y \ddot{q}_1 + m_4 q_4 s_2 (q_4 \dot{q}_2 \dot{\omega}_2^y + 2 \dot{q}_4 \dot{\omega}_2^x) + I_2^a s_2 \dot{q}_2 \dot{\omega}_2^y + I_{34}^a x_{31}^y \omega_3^y \omega_3^z - I_{34}^a z_{31}^y \omega_3^x \omega_3^y + \\ &+ [I_2^y + (I_2^a + m_4 q_4^2) s_2^2 + I_{34}^y + I_{34}^a s_2^2] \ddot{q}_1 + I_{34}^y c_2 \ddot{q}_3 + (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 = \\ &= H_{11} \ddot{q}_1 + H_{13} \ddot{q}_3 + h_1,\end{aligned}$$

где $H_{11} = I_1^y + I_2^y + (I_2^a + m_4 q_4^2) s_2^2 + I_{34}^y + I_{34}^a s_2^2 = I_{14}^y + (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2^2$, $H_{13} = I_{34}^y c_2$;

$$h_1 = (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 + (I_2^a + m_4 q_4^2) s_2 \dot{q}_2 \dot{\omega}_2^y + 2 m_4 q_4 s_2 \dot{q}_4 \dot{\omega}_2^x + I_{34}^a (x_{31}^y \omega_3^z - z_{31}^y \omega_3^x) \omega_3^y;$$

$$I_{24}^a = I_2^a + I_{34}^a, I_{14}^y = I_1^y + I_2^y + I_{34}^y.$$

В формуле вычисления M_2 имеем

$$\begin{aligned}\dot{\Omega}_{23} &= I_{34}^z (c_3 \dot{\omega}_2^z - s_3 \dot{\omega}_2^x) = I_{34}^z [c_3 (s_3 \dot{\omega}_2^x + c_3 \ddot{q}_2 + c_3 \dot{q}_3 \dot{\omega}_2^x - s_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3) - \\ &- s_3 (c_3 \dot{\omega}_2^z - s_3 \ddot{q}_2 - s_3 \dot{q}_3 \dot{\omega}_2^z - c_3 \dot{q}_2 \dot{q}_3)] = I_{34}^z (\ddot{q}_2 + \dot{q}_3 \dot{\omega}_2^x).\end{aligned}$$

Следовательно,

$$M_2 = H_{22} \ddot{q}_2 + h_2 + G_2, \text{ где } H_{22} = I_2^z + I_{34}^z + m_4 q_4^2 = I_{24}^z + m_4 q_4^2, I_{24}^z = I_2^z + I_{34}^z$$

$$h_2 = 2 m_4 q_4 \dot{q}_4 \dot{q}_2 + I_{34}^z \dot{q}_3 \dot{\omega}_2^x - (I_2^a + m_4 q_4^2) \dot{\omega}_2^x \dot{\omega}_2^y - I_{34}^a (s_3 \omega_3^z + c_3 \omega_3^x) \omega_3^y, G_2 = g m_4^q s_2.$$

Для формулы вычисления M_3 получим

$$M_3 = I_{34}^y (c_2 \ddot{q}_1 + \ddot{q}_3) + h_3, \text{ где } h_3 = -I_{34}^y s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2.$$

Для формулы вычисления F_4 получим

$$F_4 = m_4 \ddot{q}_4 + h_4 - m_{g4} c_2, \text{ где } h_4 = -m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1^2 - m_4 q_4 \dot{q}_2^2.$$

Таким образом, МИК в УД МС на рис. 3 имеет следующий вид

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} I_{14}^y + (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2^2 & 0 & I_{34}^y c_2 & 0 \\ 0 & I_{24}^z + m_4 q_4^2 & 0 & 0 \\ I_{34}^y c_2 & 0 & I_{34}^y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{pmatrix}.$$

4.3. Выделение ГИС в УД МС на рис. 3. В формуле вычисления h_1 имеем

$$\dot{\Omega}_{13}^2 = I_{34}^a [s_2 c_3 (s_3 \dot{\omega}_2^x + c_3 \dot{q}_2) - s_2 s_3 (c_3 \dot{\omega}_2^x - s_3 \dot{q}_2)] (\dot{\omega}_2^y + \dot{q}_3) = I_{34}^a s_2 \dot{q}_2 (c_2 \dot{q}_1 + \dot{q}_3).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}H_1 &= (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - I_{34}^z s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 + (I_2^a + m_4 q_4^2) s_2 \dot{q}_2 c_2 \dot{q}_1 + 2 m_4 q_4 s_2 \dot{q}_4 s_2 \dot{q}_1 + \\ &+ I_{34}^a s_2 \dot{q}_2 (c_2 \dot{q}_1 + \dot{q}_3) = (I_{24}^a + I_2^a + 2 m_4 q_4^2 + I_{34}^a) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + (I_{34}^a - I_{34}^z) s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \\ &+ 2 m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1 \dot{q}_4 = 2 (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2 m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1 \dot{q}_4 - I_{34}^y s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3.\end{aligned}$$

В формуле вычисления h_2 имеем

$$\begin{aligned}\dot{\Omega}_{23}^2 &= -I_{34}^a (s_3 \omega_3^z + c_3 \omega_3^x) \omega_3^y = -I_{34}^a [s_3 (s_3 \dot{\omega}_2^x + c_3 \dot{q}_2) + c_3 (c_3 \dot{\omega}_2^x - s_3 \dot{q}_2)] (\dot{\omega}_2^y + \dot{q}_3) = \\ &= -I_{34}^a s_2 \dot{q}_1 (c_2 \dot{q}_1 + \dot{q}_3).\end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}H_2 &= 2 m_4 q_4 \dot{q}_2 \dot{q}_4 + I_{34}^z s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_3 - (I_2^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1^2 - I_{34}^a s_2 \dot{q}_1 (c_2 \dot{q}_1 + \dot{q}_3) = \\ &= -(I_2^a + I_{34}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1^2 + (I_{34}^z - I_{34}^a) s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2 m_4 q_4 \dot{q}_2 \dot{q}_4 = \\ &= -(I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1^2 + I_{34}^y s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2 m_4 q_4 \dot{q}_2 \dot{q}_4.\end{aligned}$$

Теперь

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^4 h_i \dot{q}_i &= [2 (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + 2 m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1 \dot{q}_4 - I_{34}^y s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3] \dot{q}_1 + \\ &+ [-(I_{24}^a + m_4 q_4^2) c_2 s_2 \dot{q}_1^2 + I_{34}^y s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2 m_4 q_4 \dot{q}_2 \dot{q}_4] \dot{q}_2 + (-I_{34}^y s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) \dot{q}_3 + \\ &+ (-m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1^2 - m_4 q_4 \dot{q}_2^2) \dot{q}_4 = [(I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1 \dot{q}_4] \dot{q}_1 + \\ &+ (m_4 q_4 \dot{q}_2 \dot{q}_4) \dot{q}_2 + (-I_{34}^y s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2) \dot{q}_3.\end{aligned}$$

Следовательно, элементы вектора инерционных сил в УД МС на рис. 3 вычисляются по формулам:

$$h_1 = (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1 \dot{q}_4 + g_1;$$

$$h_2 = m_4 q_4 \dot{q}_2 \dot{q}_4 + g_2, h_3 = -I_{34}^y s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2, h_4 = g_4 = -m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1^2 - m_4 q_4 \dot{q}_2^2,$$

где $g_1 = (I_{24}^a + m_4 q_4^2) s_2 c_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 + m_4 q_4 s_2^2 \dot{q}_1 \dot{q}_4 - I_{34}^y s_2 \dot{q}_2 \dot{q}_3$;

$$g_2 = -(I_{24}^a + m_4 q_4^2) c_2 s_2 \dot{q}_1^2 + I_{34}^y s_2 \dot{q}_1 \dot{q}_3 + m_4 q_4 \dot{q}_2 \dot{q}_4, g_3 = 0,$$

так как $\sum_{i=1}^4 g_i \dot{q}_i = 0$.

5. Практическое использование полученных результатов

Общие для СТОВ уравнения (1.1), (1.2) позволяют вывести формулы вычисления динамических реакций F_j , M_j , действующих в КП(j), и необходимые, например, для учета трения в КП. Здесь мы продемонстрировали, как использовать уравнения (1.1), (1.2) для выписывания УД МС в квазиускорениях и скоростях без выполнения операций скалярного, векторного и смешанного произведений векторов. Все формальные операции выписывания являются типовыми, и используемые при этом общие формулы являются регулярными. Этот факт позволяет легко автоматизировать процесс выписывания УД. Особенно эффективно использовать для этого регулярные выражения и их метод replace. В качестве входной информации для соответствующего ПО достаточно использовать формальное описание рассматриваемой МС. Альтернативный подход автоматического вывода аналитического вида УД МС связан с использованием известных систем аналитических вычислений.

Переход от первого вида УД МС к УД в ОК осуществляется за два этапа. Результат каждого из них имеет самостоятельное практическое значение. Второй вид УД МС максимально подготовлен для записи формулы Тимофеева

$$\mathbf{Q} = \mathbf{H}[\ddot{\mathbf{q}}_p(t) - \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{B}\mathbf{x}] + \mathbf{h} + \mathbf{G}, \quad (5.1)$$

где $\mathbf{q}_p(t)$ – вектор-столбец программных движений МС, т. е. ОК, заданных как функции времени; \mathbf{A} – постоянная матрица коэффициентов усиления ошибок $\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_p(t)$ управления по ОС; \mathbf{B} – постоянная матрица коэффициентов усиления ошибок $\mathbf{x} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_p(t)$ управления по ОК. Замыкая УД $\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} + \mathbf{G} = \mathbf{Q}$ управлением (5.1), для ошибок управления получают уравнение $\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{x} = 0$, в котором можно подобрать матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} так, чтобы ошибки стремились к нулю.

В третьем виде УД явно выделены ГИС. По определению Тэта их мощность равна нулю [11]. Поэтому при вычислении потребляемой мощности приводов МС ГИС можно отбрасывать, что увеличивает быстродействие вычислений. Это особенно актуально при решении задач оптимального управления в смысле минимума потребляемой мощности, так как минимизируемый функционал упрощается. Выделение ГИС в формулах вычисления элементов h_i вектор-столбца \mathbf{h} позволяет упростить формулу (5.1). Действительно, если в формуле (5.1) отбросить ГИС, то они появятся в левой части уравнений для ошибок управления. Но добавление ГИС может обеспечить устойчивость решения, т. е. в нашем случае увеличить запас устойчивости стремления ошибки к нулю. Вопрос как и на сколько нуждается в отдельном исследовании.

В случае ручного выписывания УД важно их верифицировать, т. е. доказать отсутствие в них ошибок. Для частичной верификации можно использовать формулы вычисления элементов МИК, которая должна быть симметричной. Для полной верификации аналитического вида УД мы численно решали первую задачу динамики МС на основе третьего вида ее УД и путем использования JS-функции СФСТОВ, код которой приведен в статье [14]. Совпадение результатов решения для различных значений ОК, ОС и ОУ указывает на отсутствие ошибок в аналитическом виде УД.

Заключение

В статье описан формализм решения первой задачи динамики МС, т. е. вычисления движущих сил и моментов сил по заданным ОК $q_i(t)$, ОС $\dot{q}_i(t)$ и ОУ $\ddot{q}_i(t)$. Для этого предложены общие формулы и продемонстрировано их использование на конкретных примерах МС. Для решения первой задачи динамики МС можно использовать любой из трех видов УД. Все они короткие (не громоздкие) и простые. Для решения второй задачи динамики МС, т. е. решения задачи Коши методом построения степенных рядов времени [15–17], рекомендуется использовать второй вид, так как в нем явно выражена МИК. Для решения задачи управления программным движением

тел МС по формуле (5.1) рекомендуется третий вид УД, так как в нем выделены ГИС, которые можно не учитывать в формуле (5.1), что уменьшает такт неуправляемости МС и может увеличить запас устойчивости. В целом заявленная тема статьи раскрыта и указаны пути решения проблемы громоздкости УД МС.

Список литературы

1. Elshabasy M.M.Y.B., Mohamed K.T., Ata A.A. Power optimization of planar redundant manipulator moving along constrained-end trajectory using hybrid techniques // *Alexandria Engineering Journal*. 2017. Vol. 56, iss. 4. P. 439–447. doi: 10.1016/j.aej.2017.01.040
2. Hoovsky A., Pitel J., Zideka K., Tothova M., Sarosi J., Cveticanin L. Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot arm with pneumatic muscles // *Mechanism and Machine Theory*. 2016. № 103. P. 98–116. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.04.013
3. Korayem M.H., Shafei A.M., Shafei H.R. Dynamic modeling of nonholonomic wheeled mobile manipulators with elastic joints using recursive Gibbs–Appell formulation // *Scientia Iranica*. 2012. Vol. 19, iss. 4. P. 1092–1104. doi: 10.1016/j.scient.2012.05.001
4. Shala A., Likaj R., Bruqi M., Bajrami X. Propulsion Effect Analysis of 3Dof Robot under Gravity // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 206–212. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.359
5. Sadati S.M.H., Naghibi S.E., Naraghi M. An Automatic Algorithm to Derive Linear Vector Form of Lagrangian Equation of Motion with Collision and Constraint // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 76. P. 217–222. doi: 10.1016/j.procs.2015.12.345
6. Fontes J.V., da Silva M.M. On the dynamic performance of parallel kinematic manipulators with actuation and kinematic redundancies // *Mechanism and Machine Theory*. 2016. Vol. 103. P. 148–166. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.004
7. Amin A.T.M., Rahim A.H.A., Low C.Y. Adaptive controller algorithm for 2-DOF humanoid robot arm // *Procedia Technology*. 2014. Vol. 15. P. 765–774.
8. Lewis F.L., Dawson D.M., Abdallah C.T. *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. Marcel Dekker, Inc., New York, 2004. 614 p.
9. Телегин А.И. Синтез систем твердых тел с заданными свойствами. Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1996. 174 с.
10. Телегин А.И. Динамическая развязка систем тел с замкнутыми ветвями // *Изв. РАН. МТТ*, 1999. № 2. С. 37–45.
11. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961. 824 с.
12. 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
13. Телегин А.И. Уравнения математических моделей механических систем. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. 181 с.
14. 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
15. Фильчаков П.Ф. Численные и графические методы прикладной математики. Киев: Наукова думка, 1970. 792 с.
16. Телегин А.И. Алгоритмы вывода уравнений динамики систем твердых тел и интегрирование этих уравнений методом построения степенных рядов на ЭВМ // *Механика и прикладная математика. Труды Всесоюзной конференции «Современные проблемы информатики, вычислительной техники и автоматизации»*. Тула, 1989. С. 106–114.
17. Телегин А.И. Математическое обеспечение алгоритмов вывода уравнений динамики систем тел с одной открытой ветвью на плоскости и их интегрирование при помощи степенных рядов // *Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение*, 1995. № 1. С. 55–61.

References

1. Elshabasy M.M.Y.B., Mohamed K.T., Ata A.A. Power optimization of planar redundant manipulator moving along constrained-end trajectory using hybrid. *Alexandria Engineering Journal*. 2017;56(4):439–447. doi: 10.1016/j.aej.2017.01.040.

2. Hošovský A., Piteř J., Židek K., Tóthová M., Sárosi J., Cveticanin L. Dynamic characterization and simulation of two-link soft robot. *Mechanism and Machine Theory*. 2016;(103):98–116. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.04.013.
3. Korayem M.H., Shafei A.M., Shafei H.R. Dynamic modeling of nonholonomic wheeled mobile manipulators with elastic joints using recursive Gibbs–Appell formulation. *Scientia Iranica*. 2012;19(4):1092–1104. doi: 10.1016/j.scient.2012.05.001.
4. Shala A., Likaj R., Bruqi M., Bajrami X. Propulsion Effect Analysis of 3Dof Robot under Gravity. *Procedia Engineering*. 2015;100:206–212.
5. Sadati S.M.H., Naghibi S.E., Naraghi M. An Automatic Algorithm to Derive Linear Vector Form of Lagrangian Equation of Motion with Collision and Constraint. *Procedia Computer Science*. 2015;76:217–222. doi: 10.1016/j.procs.2015.12.345.
6. Fontes J.V., da Silva M.M. On the dynamic performance of parallel kinematic manipulators with actuation and kinematic redundancies. *Mechanism and Machine Theory*. 2016;103:148–166. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.05.004.
7. Amin A.T.M., Rahim A.H.A., Low C.Y. Adaptive controller algorithm for 2-DOF humanoid robot arm. *Procedia Technology*. 2014;15:765–774.
8. Lewis F.L., Dawson D.M., Abdallah C.T. *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. Marcel Dekker. Inc., New York; 2004. 614 p.
9. Telegin A.I. *Sintez sistem tverdykh tel s zadannymi svoystvami* [Synthesis of solid systems with specified properties]. Chelyabinsk: ChSTU Publ.; 1996. 174 p. (In Russ.)
10. Telegin A.I. [Dynamic decoupling of body systems with closed branches]. *Izvestiya RAN. MTT*. 1999;(2):37–45. (In Russ.)
11. Lur'e A.I. *Analiticheskaya mekhanika* [Analytical mechanics]. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1961. 824 p. (In Russ.)
12. 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, Radioelectronics*. 2021;21(3):47–58. (In Russ). doi: 10.14529/ctcr210305.
13. Telegin A.I. *Urvneniya matematicheskikh modelei mekhanicheskikh sistem* [Equations of mathematical models of mechanical systems]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ.; 1999. 181 p. (In Russ.)
14. Telegin A.I. [Formalism of writing out of manipulators dynamic]. *Bulletin of the South Ural State University Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics*. 2021;21(4):52–68. (In Russ). doi: 10.14529/ctcr210405.
15. Fil'chakov P.F. *Chislennye i graficheskie metody prikladnoi matematiki* [Numerical and graphical methods of applied mathematics] Kiev: Naukova dumka Publ.; 1970. 792 p. (In Russ.)
16. Telegin A.I. [Algorithms of derivation of the equations of dynamics of systems of solids and integration of these equations by the method of construction of power series on the computer]. In: *Mekhanika i prikladnaya matematika. Trudy Vsesoyuznoi konferentsii "Sovremennye problemy informatiki, vychislitel'noi tekhniki i avtomatizatsii"*. Tula; 1989. P. 106–114. (In Russ.)
17. Telegin A.I. [Mathematical support of algorithms for deriving the equations of dynamics of body systems with one open branch in the plane and their integration by means of power series]. *Vestnik MGTU. Ser. Priborostroenie*. 1995;(1):55–61. (In Russ.)

Информация об авторах

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

Information about the authors

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; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 21.12.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 17.01.2022.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Лилия Юрьевна Костылева¹, Олег Витальевич Логиновский²,
Евгения Анатольевна Рец³, Игорь Михайлович Ячиков⁴

^{1, 2, 3, 4} Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

¹ kostylevali@susu.ru

² loginovskii@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

³ retcea@susu.ru

⁴ iachikovim@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1562-7506>

Аннотация. Выявление дефектов расслоения в изделиях из многослойных биметаллических материалов является актуальной задачей. Для ее решения широко применяют различные методы неразрушающего контроля, в том числе метод активного теплового контроля. Его суть заключается в дистанционной регистрации, визуализации и анализе тепловых (температурных) полей объектов, которые зависят от теплофизических, геометрических характеристик, параметров тепловой нагрузки и особенностей внутренней структуры объекта. Дефекты внутренней структуры вызывают появление аномальных температурных зон на поверхности объекта, анализ которых позволяет судить о наличии изменений в материале в целом или на отдельных участках. Понять, есть ли дефект под аномальным участком и каковы его параметры, можно при наличии адекватной математической модели, описывающей зависимость результатов контроля от свойств объекта и выбранных технологических режимов. Такая модель является неотъемлемой составляющей существующих систем теплового контроля. Для одного и того же объекта или процесса может быть составлено некоторое множество математических моделей, отличающихся числом учитываемых факторов, принятых допущений, полнотой и точностью описания состояния объекта или условий протекания процесса. Набор факторов определяется целью проводимого исследования, при этом для однозначного определения модели теплового состояния необходимо описать геометрические характеристики, теплофизические свойства материала, условия теплообмена и характеристики источников тепла. **Цель исследования:** анализ существующих математических моделей для исследуемого объекта – многослойной биметаллической пластины с дефектами в виде плоских воздушных промежутков между наружными и внутренними слоями, выявление общих подходов к моделированию процессов теплового контроля многослойных объектов. **Материалы и методы.** Определена структура математической модели теплового состояния объекта. Выполнен аналитический обзор существующих математических моделей теплового контроля многослойных объектов. **Результаты.** Сформулированы требования, допущения и ограничения для математической модели теплового контроля многослойной биметаллической пластины с дефектами расслоения. **Заключение.** На основе рассмотренных подходов к математическому моделированию теплового состояния многослойных объектов с идеальным контактом слоев и дефектами расслоения определены необходимые факторы для разработки модели процессов активного теплового контроля исследуемых объектов.

Ключевые слова: биметаллы, активный тепловой неразрушающий контроль, математическая модель, дефект соединения между слоями металлов, дефектометрия, дефектоскопия

Для цитирования: Возможности использования математических моделей для теплового контроля дефектов многослойных биметаллических пластин / Л.Ю. Костылева, О.В. Логиновский, Е.А. Рец, И.М. Ячиков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 53–64. doi: 10.14529/ctcr220104.

POSSIBILITIES OF USING MATHEMATICAL MODELS FOR THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF DEFECTS IN MULTILAYER BIMETALLIC PLATES

Liliya Yu. Kostyleva¹, Oleg V. Loginovskiy², Evgeniya A. Retc³, Igor M. Yachikov⁴

^{1, 2, 3, 4} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ kostylevali@susu.ru

² loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

³ retcea@susu.ru

⁴ iachikovim@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1562-7506>

Abstract. There is an actual task of delamination detection in multilayer bimetallic materials. Various methods of nondestructive testing (NDT) are used to solve it, including the method of transient thermal NDT. This method consists in remote registration, visualization and analysis of thermal (temperature) fields, which depend on thermophysical and geometric characteristics, thermal effect capacity and internal structure features of the object. The internal structure defects cause the appearance of abnormal temperature zones on the object surface. Their analysis allows us to judge the presence of changes in the material as a whole or in individual areas. It is possible to understand whether there is a defect under the anomalous site, and what its parameters are, if there is an adequate mathematical model that theoretically describes the dependence of the measuring results on the properties of the object and the selected technological modes. This model is a significant component of thermal NDT systems. For the same object or process, a certain set of mathematical models can be compiled, differing in the number of factors taken into account, the assumptions made, the completeness and accuracy of the description of the state of the object or the conditions of the process. The set of factors is determined by the purpose of the study, and in order to unambiguously determine the model of the thermal state, it is necessary to describe the characteristics of the object (geometric shape and thermophysical characteristics of the material) and the heat exchange process (characteristics of heat sources, initial and boundary conditions). **Aim.** To analyze the existing mathematical models for the research object – a multilayer bimetallic plate with delaminations between the outer and inner layers, and to identify common approaches to modeling the processes of thermal NDT of multilayer objects. **Materials and methods.** The structure of the mathematical model of the thermal state of the object is determined. An analytical review of mathematical models of thermal NDT of multilayer objects is performed. **Results.** The requirements, assumptions and limitations for a mathematical model of thermal NDT of a multilayer bimetallic plate with delamination defects are formulated. **Conclusion.** On the basis of the considered approaches to the mathematical modeling of the thermal state of multilayer objects with ideal layers contact and delamination defects, the necessary factors for the development of a model for the transient thermal NDT processes of the studied objects are determined.

Keywords: bimetal, transient thermal non-destructive testing, mathematical model, defect in the connection between metal layers, defectometry, flaw detection

For citation: Kostyleva L.Yu., Loginovskiy O.V., Retc E.A., Yachikov I.M. Possibilities of using mathematical models for thermal nondestructive testing of defects in multilayer bimetallic plates. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(1):53–64. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220104.

Введение

Для многослойных биметаллических материалов актуальной задачей является выявление дефектов расслоения. С этой целью широко применяют различные методы неразрушающего контроля, наименее затратным из которых можно считать сравнительно простой и доступный метод активного теплового контроля. Его суть заключается в дистанционной регистрации, визуализации и анализе тепловых (температурных) полей объектов. Температура поверхности объекта неоднородна под влиянием теплофизических, геометрических характеристик, параметров тепловой нагрузки и особенностей внутренней структуры объекта. Дефекты внутренней структуры вызывают появление аномальных температурных зон на поверхности объекта, анализ которых позволяет судить о наличии неоднородностей в материале в целом или на отдельных участках.

В.П. Вавилов и В.В. Ширяев [1] показали, что экстремумы производных от температуры по любой из поверхностных координат dT/dx в точности соответствуют проекциям границ внутренних дефектов на контролируемую поверхность. На рис. 1 показан пример расчетного профиля, полученного для дефекта радиусом $r_d = 1$ мм на глубине 0,5 мм и высоте дефекта 0,2 мм, в изделии из алюминия при импульсном воздействии теплового потока 1 МВт/м^2 . Причем для алюминия точные оценки размеров дефекта имеют место при малых временах (τ_1) наблюдения (менее 0,01 с), в то время как при больших временах (τ_2) происходит существенное расплывание температурного отпечатка.

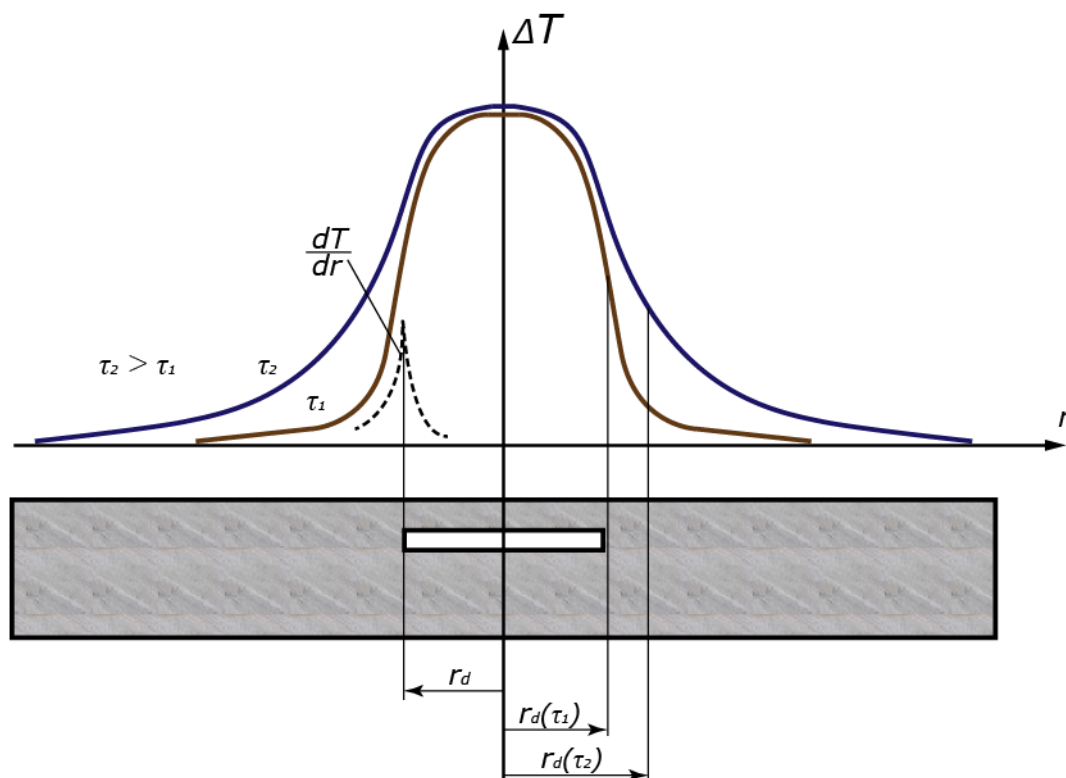


Рис. 1. Нормализованные профили температуры над воздушным дефектом в алюминиевой пластине
Fig.1. Normalized temperature profiles over an air defect in an aluminum plate

Тепловой контроль (ТК) позволяет выявить различные виды дефектов: трещины, расслоения в местах сварки или склейки, поры, пустоты и раковины, нарушения изоляции, наличие посторонних включений и примесей.

Опыт исследований и практического применения ТК показывает его пригодность для контроля изделий из металлов, пластмасс и полимеров, биметаллов и композитных материалов с различными формами и качеством поверхности. Можно проводить контроль объектов без вывода их из эксплуатации или производственного процесса, используя при этом собственное тепловое излучение объекта или внешний источник тепловой стимуляции [1].

При анализе записи температурного поля (например, в виде термограммы) можно выявить участки объекта, различающиеся по температуре. Однако понять, есть ли дефект под аномальным участком и каковы его параметры, можно лишь при наличии адекватной математической модели, теоретически описывающей зависимость результатов контроля от свойств объекта и выбранных технологических режимов. В ходе построения модели расчетные результаты сравниваются с результатами натуральных экспериментов, полученных при разрушении образцов. В результате обработки накопленной информации о тепловых полях постепенно формируются зависимости, позволяющие по результатам обработки термограмм не только найти дефект, но и определить его тип, геометрические параметры, например глубину залегания и пр. Таким образом, математическая модель объекта теплового контроля является неотъемлемой составляющей систем ТК.

Для одного и того же объекта или процесса может быть составлено некоторое множество математических моделей, отличающихся числом учитываемых факторов, принятых допущений, полнотой и точностью описания состояния объекта или условий протекания процесса. Одно из главных требований к модели состоит в необходимости учета всех основных факторов и взаимосвязей, существенно влияющих на рассматриваемый процесс, и исключения второстепенных факторов и связей. Набор факторов определяется достижением цели проводимого исследования, при этом всегда стремятся к упрощению модели для удобства работы с ней и снижения затрат вычислительного времени при ее практическом применении. При этом простые модели должны быть адекватными поставленной цели и должны быть теоретически обоснованы.

На практике используются стационарные и нестационарные (динамические), линейные и нелинейные, одномерные и многомерные модели. Математические модели теплообмена в сложных технических системах строятся с использованием комбинации моделей теплообмена в отдельных элементах системы. Разбиение системы на элементы (с точки зрения математического моделирования) определяется как способом внешнего воздействия, так и конструктивным исполнением системы [2].

Для однозначного определения модели теплового состояния необходимо описать ряд характеристик объекта и процесса теплообмена. К характеристикам объекта относятся его форма и материал. Геометрическую форму тела сводят к одной из шести стандартных форм (полуограниченное тело, неограниченная пластина, сплошной или полый цилиндр, сплошной или полый шар) или их комбинации. Материал объекта определяется при помощи теплофизических характеристик (ТФХ). К ним относят коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость C и плотность ρ . Также используются динамические характеристики – коэффициент температуропроводности $a = \lambda / (C\rho)$ и коэффициент тепловой активности, или тепловой инерции $e = \sqrt{\lambda C\rho}$, являющийся характеристикой теплового контакта.

При решении краевой задачи теплопроводности важным является правильное задание начальных и граничных условий, а также характеристик внешних источников тепла. Для моделируемого объекта иногда приходится учитывать влияние внутренних источников тепла. По характеру действия источники бывают точечные, линейные, плоские и объемные, мгновенного или непрерывного действия, постоянные или переменные во времени, а также подвижные и неподвижные. Чаще всего из условий однозначности требуется определить характеристики теплового состояния, что относится к прямым задачам теплопроводности. Для выявления дефектов внутренней структуры мы анализируем появление аномальной температурной зоны на поверхности тела и по ним оцениваем параметры размеров дефекта, в этом случае решается обратная задача теплопроводности [3].

1. Объект исследования

Для разработки модели теплового контроля многослойного биметаллического материала с дефектами опишем свойства объекта и условия проведения измерений.

Рассматриваемый объект представляет собой трехслойную пластину, один из наружных слоев которой изготовлен из аустенитной нержавеющей стали ($1, h_1$), другой – из аустенитной либо ферромагнитной нержавеющей стали ($3, h_3$), а между ними находится теплораспределительный слой ($2, h_2$) из алюминия или меди (рис. 2). Понятно, что основные теплофизические характеристики претерпевают существенные изменения вдоль направления теплового потока $q_{изл}$ (по нормали к слоям).

Дефекты расслоения могут присутствовать в местах контакта наружных слоев изделия с внутренним теплораспределительным слоем с одной или другой его стороны. Не исключено наличие двух дефектов, расположенных один над другим, различного размера, с частичным или полным перекрытием. Поперечные размеры дефектов (d, δ) ограничены и в несколько раз меньше размера пластин.

При обнаружении скрытых дефектов в большинстве случаев используют процедуры импульсного активного ТК, поскольку в стационарном режиме сигналы от дефектов нивелируются из-за выравнивания температуры по объему тела, а в условиях теплообмена с окружающей средой разность температур среды и тела не позволяет достичь достаточного значения амплитуды сигнала.

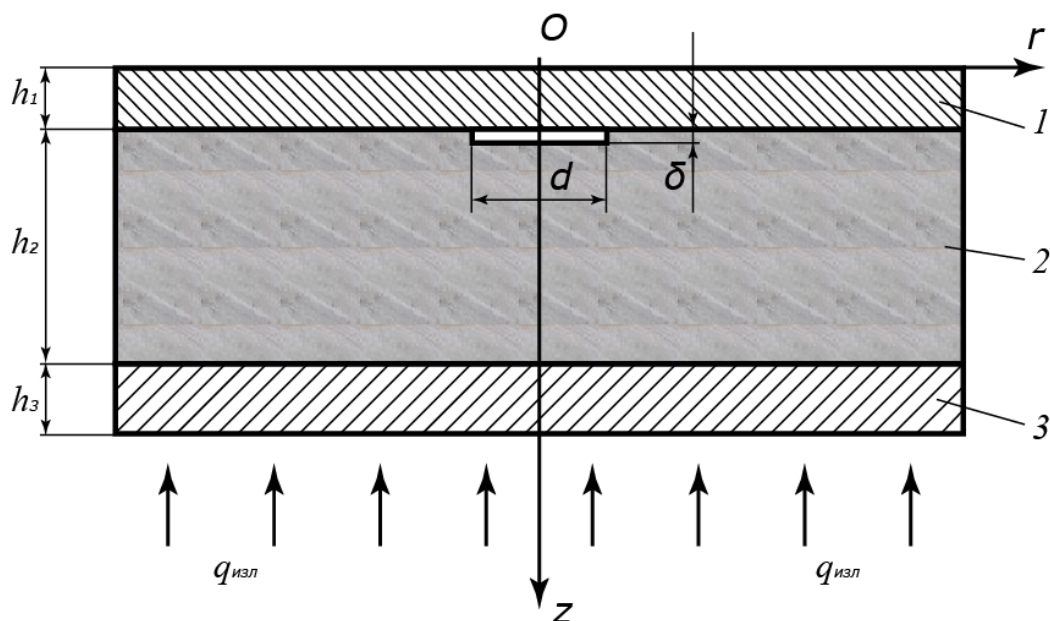


Рис. 2. Многослойная пластина с цилиндрическим дефектом, ее основные размеры
Fig. 2. Multilayer plate with a cylindrical delamination, its main dimensions

В активных процедурах ТК мощность потока нагрева обычно значительно превышает мощность встречного потока теплоотдачи от тела за счет конвекции и излучения, поэтому теплообмен со стороны источника теплового нагружения можно представить как адиабатический и свести модель к более простому виду [1].

Прямой задачей является определение температурного поля с передней (нагреваемой) и обратной стороны многослойной пластины как в бездефектной области, так и с учетом различных возможных случаев расположения дефектов. При решении обратной задачи необходимо определить размеры дефектов и глубину их залегания, а также толщину и теплофизические характеристики (материал) теплораспределительного слоя.

2. Основные допущения и ограничения математической модели теплового состояния многослойной пластины

На основе проведенного анализа можно сформулировать требования и допущения к математической модели исследуемого объекта, показанного на рис. 2.

Для обеспечения возможности определения поперечных размеров дефектов необходимо уходить от одномерной постановки задачи.

В начальный момент времени считаем, что температура во всех точках расчетной области равна температуре окружающей среды.

Процесс нагрева должен соответствовать условиям проведения импульсного активного ТК. При этом влияние конвективной составляющей теплового потока со стороны нагрева можно учитывать только для периода остывания образца. Для выявления дефектов с обеих сторон теплораспределительного слоя модель должна учитывать условия проведения односторонней и двусторонней процедур ТК.

Контакт между отдельными слоями пластины полагаем идеальным, то есть на границе раздела выполняется равенство температур и тепловых потоков. Передачей тепла в цилиндрическом воздушном зазоре можно пренебречь.

Таким образом, при моделировании теплового состояния многослойной пластины был принят ряд допущений и ограничений.

1. Для температурного поля имеет место осевая симметрия ($dT/d\varphi = 0$), считаем, что температурное поле нестационарное и двухмерное – $T(r, z, \tau)$.

2. Все пластины имеют форму цилиндра радиуса R , причем $R \gg h_i$.

3. Передачей тепла в цилиндрическом воздушном зазоре можно пренебречь.

4. Отсутствует термическое сопротивление в контакте стальной и алюминиевой пластин. Считаем, что контакт между отдельными слоями является идеальным, то есть на границе раздела выполняется равенство температур и тепловых потоков [4].

Полученные результаты применены авторами при разработке модели для трехслойной стале-алюминиевой пластины с одним дефектом в виде цилиндрического воздушного зазора.

3. Выбор математической модели

Большинство моделей теплопроводности твердых тел базируется на дифференциальном уравнении теплопроводности параболического типа различной размерности в декартовых, цилиндрических или сферических координатах [1, 3, 5].

Большое количество аналитических решений одномерных задач нагрева (охлаждения) неограниченной пластины для расчета температур в бездефектных областях можно найти в классической литературе по теории теплопроводности [6, 7].

Одномерные модели используют при разработке систем теплозащиты, основываясь на недопустимости большой глубины прогрева теплозащитной конструкции при взаимодействии с внешней средой [2, 8]. Хорошо систематизированы классические решения для однослойной пластины в различных условиях нагрева (равномерно-распределенным тепловым потоком в виде непрерывного стационарного потока, прямоугольного теплового импульса, мгновенного импульса Дирака, а также тепловых волн) [1, 3]. При переходе к многослойным объектам применяют принцип суперпозиции [2, 3].

Запись граничных условий зависит от применяемой методики теплового контроля. В общем случае при неадиабатическом теплообмене на нагреваемой поверхности объекта контроля имеет место смешанное граничное условие II и III рода, которое выражает условие баланса трех потоков на поверхности изделия: потока нагрева, потока, уходящего в глубину объекта за счет теплопроводности, и потока теплообмена с окружающей средой за счет конвекции и излучения. При отсутствии теплообмена на поверхности (мощность потока конвекции и излучения много меньше падающего на поверхность теплового потока) условия приближаются к адиабатическим. В ТК такие условия возникают при активном тепловом контроле с импульсным нагревом и малыми временами наблюдения [9].

В многослойных объектах при переходе через границу слоев выполняются граничные условия IV рода – условия неразрывности теплового потока и температуры на границе слоев:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}; \quad T_i = T_{i+1}. \quad (1)$$

Задача усложняется при моделировании многослойных объектов с дефектами расслоения – плоскими воздушными промежутками между слоями. Теплопередача в таких дефектах в общем случае происходит путем теплопроводности, конвекции и излучения. Однако анализ составляющих теплового потока, проведенный в [1], показывает, что в тонких дефектах (до 250 мкм) мощность потока теплопроводности существенно превышает величину потоков конвекции и излучения, тогда как с ростом толщины дефекта при его размерах 5–25 мм в нем может развиваться конвекция (при сохранении низкой мощности потока излучения). Излучение становится существенным при разнице температур между границами дефекта более 500 °С.

На границах раздела слоев рассматривают два типа ГУ. Дополнительные условия неразрывности (ГУ IV рода) формулируют при прохождении границы дефекта и основного материала. При этом распределение температуры зависит в том числе от теплоемкости слоя, поэтому такие дефекты называют емкостными. Если теплоемкостью дефектного слоя ($i+1$) толщиной l_{i+1} можно пренебречь, то его основной характеристикой становится тепловое сопротивление R_{i+1} , и соответствующие дефекты называют резистивными. На границах резистивных дефектов температура изменяется скачкообразно, а тепловой поток остается неразрывным:

$$T_{i+1} - T_i = R_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}; \quad R_{i+1} = \frac{l_{i+1}}{\lambda_{i+1}}; \quad (2)$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z}. \quad (3)$$

Рассмотренные зависимости и допущения реализованы в модели односторонней процедуры теплового контроля трехслойной пластины при нагреве импульсом Дирака [10]. Модель отличается тем, что внутренний слой поочередно рассматривается как слой с идеальным контактом либо как резистивный дефект между двумя слоями. Пренебрежение теплоотдачей на наружных поверхностях пластины позволяет авторам получить аналитическое решение, пригодное для дальнейшего использования в обратных задачах тепловой дефектометрии.

Трехслойная одномерная модель неограниченной пластины в неадиабатических условиях предложена для решения различных задач теплового контроля (многослойное изделие, покрытие на подложке и др.). В данной модели средний слой поочередно рассматривается либо как емкостный дефект, либо в качестве связующего материала. Модель основана на одномерном дифференциальном уравнении теплопроводности параболического типа. Граничные условия учитывают теплоотдачу на нагреваемой и обратной поверхности пластины и неразрывность тепловых потоков и температуры на границах слоев.

Авторы [1] приводят достаточно сложное аналитическое решение задачи нагрева объекта и отмечают, что расчет подобных задач для неадиабатических пластин с числом слоев более трех в аналитическом виде теоретически возможен, но практически весьма трудоемок вследствие громоздкости результатов преобразований, и в этом случае чаще применяют численные методы. При этом аналитические модели можно использовать для оценки точности численных решений в дефектных областях, для которых классические решения [6, 7] не применяют.

Также отмечено, что при наличии в теле нескольких тепловых барьеров (зон контакта различных материалов и дефектов) односторонним методом теплового контроля удастся исследовать не более 2–3 барьеров, наиболее близко расположенных к поверхности нагрева. Для выявления глубоко залегающих дефектов предложено применять двухстороннюю процедуру теплового контроля (расположение источника нагрева и регистрирующих устройств с разных сторон контролируемого объекта) и соответствующим образом модифицировать математическую модель.

Для моделирования нагрева двухслойного биметаллического материала с идеальным контактом между слоями подвижным точечным источником тепла постоянной плотности разработана одномерная модель температурного поля [4]. На ее основе выполнена оценка требуемых энергетических параметров излучения источника тепла и определены толщины слоев и теплофизические характеристики биметалла.

Одномерная модель ТК многослойного объекта с термическим сопротивлением между слоями применяется для решения задачи контроля пористости металлического каркаса и измерения толщины заполняющего его фторопластового слоя [11].

При использовании одномерных моделей для решения задач дефектометрии можно определить глубину залегания дефекта и величину его раскрытия («толщину»), но невозможно определить поперечные размеры (протяженность). Многомерные модели позволяют учитывать рассеяние тепла в материале объекта вокруг дефектов и более корректно определять температурный сигнал над дефектом. При исследовании двумерной модели объекта с дисковидным дефектом для различных материалов [1] определены критические значения отношения радиуса дефекта к глубине залегания, для которых амплитуда сигнала достигает возможного максимума.

При переходе от одномерной постановки задачи к двумерной усложняются уравнения, описывающие процессы внутри материала. В качестве примера можно привести моделирование процессов активного ТК для определения дефектов в многослойных пластинах из углепластика. В первой части [12] представлена одномерная модель многослойной пластины с дефектами, для которой предложено аналитическое решение. Во второй части [13] выполнен переход к двумерной модели и используется численное решение обратной задачи тепловой дефектометрии (определение размеров и глубины залегания дефекта) с точностью порядка 10 %.

В зависимости от анализируемой задачи дифференциальное уравнение теплопроводности может быть записано в декартовых, цилиндрических или сферических координатах. Разнообразные примеры двумерных и трехмерных моделей для различных объектов ТК приведены в [1, 5].

Для одномерного и двумерного моделирования нагрева многослойных адиабатических пластин разработан метод «теплового четырехполюсника» [14, 15], согласно которому решения

уравнения теплопроводности выражаются в виде линейных матричных связей между векторами температуры и тепловых потоков на границах многослойной системы, что позволяет получить решения, структура которых не зависит от граничных условий.

С применением метода четырехполосника разработана двумерная модель сочетания дефектов, расположенных один над другим в различных слоях углепластика [16]. Показано, что сигнал от двух тонких дефектов ведет себя иным образом, нежели сигнал от одного дефекта двойной толщины. Суммарное температурное распределение $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau)$ над группой малоразмерных дефектов может быть представлено как суперпозиция сигналов от каждого дефекта как в пространстве, так и во времени, $\Delta T_{\Sigma}(x, y, \tau) = \Sigma \Delta T_i(x, y, \tau)$.

Обобщенная трехмерная модель теплового неразрушающего контроля многослойных объектов с неоднородностями предложена для оценки потерь в ограждающих конструкциях, обнаружения дефектов в металлопрокате в ходе технологического процесса, диагностики состояния изоляционного покрытия, швов и стенок труб [17, 18]. Модель основана на нестационарном уравнении теплопроводности в декартовых координатах и учитывает возможность присутствия внутреннего объемного источника тепла. Дефекты моделируются при помощи условий неидеального теплового контакта. Полученные зависимости применяются для расчета значений теоретических температур. Авторами данного способа разработан также метод решения обратной задачи для определения коэффициентов теплопроводности слоев материала контролируемого объекта и параметров геометрии дефектов [19].

Модели для многослойных пластин с дефектами расслоения весьма разнообразны, но при этом существуют общие подходы к их разработке. Набор факторов, ограничений и допущений определяется главным образом целью проводимого исследования, при этом всегда стремятся к упрощению модели для удобства ее практического применения.

С учетом сформулированных допущений будем полагать, что распределение температуры в двух стальных пластинах и алюминиевой пластине описывается уравнением теплопроводности ($\tau > 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$) (см. рис. 2):

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номер слоя; τ – время; $T(r, z, \tau)$ – температура, $a_i = \lambda_i / (c_i \rho_i)$ – коэффициент температуропроводности; λ_i, ρ_i, c_i – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость металлов.

Индекс 1 соответствует стали при $0 \leq z \leq h_1$; индекс 2 – алюминию при $h_1 \leq z \leq (h_1 + h_2)$; индекс 3 – стали при $(h_1 + h_2) \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$.

Для решения дифференциального уравнения (4) его необходимо дополнить краевыми условиями.

В начальный момент времени считаем, что температура во всех точках расчетной области равна температуре окружающей среды (для $0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3), 0 \leq r \leq R$):

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (5)$$

Граничные условия (ГУ)

На оси цилиндра имеем условие осевой симметрии (для $r = 0, 0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$)

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

На боковой стенке многослойной цилиндрической пластины из допущения 2 имеем (для $r = R, 0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$)

$$\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

На верхней стенке I пластины

Для ($0 < r = R, z = 0$) в период нагрева пластины имеем $0 < \tau \leq \tau_1$ граничное условие 2-го рода

$$q_{\text{изл}} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (8)$$

при ее остывании $\tau_1 < \tau \leq (\tau_1 + \tau_2)$ граничное условие 3-го рода

$$\alpha_{\text{окр}}(T_1 - t_{\text{окр}}) = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (9)$$

где $q_{\text{изл}}$ – тепловой поток нагрева пластины путем теплового излучения; $\alpha_{\text{окр}}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи (излучением и конвекцией) от внешней поверхности стенки, имеющей температуру T_1 , в окружающую среду с температурой $t_{\text{окр}}$.

Заключение

Рассмотрена структура математической модели теплового состояния объекта ТК. Приведено описание объекта исследования – многослойной биметаллической пластины с дефектами расслоения и процесса проведения теплового контроля. Рассмотрены математические модели подобных объектов, выполнен анализ существующих подходов к их разработке. На основе проведенного анализа сформулированы требования и допущения для математической модели исследуемого объекта и приведена математическая модель импульсного нагрева и остывания многослойной пластины при наличии дефекта расслоения.

Список литературы

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: науч. изд. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
2. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Идентификация математических моделей сложного теплообмена: монография. М.: Изд-во МАИ, 1999. 268 с.
3. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 349 с.
4. Пудовкин А.П., Чернышов В.Н., Плужников Ю.В., Колмаков А.В. Метод бесконтактного неразрушающего контроля слоев двухслойных изделий и анализ теплофизических процессов в биметаллах // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8, № 2. С. 190–200.
5. Ячиков И.М., Логунова О.С., Портнова И.В. Математическое моделирование теплофизических процессов. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 175 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
8. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена. М.: Янус-К, 2009. 298 с.
9. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing // Wiley series in microwave and optical engineering. New York: John Wiley & Sons, 2001. 682 p.
10. Balageas D., Krapez J.-C., Cielo P. Pulsed Photothermal Modeling of Layered Materials // Journal of Applied Physics. 1986. Vol. 59. P. 348–357. URL: https://www.researchgate.net/publication/224507624_Pulsed_Photothermal_Modeling_of_Layered_Materials (дата обращения: 05.12.2021). doi: 10.1063/1.336690.
11. Способ непрерывного контроля толщины слоев и пористости металлического каркаса четырехслойного металлофторопластового ленточного материала: пат. 2290604 Российская Федерация / Ю.В. Плужников, А.В. Колмаков, А.П. Пудовкин [и др.]. № 2005100895/28; заявл. 26.06.2006; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36. 8 с.
12. Krapez J.-C., Cielo P. Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part I: 1-D Analysis // Research in Nondestructive Evaluation. 1991. No. 2. P. 81–100. URL: https://www.researchgate.net/publication/240536138_Thermographic_Nondestructive_Evaluation_Data_Inversion_Procedures_Part_I_1-D_Analysis (дата обращения: 05.12.2021). doi: 10.1080/09349849109409504.
13. Krapez J.-C., Maldague X., Cielo P. Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part II: 2-D Analysis and Experimental Results // Research in Nondestructive Evaluation. 1991. No. 2. P. 101–124. URL: https://www.researchgate.net/publication/261645355_

Thermographic Nondestructive Evaluation Data Inversion Procedures Part II 2-D Analysis and Experimental Results (дата обращения: 05.12.2021). doi: 10.1080/09349849109409505.

14. Mailliet D., André S., Batsale J.-C., Degiovanni A., Moyne C. *Thermal Quadrupoles. Solving the heat equation through integral transforms*. John Wiley and Sons, 2000. 360 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/265486424_Thermal_Quadrupoles_Solving_the_heat_equation_through_integral_transforms (дата обращения: 05.12.2021).

15. Batsale J.C., Mailliet D., Degiovanni A. *Thermal quadrupoles method extended with integral transforms – Calculations of the heat transfer across a two-dimensional plane crack* // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. January 1994. Vol. 37, iss. 1. P. 111–127. URL: https://www.researchgate.net/publication/259034489_Thermal_quadrupoles_method_extended_with_integral_transforms_-_Calculations_of_the_heat_transfer_across_a_two-dimensional_plane_crack (дата обращения: 05.12.2021).

16. Bendada A., Mailliet D., Degiovanni A. *Non destructive transient thermal evaluation of laminated composites: discrimination between delaminations thickness variations and multidelaminations* // *Quantitative Infrared Thermography. Eurotherm Seminar 27, Paris, July 7–9, 1992*. P. 218–223. URL: <http://qirt.org/archives/qirt1992/papers/033.pdf> (дата обращения: 05.12.2021).

17. Способ теплового неразрушающего контроля многослойных объектов: пат. 2219534 Российская Федерация / О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков. № 2002124295/28; заявл. 12.09.2002; опублик. 20.12.2003, Бюл. № 35. 41 с.

18. *Инженерные основы теплового контроля. Опыт практического применения: моногр.* / З.Г. Салихов, О.Н. Будадин, Е.Н. Ишиметьев [и др.]. М.: МИСИС, 2008. 476 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/116623> (дата обращения: 05.12.2021).

19. Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Родин М.А., Лебедев О.В. *Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений* // *Дефектоскопия*. 2003. № 5. С. 77–94.

References

1. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoi kontrol'* [Infrared Thermography and Thermal Nondestructive Testing]. Moscow, ID Spektr; 2009. 544 p. (In Russ.)

2. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Nenarokomov A.V. *Identifikatsiya matematicheskikh modelei slozhnogo teploobmena: monografiya* [Identification of complex heat transfer mathematical models]. Moscow, MAI Publ.; 1999. 268 p. (In Russ.)

3. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the solids' thermal mode]. Leningrad, Energiya Publ.; 1976. 349 p. (In Russ.)

4. Pudovkin A.P., Chernyshov V.N., Pluzhnikov Yu.V., Kolmakov A.V. [Method for non-contact non-destructive testing of layers of two-layer products and analysis of thermophysical processes in bi-metals]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transactions of the Tambov State Technical University*. 2002;8(2):190–200. (In Russ.)

5. Yachikov I.M., Logunova O.S., Portnova I.V. *Matematicheskoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of thermophysical processes]. Magnitogorsk, MSTU Publ.; 2004. 175 p. (In Russ.)

6. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Heat conduction theory]. Moscow; 1967. 599 p. (In Russ.)

7. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transmission]. Moscow, Energiya Publ.; 1975. 488 p. (In Russ.)

8. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Nenarokomov A.V. *Obratnye zadachi v issledovanii slozhnogo teploobmena* [Inverse problems in the study of complex heat transfer]. Moscow, Yanus-K; 2009. 298 p. (In Russ.)

9. Maldague X. *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley series in microwave and optical engineering. New York: John Wiley & Sons; 2001. 682 p.

10. Balageas D., Krapez J.-C., Cielo P. *Pulsed Photothermal Modeling of Layered Materials*. *Journal of Applied Physics*. 1986;59:348–357. Available at: https://www.researchgate.net/publication/224507624_Pulsed_Photothermal_Modeling_of_Layered_Materials (accessed 05 December 2021). doi: 10.1063/1.336690.

11. Pluzhnikov Yu.V., Kolmakov A.V., Pudovkin A.P. *Sposob nepreryvnogo kontrolya tolshchiny sloev i poristosti metallicheskogo karkasa chetyrekhsloninogo metalloftoroplastovogo lentochного materiala* [Method of permanent control of thickness of layers and porosity of metallic frame of four-layer metallic-fluoroplastic belt material]. Patent RF, no. 2290604, 2006.

12. Krapez J.-C., Cielo P. Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part I: 1-D Analysis. *Research in Nondestructive Evaluation*. 1991;(2):81–100. Available at: https://www.researchgate.net/publication/240536138_Thermographic_Nondestructive_Evaluation_Data_Inversion_Procedures_Part_I_1-D_Analysis (accessed 05 December 2021). doi: 10.1080/09349849109409504.

13. Krapez J.-C., Maldague X., Cielo P. Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part II: 2-D Analysis and Experimental Results. *Research in Nondestructive Evaluation*. 1991;(2):101–124. Available at: https://www.researchgate.net/publication/261645355_Thermographic_Nondestructive_Evaluation_Data_Inversion_Procedures_Part_II_2-D_Analysis_and_Experimental_Results (accessed 05 December 2021). doi: 10.1080/09349849109409505.

14. Maillet D., André S., Batsale J.-C., Degiovanni A., Moynes C. Thermal Quadrupoles. Solving the heat equation through integral transforms. John Wiley and Sons; 2000. 360 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/265486424_Thermal_Quadrupoles_Solving_the_heat_equation_through_integral_transforms (accessed 05 December 2021).

15. Batsale J.C., Maillet D., Degiovanni A. Thermal quadrupoles method extended with integral transforms – Calculations of the heat transfer across a two-dimensional plane crack. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1994;37(1);111–127. Available at: https://www.researchgate.net/publication/259034489_Thermal_quadrupoles_method_extended_with_integral_transforms_-_Calculations_of_the_heat_transfer_across_a_two-dimensional_plane_crack (accessed 05 December 2021).

16. Bendada A., Maillet D., Degiovanni A. Non destructive transient thermal evaluation of laminated composites: discrimination between delaminations thickness variations and multidelaminations. *Quantitative Infrared Thermography. Eurotherm Seminar 27, Paris, July 7–9; 1992*. P. 218–223. Available at: <http://qirt.org/archives/qirt1992/papers/033.pdf> (accessed 05 December 2021).

17. Budadin O.N., Troitskii-Markov T.E., Abramova E.V., Suchkov V.I. *Sposob teplovogo nerazruchayushchego kontrolya mnogoslonykh ob"ektov* [Process of thermal nondestructive testing of multi-layer objects]. Patent RF, no. 2219534, 2003. (In Russ.)

18. Salikhov Z.G., Budadin O.N., Ishmet'ev E.N. et al. *Inzhenernye osnovy teplovogo kontrolya. Opyt prakticheskogo primeneniya* [Thermal nondestructive testing engineering basics. Practical application experience]. Moscow, MISIS; 2008. 476 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/116623> (accessed 05 December 2021). (In Russ.)

19. Budadin O.N., Abramova E.V., Rodin M.A., Lebedev O.V. [Thermal nondestructive testing of buildings and building structures]. *Defektoskopiya*. 2003;(5):77–94. (In Russ.)

Информация об авторах

Костылева Лилия Юрьевна, старший преподаватель кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; kostylevali@susu.ru.

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

Рец Евгения Анатольевна, заведующий лабораторией кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; retcea@susu.ru.

Ячиков Игорь Михайлович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; iachikovim@susu.ru.

Information about the authors

Liliya Yu. Kostyleva, Senior Lecturer of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kostylevali@susu.ru.

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, School of Electrical Engineering and Computer Science, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiov@susu.ru.

Evgeniya A. Retc, Head of the Laboratory of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; retcea@susu.ru.

Igor M. Yachikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; iachikovim@susu.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 15.11.2021; одобрена после рецензирования 29.11.2021; принята к публикации 06.12.2021.

The article was submitted 15.11.2021; approved after reviewing 29.11.2021; accepted for publication 06.12.2021.

Инфокоммуникационные технологии и системы Infocommunication Technologies and Systems

Научная статья
УДК 004.75
doi: 10.14529/ctcr220105

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЯХ С ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИЕЙ VANET

Ирина Павловна Болодурина¹, Любовь Сергеевна Гришина²,
Артур Юрьевич Жигалов³, Денис Игоревич Парфёнов⁴

^{1, 2, 3, 4} Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

¹ prmat@mail.osu.ru

² grishina_ls@inbox.ru

³ leroy137.artur@gmail.com

⁴ parfenovdi@mail.ru

Аннотация. В настоящий момент системы информирования о дорожном движении требуют агрегирования больших данных для предоставления рекомендаций транспортным средствам в действующих условиях, что приводит к повышению комфорта пользователей. Основным инструментом повышения уровня безопасности стало своевременное информирование участников движения о текущей ситуации на дороге, погодных условиях и т. п. В этом случае если объект сети будет подвержен атаке и данные при передаче будут заменены, то по всей зоне видимости сегмента VANET возможно раскрытие конфиденциальной информации, создание аварийных ситуаций и т. д. В этой связи наиболее остро встает вопрос обеспечения безопасности, в том числе при передаче трафика, и проведения дополнительного анализа больших данных об аномалиях и проводимых несанкционированных действиях. **Цель исследования.** Разработать гибридную модель эффективного размещения исходных и промежуточных данных в беспроводных транспортных сетях с динамической топологией VANET, являющуюся по сути структурным представлением программно-конфигурируемой сети и инструментов проведения граничных вычислений, с возможностью оптимально относительно времени анализировать данные узлов сети и выявлять аномалии. **Методы.** Рассмотренный подход Edge computing состоит в расположении вычислительных мощностей в географически распределенных вычислительных устройствах ближе к конечным пользователям. Программно-конфигурируемые сети SDN передают часть функций управления и физической передачи с маршрутизаторов и коммутаторов, уменьшая нагрузку. В рамках данного исследования разработан алгоритм RD – протокол передачи и обработки промежуточных данных. Для проведения кластеризации ТС на сегменте сети использован метод обучения без учителя DBSCAN. Предварительный анализ аномального трафика проведен на основе моделей нейронных сетей RNN с кратковременной памятью. **Результаты.** Разработанная гибридная модель эффективного размещения исходных и промежуточных данных позволяет быстрее реагировать на несанкционированные действия. **Заключение.** Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, подтверждают необходимость внедрения и масштабирования гибридной модели с граничными вычислениями на практике.

Ключевые слова: VANET, гибридная модель, программно-конфигурируемые сети, граничные вычисления, метод DBSCAN, нейронные сети RNN

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-57-53019, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-2502.2020.9), а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-3652.2021.5).

Для цитирования: Гибридная модель эффективного представления данных в беспроводных транспортных сетях с динамической топологией VANET / И.П. Болодурина, Л.С. Гришина, А.Ю. Жигалов, Д.И. Парфёнов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 65–76. doi: 10.14529/ctcr220105.

HYBRID MODEL OF EFFECTIVE DATA REPRESENTATION IN WIRELESS TRANSPORT NETWORKS WITH DYNAMIC VANET TOPOLOGY

Irina P. Bolodurina¹, Lyubov S. Grishina², Artur Yu. Zhigalov³, Denis I. Parfenov⁴

^{1, 2, 3, 4} Orenburg State University, Orenburg, Russia

¹ prmat@mail.osu.ru

² grishina_ls@inbox.ru

³ leroy137.artur@gmail.com

⁴ parfenovdi@mail.ru

Abstract. At the moment, traffic information systems require the aggregation of big data to provide recommendations to vehicles in the current conditions, which leads to an increase in user comfort. The main tool for improving the level of safety was timely informing traffic participants about the current situation on the road, weather conditions, etc. In this case, if the network object is subjected to an attack and the data is replaced during transmission, then the disclosure of confidential information, the creation of emergency situations, etc. is possible throughout the visibility zone of the VANET segment. In this regard, the most urgent issue is ensuring security, including when transmitting traffic, and conducting an additional analysis of big data about anomalies and ongoing unauthorized actions. **Aim.** To develop a hybrid model for the efficient placement of source and intermediate data in wireless transport networks with a dynamic VANET topology, which represents a structural representation of a software-configurable network and edge computing tools, with the ability to optimally analyze data from network nodes and identify anomalies. **Methods.** The considered Edge computing approach consists in locating computing capacities in geographically distributed computing devices closer to end users. Software-configurable SDN networks transfer part of the control and physical transmission functions from routing and switches, reducing the load. Within the framework of this study, an RD algorithm has been developed – a protocol for transmitting and processing intermediate data. To carry out clustering of vehicles on a network segment, the DBSCAN unsupervised learning method was used. Preliminary analysis of abnormal traffic was carried out on the basis of RNN neural network models with short-term memory. **Results.** The developed hybrid model of efficient placement of initial and intermediate data makes it possible to react faster to unauthorized actions. **Conclusion.** The results obtained in the course of the study confirm the need to implement and scale a hybrid model with boundary calculations in practice.

Keywords: VANET, hybrid model, software-defined networks, Edge computing, DBSCAN method, RNN neural networks

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-57-53019, the grant of the President of the Russian Federation for state support of the leading scientific schools of the Russian Federation (NSh-2502.2020.9), as well as the scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and graduate students (SP-3652.2021.5).

For citation: Bolodurina I.P., Grishina L.S., Zhigalov A.Yu., Parfenov D.I. Hybrid model of effective data representation in wireless transport networks with dynamic VANET topology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):65–76. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220105.

Введение

В последнее время проблемы формирования безопасной среды на дорогах и при этом предоставления доступной и многофункциональной «умной» среды с полной интеграцией беспроводных устройств привели к созданию беспроводных транспортных сетей с динамической топологией VANET [1]. Основным инструментом повышения уровня безопасности стало своевременное информирование участников движения о текущей ситуации на дороге, погодных условиях и т. п. Анализ актуальных исследований в области обеспечения безопасного движения транспортных средств (ТС) в беспроводных сетях VANET показал, что необходима разработка эффективных протоколов/алгоритмов распространения данных [2, 3]. Наиболее продвинутые системы на сегодняшний день используют протоколы распространения данных на основе разделения карт (DPMS) [4] или протоколы Geocast [5]. В этом случае реализуется связь «один ко мно-

гим» между объектами движения, при этом ТС осуществляет многоадресное распространение данных в определенное подмножество объектов, которые находятся в заданной географической области.

Системы информирования о дорожном движении требуют агрегирования больших данных для предоставления рекомендаций транспортным средствам в действующих условиях дорожного движения, что приводит к повышению комфорта пользователей. В этом случае если объект сети будет подвержен атаке и данные при передаче будут заменены, то по всей зоне видимости сегмента VANET возможно раскрытие конфиденциальной информации, создание аварийных ситуаций и т. д. В этой связи наиболее остро встает вопрос обеспечения безопасности, в том числе при передаче трафика, и проведения дополнительного анализа больших данных об аномалиях и проводимых несанкционированных действиях.

В рамках данной работы рассмотрен вопрос построения гибридной модели эффективного размещения исходных и промежуточных данных в беспроводных транспортных сетях с динамической топологией VANET, являющейся по сути структурным представлением программно-конфигурируемой сети и инструментов проведения граничных вычислений, с возможностью оптимально относительно времени анализировать данные узлов сети. Кроме того, проведен анализ производительности и эффективности использования данной модели при несанкционированных аномальных действиях объектов сети.

1. Обзор исследований

Исследованием вопросов безопасной передачи данных в сетях с динамической топологией VANET занимаются ученые по всему миру. Повышение надежности каналов и защищенности трафика сети рассматривается с точки зрения внедрения соответствующих протоколов передачи данных. Рассмотрим ряд научных исследований, посвященных разработке подходов к эффективному размещению данных в беспроводных транспортных сетях.

В работе [6] авторами рассмотрено применение технологии автономных вычислений в сетях VANET с помощью протокола ADM. Представленный подход позволяет осуществлять передачу информации в зависимости от плотности сети и уровня приоритета сообщений с высокой надежностью и автономностью. Протокол ADM использует предварительно вычисленные стратегии передачи данных с помощью эволюционного алгоритма. Для каждого узла сети динамически подбираются собственные параметры передачи данных в зависимости от плотности сети и уровня приоритета сообщения. Результаты проведенных экспериментов показали, что ADM превосходит два других метода протокола широкополосной передачи – Smart-flooding и Simple flooding в качестве передачи за счет меньшего среднего числа коллизий в зависимости от числа узлов сети. Авторы работы рассматривают адаптацию алгоритма ADM для нескольких уровней приоритетов сообщений при увеличении количества источников передачи информации.

Авторами работы [7] предложена модель приоритизации данных от транспортных средств для ускорения анализа больших данных. Для определения приоритета сообщения для транспортных средств используется кластеризация. Предложенная модель использует алгоритм, основанный на выделении базовых точек в сети транспортных средств, для ускорения работы алгоритма кластеризации и повышения эффективности количества передачи информации только транспортным средствам в зоне релевантности с минимальными накладными расходами. Применение предложенного алгоритма в реальных условиях сократило время кластеризации, что позволяет приложениям для защиты от атак проводить обнаружение в режиме реального времени.

Исследование [8] посвящено изучению текущего состояния технологий VANET, а также вопросам развертывания данных беспроводных сетей в реальном мире. Авторы выделяют особое внимание разработке приложений, специфичных для VANET, которые обеспечивают какую-то конкретную функцию и основу для надлежащей поддержки ТС. Кроме того, представлена концепция их классификации: общего назначения, помощи водителю, обеспечения безопасности, рекламные приложения, а также развлекательные приложения. Большинство приложений облегчают вождение и обеспечивают безопасность. Исходя из представленных особенностей доступной информации трафика, следует выделять характеристики данных приложений для анализа состояния объекта сети.

В работе [9] авторы провели сравнительный анализ актуальных сетевых угроз и методов обеспечения безопасности протоколов маршрутизации для сетей с динамической топологией. Авторы делают акцент о важности комбинированного применения подходов к защите передачи информации. Рассмотрена проблема сетевых атак, связанных со злонамеренным ухудшением качества маршрутов, а также проблема «эгоистичности», когда редко учитываются социальные характеристики узлов сети, что позволяет внутренним нарушителям игнорировать сотрудничество с другими узлами. Авторами предложены рекомендации по определению оптимального порогового значения уровней репутации или комплексной метрики маршрутов в различных сценариях, а также выбор порогового значения для минимизации количества ошибок первого и второго рода для обеспечения эффективности и безопасности маршрутизации. Проведено исследование зависимости модели обеспечения безопасности маршрутизации от архитектуры, назначения и свойств рассматриваемой динамически организуемой сети.

Различные методы распространения данных и проблемы, связанные с ними, представлены в работе [10]. Авторы отмечают, что тип приложений VANET и присущие им характеристики, такие как различная плотность сети, быстрое перемещение транспортных средств, делают распространение данных довольно сложным. Главными особенностями VANET выступают высокая динамическая топология, частая отключенная сеть, моделирование и прогнозирование мобильности, коммуникационная среда, жесткие ограничения задержки, взаимодействие с бортовыми датчиками. Наиболее актуальным направлением исследований авторы выделяют разработку метода распространения данных, который обеспечивает приемлемую производительность при различных приложениях и с изменяемой архитектурой VANET.

В рамках исследования [11] представлен новый протокол агрегирования данных информационных систем дорожного движения, называемый Smart Directional Data Aggregation (SDDA), способный уменьшить перегрузку сети при одновременном получении высокоточной информации об условиях движения на больших участках дорог. Авторы ввели три уровня фильтрации: фильтрация всех сообщений FCD, интеграция метода подавления на этапе сбора информации, агрегирование отфильтрованных данных и их последующее распространение. Проведенные эксперименты подтвердили высокую эффективность SDDA: достижение низкого коэффициента перегрузки, а также высокой точности агрегирования.

Таким образом, обзор проведенных исследований показал, что разработка гибридной модели эффективного размещения исходных и промежуточных данных в беспроводных транспортных сетях с динамической топологией VANET является актуальной проблемой, требующей разработки подробного структурного представления программно-конфигурируемой сети и внедрения инструментов проведения граничных вычислений для повышения общей производительности вычислений.

2. Беспроводные транспортные сети с динамической топологией VANET

Автомобильные беспроводные сети с динамической топологией VANET получили широкое признание для обеспечения большего удобства и эффективности для водителей с многочисленными приложениями, начиная от безопасности, эффективности транспорта и заканчивая информацией и развлечениями.

В VANET задействовано множество источников информации (рис. 1) для обеспечения многофункциональной среды интеллектуальных транспортных систем (ИТС), таких как транспортные средства, оснащенные бортовыми блоками OBU (onboard unit), придорожные блоки RSU (roadside unit), базовые станции BS (base station), транспортная инфраструктура (светофоры, камеры видеонаблюдения), данные GPS и другие.

Транспортные средства (OBU) оснащены приложениями и датчиками с возможностью обработки, системой локализации, такой как глобальная система позиционирования GPS, и радиопередатчиком для беспроводного доступа к автомобильной среде. Кроме того, OBU также оборудованы широкополосным радиопередатчиком, таким как WiMax / 3G / 4G LTE, для связи с базовой станцией сотовой связи. Прямая беспроводная связь от транспортного средства к транспортному средству позволяет обмениваться данными даже там, где нет инфраструктуры связи, такой как базовые станции сотовых телефонов или точки доступа беспроводных сетей.

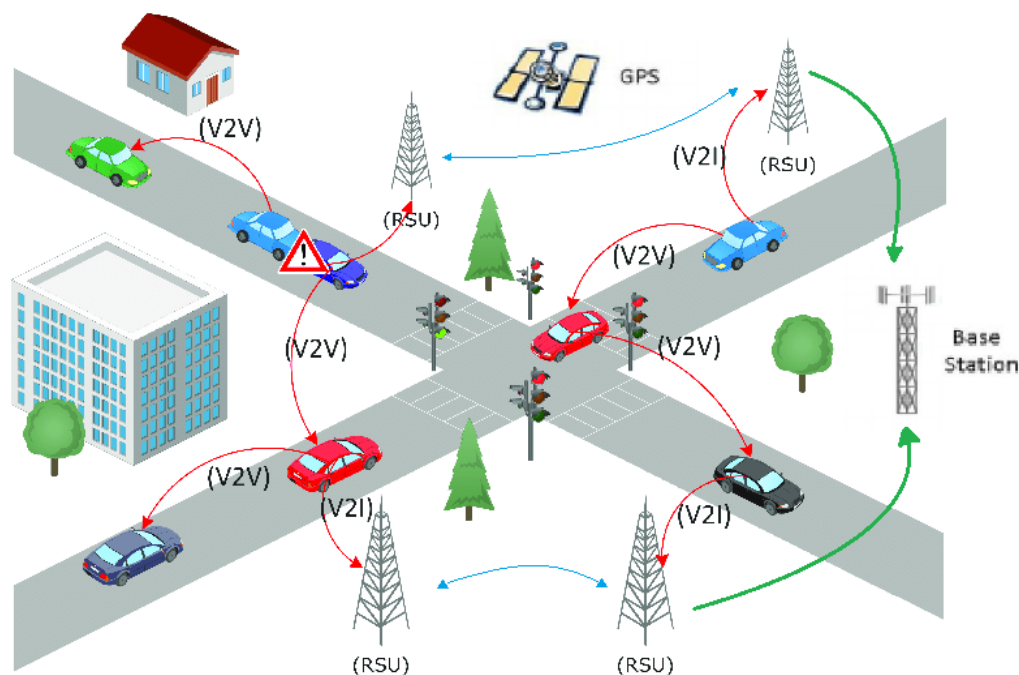


Рис. 1. Интеллектуальная транспортная система VANET
Fig. 1. Intelligent transport system VANET

RSU устанавливаются вдоль дорожных сетей и представляют собой стационарную инфраструктуру, такую как системы видеонаблюдения, сетевые камеры, камеры контроля полосы движения, светофор, датчики и т. д. Каждый кластер RSU подключен к станции управления RSU (RSUC) для хранения и обработки данных перед отправкой в единую облачную инфраструктуру VANET.

При этом обработка данных в облаках может давать длительные задержки. Это связано с тем, что центры обработки данных расположены достаточно далеко от конечных устройств. В связи с этим актуальной задачей является перенос части вычислительных операций ближе к конечным устройствам. Данную идею реализует концепция граничных вычислений MEC с помощью программно-конфигурируемых сетей SDN.

Основная идея Edge computing состоит в расположении вычислительных мощностей в географически распределенных вычислительных устройствах. Таким образом, на границе будут обработаны данные, чувствительные к задержкам, а данные более тяжелого трафика будут обработаны в облаке. Программно-конфигурируемые сети SDN снимут часть функций управления и физической передачи с маршрутизаторов и коммутаторов, уменьшая нагрузку. Управление всей сетью будет реализовано на центральном контроллере.

Таким образом, с помощью Edge computing и SDN разрабатываемая гибридная модель эффективного представления данных VANET будет иметь минимальные задержки.

Архитектура VANET должна обеспечивать связь между близлежащими транспортными средствами, а также между транспортными средствами и придорожным оборудованием, что приводит к следующим типам связей (рис. 2). Основными типами связей (рис. 3) являются «ТС – инфраструктура» (V2I) или «инфраструктура – ТС» (I2V), а также «ТС – ТС» (V2V):

- V2V позволяет организовывать прямую автомобильную связь без поддержки фиксированной инфраструктуры и может в основном использоваться для приложений безопасности, защиты и распространения;

- V2I позволяет ТС связываться с придорожной инфраструктурой в основном для приложений сбора информации и данных;

- гибридная связь позволяет объединять как V2V, так и V2I. В этом случае ТС может связываться с придорожной инфраструктурой либо в режиме одиночного, либо множественного перехода, в зависимости от расстояния.

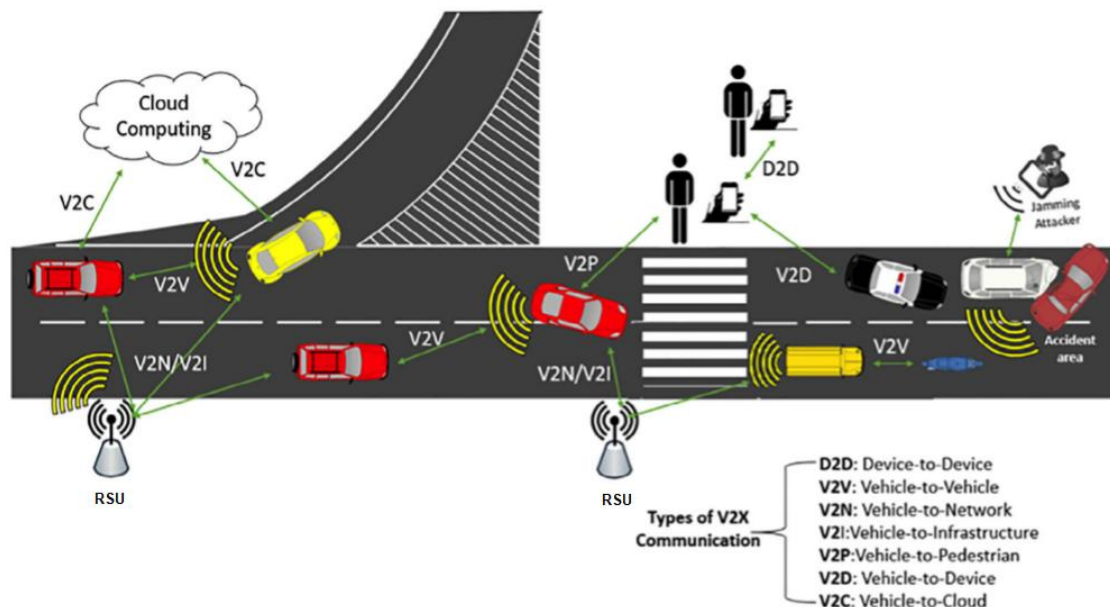


Рис. 2. Интеллектуальная транспортная система VANET
 Fig. 2. Types of links in VANET infrastructure

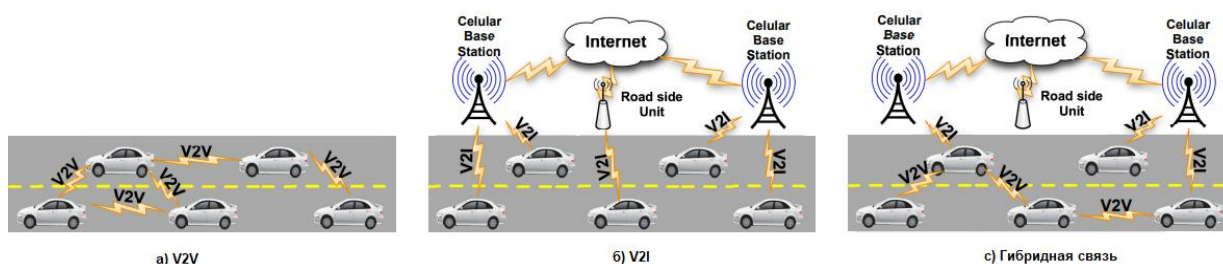


Рис. 3. Основные типы передачи данных в VANET
 Fig. 3. Basic types of data transfer in VANET

При разработке архитектуры системы необходимо учитывать, как данные будут передаваться в сети, а для VANET основным источником информации служат приложения AU (application unit). AU – это устройства ТС, выполняющие функции обеспечения коммуникационных возможностей OBU. AU может быть специализированным устройством для приложений безопасности или обычным устройством, таким как персональный цифровой помощник (PDA).

Приложения AU имеют различные требования, такие как пропускная способность, задержка, безопасность и надежность. Системы VANET, как правило, поддерживают ряд приложений, включая дорожные сигналы, улучшение зрения, погодные условия, безопасность и развлечения. Большинство приложений может быть разделено на две категории: приложения, связанные с безопасностью, и приложения, связанные с комфортом.

Гибридная модель эффективного размещения данных VANET должна отражать реалистичную связь между ТС и сервером, которая представлена на рис. 4. Отметим, что приложения для подключенных ТС обмениваются информацией посредством мобильной связи с серверами. Каждое ТС или сервер работают в изолированной среде. Модель вычислительной сети представляет собой взаимодействие контейнеров ТС и контейнера сервера. Приложения в этой модели разделены на 2 типа.

1. Пользовательское приложение: генерирует трафик, связанный с развлекательными услугами, доступными в ТС.
2. Автомобильное приложение: связано с работой ТС, например, телеметрией или обновлением.

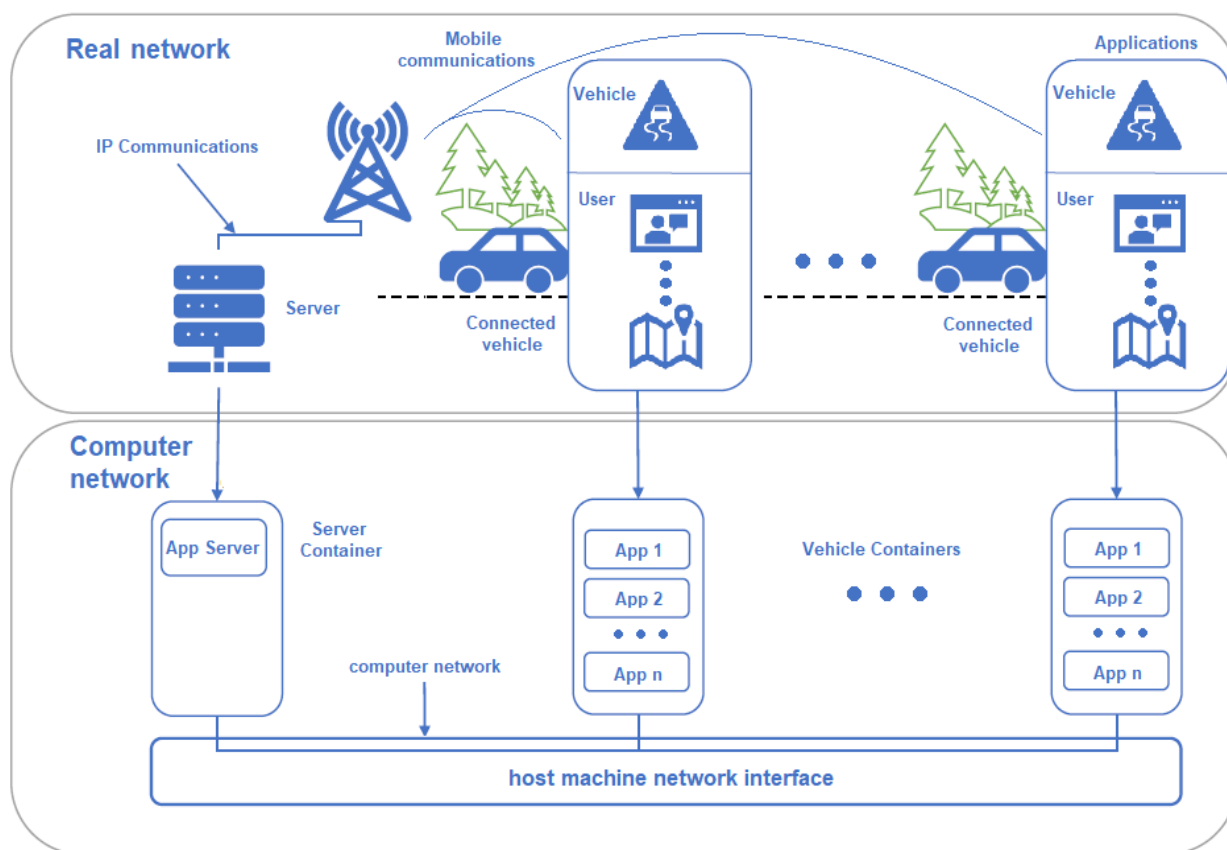


Рис. 4. Архитектура взаимодействия ТС и их приложений в сети VANET
Fig. 4. Architecture of interaction between vehicles and applications in VANET

Таким образом, архитектура и принципы взаимодействия ТС в сети VANET позволяют внедрить в модель размещения исходных и промежуточных данных подходы программно-конфигурируемых сетей и инструменты проведения граничных вычислений для повышения общей эффективности и производительности вычислений.

3. Гибридная модель эффективного размещения данных VANET

Рассмотрим процесс безопасной передачи данных в сети VANET. Пусть исходные данные приложений AU поступают посредством связей V2V, V2I и I2V в RSU и далее на сервер. Отметим, что при обработке данных непосредственно на сервере возникает значительная задержка между отправлением данных и получением конечного результата. В этой связи эффективнее использовать концепцию граничных вычислений для того, чтобы перенести ядро процесса первичной обработки ближе к конечным пользователям.

В рамках данной гибридной модели размещения и передачи данных VANET предполагается проведение граничных вычислений на контроллере RSU (рис. 5). Данный подход позволит анализировать трафик сегментов сети с меньшей задержкой, своевременно выявлять аномалии сети и обеспечивать безопасность передачи данных на более высоком уровне.

Согласно представленной концепции передачи данных, помимо исходных данных всех доступных приложений OBU выделим наиболее значимые признаки для промежуточного анализа данных. На основе протокола передачи промежуточных данных (алгоритм RD) OBU будут разделены по кластерам на основе метода обучения без учителя DBSCAN [12], а далее данные с одного кластера будут переданы в ближайший контроллер RSU для предварительного анализа аномального трафика на основе моделей нейронных сетей RNN [13] с кратковременной памятью для анализа поступающего трафика как временных рядов. Результаты проведенных исследований трафика позволят быстрее реагировать на несанкционированные действия, а полученная информация далее будет передана на сервер в качестве дополнительных данных.

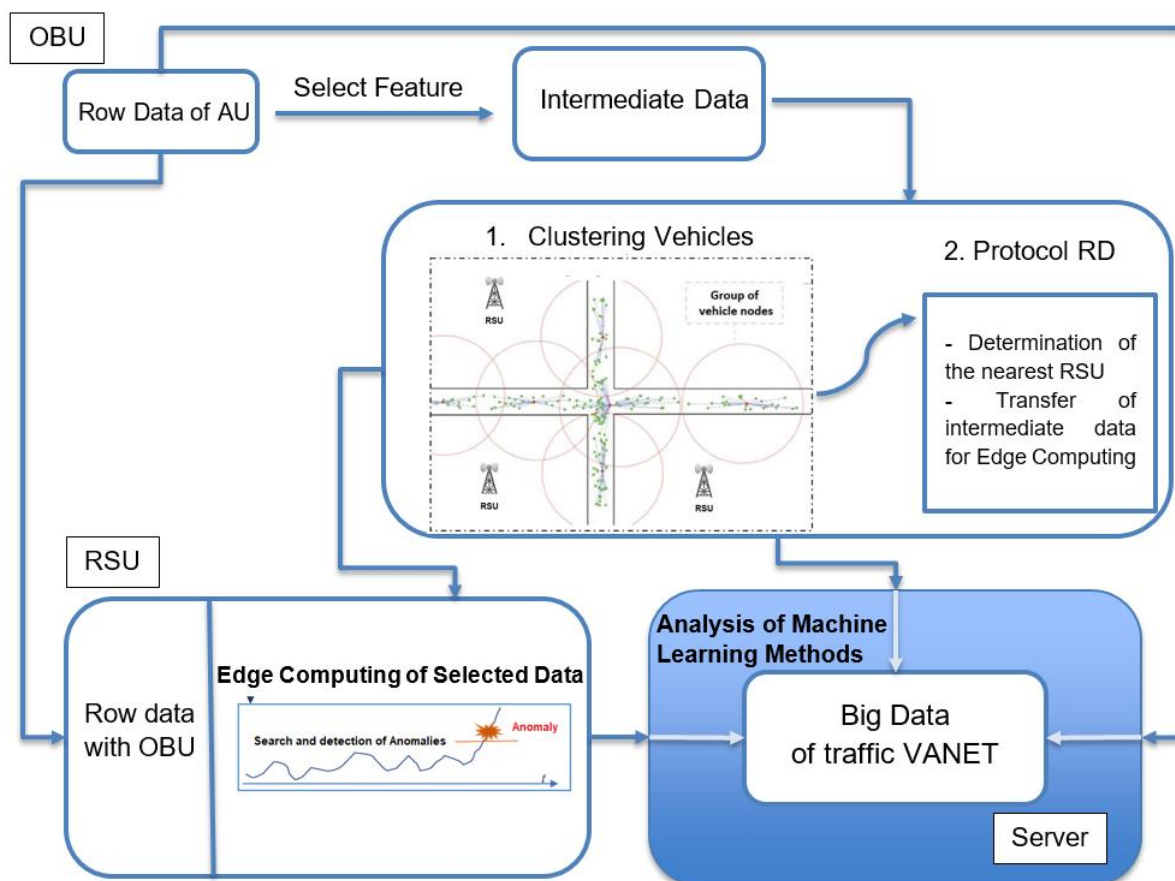


Рис. 5. Гибридная модель эффективного размещения данных VANET
Fig. 5. Hybrid model of efficient VANET data placement

Алгоритм RD

Шаг 0. Инициализировать ϵ – окрестность ТС для связи в схожие кластеры, $\rho(x_1, x_2)$ – метрика расстояний между объектами сети; m – количество объектов сети $\{tc_i\}, i = 1, \dots, m$ в сети VANET, p – количество размещенных RSU $\{rsu_j\}, j = 1, \dots, p$.

Шаг 1. Разбить множество $\{tc_i\}, i = 1, \dots, m$ на p подмножеств по принципу близости ТС на основе алгоритма DBSCAN и соотнести данные подмножества с ближайшими $\{rsu_j\}, j = 1, \dots, p$.

Шаг 2. Передать данные p подмножеств ТС на выделенный контроллер RSU для преобразования данных.

Шаг 3. Параллельный поиск и выявление аномалий трафика на каждом контроллере $\{rsu_j\}, j = 1, \dots, p$ на основе моделей нейронных сетей RNN с кратковременной памятью для анализа поступающего трафика как временных рядов.

Шаг 4. Вывод информации о подозрительных узлах сети.

Реализуем представленную гибридную модель размещения исходных и промежуточных данных в беспроводных транспортных сетях с динамической топологией VANET и представленное структурное взаимодействие программно-конфигурируемой сети и инструментов проведения граничных вычислений и проанализируем общую производительность ИТС.

4. Вычислительные эксперименты

Моделирование дорожного движения выполняется с помощью SUMO 2 [14], а моделирование сети выполняется с помощью OMNeT++ [15] вместе с набором инструментов моделирования физического уровня MiXiM3, что позволяет использовать точные модели для радиопомех, а также затенять использование статических и движущихся препятствий. Модели сетей VANET и их узлы спроектированы с помощью OMNeT++ 5.1.0 для оценки влияния граничных вычислений на общую производительность ИТС. Мощность передачи информации ТС задана 30 мВт, чтобы добиться примерно 300 м диапазона помех.

Модель нейронной сети RNN с кратковременной памятью для анализа поступающего трафика как временных рядов взята LSTM-i из библиотеки PyTorch и предварительно обучена на выгруженном наборе данных трафика с проведенными атаками. Проведем оценку производительности поиска аномалий сети VANET при размещении обученной RNN на сервере и прямой пересылке данных с OBU и при размещении на контроллере RSU и реализации стратегии граничных вычислений. Количество RSU, размещенных на дорогах, равно 20.

Результаты экспериментов исследования времени отклика моделей анализа трафика на аномалии при размещении обработчиков непосредственно на сервере или применении гибридной модели с граничными вычислениями показали, что наиболее эффективной является гибридная модель с более высокой производительностью и средней задержкой не более 176 мс для сети с количеством ТС около 200. При этом для сетей с количеством ТС до 20 средняя задержка моделей отличается не существенно и не превосходит 108 мс (рис. 6).

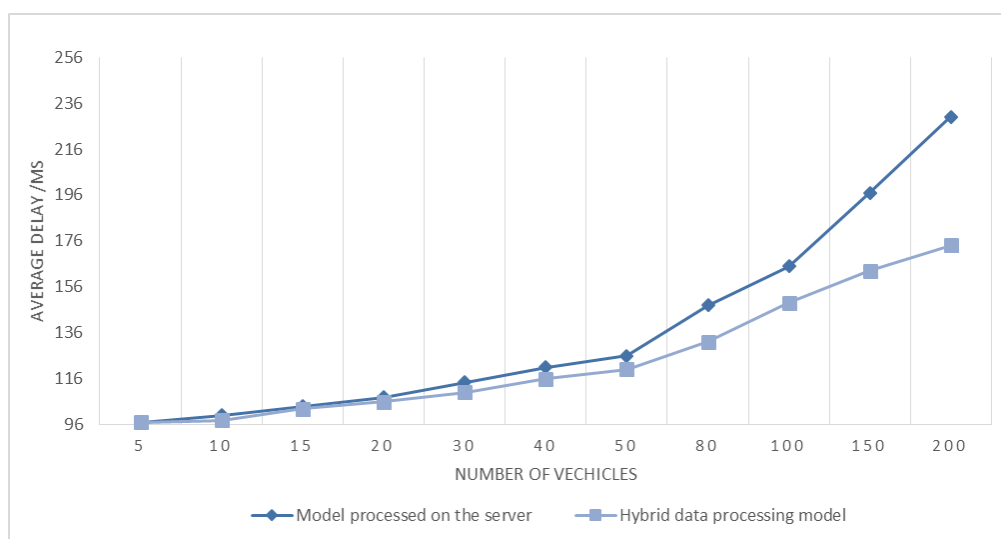


Рис. 6. Зависимость средней задержки в сети при увеличении количества ТС в VANET при различных моделях размещения

Fig. 6. Dependence of the average network latency with an increase in the number of vehicles in the VANET for different placement models

Зафиксируем количество ТС, в сегменте сети VANET равное 100. Исследуем зависимость средней задержки на частоту размещения RSU в этом сегменте (рис. 7).

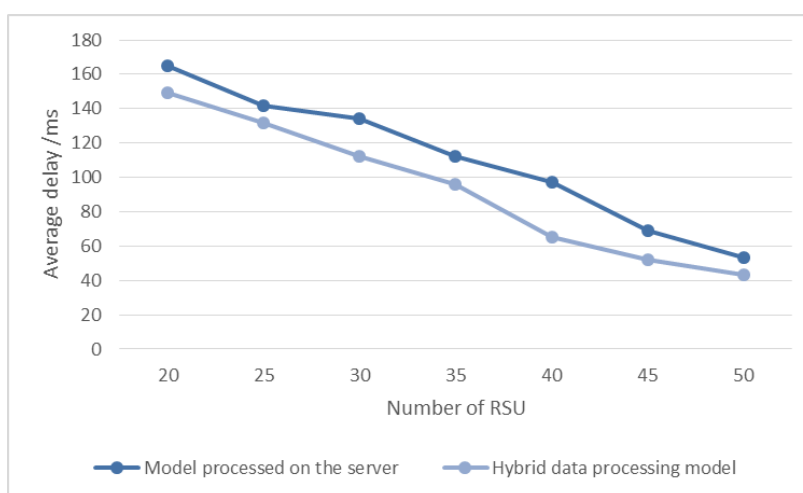


Рис. 7. Зависимость средней задержки в сети при увеличении количества RSU в VANET при различных моделях размещения

Fig. 7. Dependence of the average network latency with an increase in the number of RSUs in the VANET for different placement models

Результаты исследования средней задержки в сети при увеличении количества RSU показали, что при более высокой плотности RSU на сегменте сети VANET передача данных на сервер происходит быстрее, в связи с чем снижается задержка моделей обработки на сервере. Для гибридной модели при возрастании количества RSU возрастает количество устройств с параллельной обработкой данных и снижается уровень задержки в сети. Разработанная гибридная модель с граничными вычислениями имеет наиболее низкие показатели средней задержки в сети, что подтверждает необходимость внедрения и масштабирования данной модели на практике.

Заключение

Таким образом, в рамках данной работы разработана гибридная модель эффективного размещения исходных и промежуточных данных в беспроводных транспортных сетях с динамической топологией VANET, использующая структурное представление программно-конфигурируемых сетей и инструменты проведения граничных вычислений.

Результаты проведенных экспериментов показали, что гибридная модель с граничными вычислениями имеет наиболее низкие показатели средней задержки в сети, что подтверждает высокую эффективность предложенного подхода и необходимость внедрения и масштабирования представленной модели на практике.

Список литературы

1. Tomar R., Prateek M., Sastry G.H. *Vehicular Adhoc Network (VANET) – An Introduction* // *International Journal of Control Theory and Applications*. 2016. Vol. 9, no. 18. P. 8883–8888.
2. Хакимов А.А., Суминов А.В., Мутханна А.С. *Разработка метода организации распределения граничных вычислений в сетях VANET* // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2019. Т. 7, № 2. С. 47–55.
3. Abu Taleb A. *VANET Routing Protocols and Architectures: An Overview* // *Journal of Computer Science*. 2018. Vol. 14. P. 421–434. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2018.423.434>.
4. Allani S., Yeferny T.R., Yahia C.S. *DPMS: A Swift Data Dissemination Protocol Based on Map Splitting* // *40th IEEE Annual Computer Software and Applications Conference*. 2016. P. 817–822.
5. Allal S., Boudjit S. *Geocast Routing Protocols for VANETs: Survey and Guidelines* // *2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*. 2012. P. 323–328.
6. Mbarek N., Abdou W., Darties B. *Autonomic Computing and VANETs: Simulation of a QoS-based Communication Model* // *Networking Simulation for Intelligent Transportation Systems*. 2017. P. 211–234.
7. Bangui H., Ge. M., Buhnova B., Trang L.H. *Towards faster big data analytics for anti-jamming applications in vehicular ad-hoc network* // *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2021. Vol. 32, no. 10. <https://doi.org/10.1002/ett.4280>.
8. Lee M., Atkison T. *VANET applications: Past, present, and future* // *Vehicular Communications*. 2021. Vol. 28. P. 2214–2096.
9. Никонов В.И., Литвинов Г.А., Щерба Е.В. *Обеспечение безопасности протоколов маршрутизации для телекоммуникационных сетей с динамической топологией* // *Доклады ТУСУР*. 2018. Т. 21, № 3. С. 19–29.
10. Dharmendra S., Pradhan S. *Data Dissemination Techniques in Vehicular Ad Hoc Network* // *International Journal of Computer Applications*. 2010. Vol. 8, no. 10. P. 35–39.
11. Allani S., Chbeir R., Yeferny T., Yahia S. *Smart Directional Data Aggregation in VANETs* // *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. 2018. P. 63–70.
12. Kumar K.M., Mohan Reddy A.R. *A fast DBSCAN clustering algorithm by accelerating neighbor searching using Groups method* // *Pattern Recognition*. 2016. Vol. 58. P. 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.03.008>.
13. Kim J., Kim J., Le T., Kim H. *Long Short Term Memory Recurrent Neural Network Classifier for Intrusion Detection* // *2016 International Conference on Platform Technology and Service*. 2016. P. 1–5.
14. Krajzewicz D. *Traffic Simulation with SUMO – Simulation of Urban Mobility* // *Fundamentals of Traffic Simulation*. 2011. P. 269–293.

15. Varga A., Hornig R. An overview of the OMNeT++ simulation environment // *Proceeding Simutools '08 Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops. 2008. Vol. 60. P. 1–10.*

References

1. Tomar R, Prateek M, Sastry GH. Vehicular Adhoc Network (VANET) – An Introduction. *International Journal of Control Theory and Applications*. 2016;9(18):8883–8888.
2. Khakimov A.A., Suminov A.V., Mutkhanna A.S. [Development of a method for organizing the distribution of edge computing in VANET networks]. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii*. 2019;7(2):47–55. (In Russ.).
3. Abu Taleb A. VANET Routing Protocols and Architectures: An Overview. *Journal of Computer Science*. 2018;14:421–434. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2018.423.434>.
4. Allani S., Yeferny T.R., Yahia C.S. DPMS: A Swift Data Dissemination Protocol Based on Map Splitting. In: *40th IEEE Annual Computer Software and Applications Conference*; 2016. P. 817–822.
5. Allal S., Boudjit S. Geocast Routing Protocols for VANETs: Survey and Guidelines. In: *2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*; 2012. P. 323–328.
6. Mbarek N., Abdou W., Darties B. Autonomic Computing and VANETs: Simulation of a QoS-based Communication Model. In: *Networking Simulation for Intelligent Transportation Systems*; 2017. P. 211–234.
7. Bangui H., Ge. M., Buhnova B., Trang L.H. Towards faster big data analytics for anti-jamming applications in vehicular ad-hoc network. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2021;32(10). <https://doi.org/10.1002/ett.4280>.
8. Lee M., Atkison T. VANET applications: Past, present, and future. *Vehicular Communications*. 2021;28:2214–2096.
9. Nikonov V.I., Litvinov G.A., Shcherba E.V. [Securing Routing Protocols for Dynamic Telecommunication Networks]. *Doklady TUSUR*. 2018;21(3):19–29. (In Russ.)
10. Dharmendra S., Pradhan S. Data Dissemination Techniques in Vehicular Ad Hoc Network. *International Journal of Computer Applications*. 2010;8(10):35–39.
11. Allani S., Chbeir R., Yeferny T., Yahia S. Smart Directional Data Aggregation in VANETs. In: *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*; 2018. P. 63–70.
12. Kumar K.M., Mohan Reddy A.R. A fast DBSCAN clustering algorithm by accelerating neighbor searching using Groups method. *Pattern Recognition*. 2016;58:39–48. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.03.008>.
13. Kim J., Kim J., Le T., Kim H. Long Short Term Memory Recurrent Neural Network Classifier for Intrusion Detection. In: *2016 International Conference on Platform Technology and Service*; 2016. P. 1–5.
14. Krajzewicz D. Traffic Simulation with SUMO – Simulation of Urban Mobility. In: *Fundamentals of Traffic Simulation*; 2011. P. 269–293.
15. Varga A., Hornig R. An overview of the OMNeT++ simulation environment. *Proceeding Simutools '08 Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops. 2008;60:1–10.*

Информация об авторах

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

Гришина Любовь Сергеевна, аспирант кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия; grishina_ls@inbox.ru.

Жигалов Артур Юрьевич, аспирант кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия; leroy137.artur@gmail.com.

Парфёнов Денис Игоревич, канд. техн. наук, доц. кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия; parfenovdi@mail.ru.

Information about the authors

Irina P. Bolodurina, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; prmat@mail.osu.ru.

Lyubov S. Grishina, postgraduate student of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; grishina_ls@inbox.ru.

Artur Yu. Zhigalov, postgraduate student of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; leroy137.artur@gmail.com.

Denis I. Parfenov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; parfenovdi@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 07.12.2021; одобрена после рецензирования 21.12.2021; принята к публикации 28.12.2021.

The article was submitted 07.12.2021; approved after reviewing 21.12.2021; accepted for publication 28.12.2021.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Д.Г. Фомин¹, С.Н. Даровских², Н.В. Дударев³, И.И. Прокопов⁴, С.В. Дударев⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

¹ Fomin95@ya.ru

² darovskikhsn@susu.ru

³ dudarevnn@susu.ru

⁴ Prokopov174@mail.ru

⁵ asp20dsv252@susu.ru

Аннотация. Одной из неотъемлемых составных частей современных радиопередающих устройств являются полосно-пропускающие фильтры, выполняющие функцию ограничения внеполосного и побочного спектра электромагнитного излучения, что является необходимым в рамках плотного распределения полос радиочастот между радиослужбами. Аналогичные функции полосно-пропускающие фильтры выполняют в составе радиоприемных устройств и устанавливаются на входе. При этом они также выполняют функцию согласующего устройства между радиоприемным устройством и антенно-фидерным трактом. В настоящее время известны методы разработки полосно-пропускающих фильтров на основе микрополосковой технологии, обладающей такими достоинствами, как: широкая теоретическая база, технологичность изготовления, широкий выбор диэлектрических оснований, возможность моделирования без использования дорогостоящего программного обеспечения. При этом недостатком микрополосковой технологии является необходимость расширения площади диэлектрических оснований при увеличении числа частотно-селективных звеньев. В настоящее время перспективным направлением реализации полосно-пропускающих фильтров является их конструирование на основе многослойной технологии, позволяющей увеличивать число частотно-селективных звеньев без расширения площади диэлектрических оснований. **Цель исследования.** Целью настоящей работы является исследование частотно-селективных свойств вариантов конструкции полосно-пропускающего фильтра на основе многослойной технологии, базовым элементом которой является микрополосковый переход. **Материалы и методы.** Для рассмотренных конструкций полосно-пропускающего фильтра проведено численное электродинамическое моделирование в программе ANSYS HFSS с оценкой зависимости S-параметров в диапазоне частот 0,2–4 ГГц и получено графическое распределение электромагнитного поля в микрополосковом переходе. **Результаты.** Из результатов проведенного моделирования следует, что рассматриваемые конструкции полосно-пропускающего фильтра характеризуются хорошим согласованием с волновым сопротивлением 50 Ом (КСВН не более 1,5 в широком диапазоне частот), малым затуханием на центральной частоте (не более 0,5 дБ), а также значительным подавлением сигнала вне полосы его пропускания (более 30 дБ). **Заключение.** Результаты моделирования доказывают возможность практического применения полосно-пропускающих фильтров, разработанных на основе многослойной технологии, в составе радиопередающих устройств современных систем радиолокации и радионавигации.

Ключевые слова: многослойная технология, микрополосковый переход, полосно-пропускающий фильтр, S-параметры, моделирование

Для цитирования: Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / Д.Г. Фомин, С.Н. Даровских, Н.В. Дударев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 77–87. doi: 10.14529/ctcr220106.

SIMULATION OF BAND PASS FILTERS BASED ON MULTILAYER TECHNOLOGY

Dmitriy G. Fomin¹, Stanislav N. Darovskikh², Nikolay V. Dudarev³,
Igor I. Prokopov⁴, Svyatoslav V. Dudarev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ Fomin95@ya.ru

² darovskikhsn@susu.ru

³ dudarevnn@susu.ru

⁴ Prokopov174@mail.ru

⁵ asp20dsv252@susu.ru

Abstract. One of the integral parts of modern radio transmitting devices are bandpass filters that limit the out-of-band spectrum of electromagnetic radiation and the side effect of electromagnetic radiation, which is important in the framework of the dense distribution of the radio frequency band between radio services. Similar functions of bandpass filters are made as part of radio receivers and placed at the input. At the same time, they also perform the functions of a matching device between the radio receiving connection and the antenna-feeder path. Currently, there are known methods for the development of bandpass filters based on microstrip technology, which has such advantages as: a broad theoretical base, manufacturability, a wide selection of dielectric bases, and the possibility of simulation without using expensive software. At the same time, the disadvantage of microstrip technology is the need to expand the area of dielectric bases with an increase in the number of frequency-selective elements. Currently, a promising direction in the implementation of bandpass filters is their design based on a multilayer technology, which makes it possible to increase the number of frequency-selective elements without expanding the area of dielectric bases.

Purpose of the study. The purpose of this article is to study the frequency-selective properties of design options for a bandpass filter based on multilayer technology, the basic element of which is a microstrip transition. **Materials and methods.** For the considered designs of the bandpass filter, a numerical electro-dynamics simulation was carried out in the ANSYS HFSS software with an estimate of the dependence of the S-parameters in the frequency range of 0.2–4 GHz. The graphical distribution of the electromagnetic field in the microstrip transition was obtained. **Results.** From the results of the simulation it follows that the considered designs of the bandpass filter are characterized by good matching with a wave impedance of 50 Ohm (VSWR no more than 1.5 in a wide frequency range), low attenuation at the center frequency (no more than 0.5 dB), and by significant suppression of a signal outside its bandwidth (more than 30 dB). **Conclusion.** The simulation results prove the possibility of practical application of bandpass filters, developed on the basis of multilayer technology, as part of radio transmitting devices of radar and radio navigation systems.

Keywords: multilayer technology, microstrip transition, bandpass filter, S-parameters, simulation

For citation: Fomin D.G., Darovskikh S.N., Dudarev N.V., Prokopov I.I., Dudarev S.V. Simulation of band pass filters based on multilayer technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):77–87. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220106.

Введение

Неотъемлемой частью современных радиопередающих устройств радиолокационных и радионавигационных систем, а также систем связи являются полосно-пропускающие фильтры (ППФ), выполняющие функции подавления внеполосного спектра электромагнитного излучения [1]. Одним из наиболее распространенных методов конструирования ППФ является применение микрополосковой технологии, достоинствами которой являются технологичность, широкий выбор диэлектрических оснований, возможность схемотехнического моделирования и хорошо разработанная теория конструирования всех типов фильтров [2–9]. Из недостатков микрополосковой технологии следует выделить увеличение габаритных размеров (площади диэлектрических оснований) СВЧ-устройств при увеличении количества частотно-селективных звеньев в составе их конструкций. В свою очередь, увеличение количества частотно-селективных звеньев без увеличения площади диэлектрических оснований возможно за счет использования многослойной технологии, базовым структурным элементом которой является микрополосковый переход. Преимуществом такого подхода является модульность конструкции, отсутствие переходных метал-

лизированных отверстий и реализация принципа бесконтактной электромагнитной связи между слоями [10]. Целью настоящей работы является оценка частотно-селективных свойств многослойных конструкций ППФ на основе микрополоскового перехода в составе передающих устройств современных радиоэлектронных систем.

1. Особенности конструкции многослойного ППФ на основе микрополоскового перехода

Микрополосковый переход представляет собой (рис. 1) конструкцию из двух диэлектрических оснований 1, 2, на каждом из которых расположена микрополосковая линия 3, 4 с обрывом на конце. Между диэлектрическими основаниями расположен металлический экран 5 с вырезанным щелевым резонатором 6, длина которого составляет половину длины волны, соответствующей частоте его основной моды. Микрополосковые линии пересекаются с проекцией щелевого резонатора. Участок микрополосковых линий от места пересечения с проекцией щелевого резонатора до обрыва образует микрополосковый резонатор 7, 8, длина которого составляет четверть длины волны на центральной частоте [11].

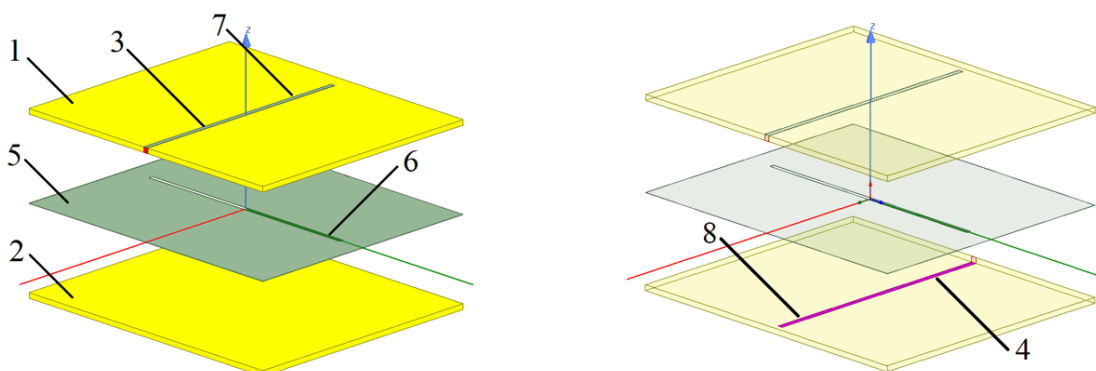


Рис. 1. Модель микрополоскового перехода в программе ANSYS HFSS
Fig. 1. Model of the microstrip transition in ANSYS HFSS software

Особенностью микрополоскового перехода является возможность «возбуждения» многомодового режима его щелевого резонатора (рис. 2), что позволяет расширить диапазон рабочих частот, а также увеличить прямоугольность амплитудно-частотных характеристик коэффициента передачи [12, 13]. Для этого требуется обеспечить необходимое положение микрополосковых линий относительно центра щелевого резонатора (рис. 3, 4). Так, для «возбуждения» первых двух мод щелевого резонатора расстояние между микрополосковыми линиями должно составлять треть длины щелевого резонатора (рис. 3а, 4а); для «возбуждения» первых трех мод – половину длины щелевого резонатора (рис. 3б, 4б).

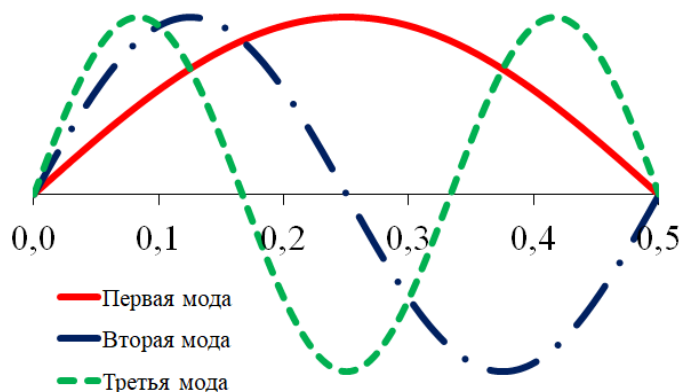


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора, длина которого составляет половину длины волны на частоте, соответствующей его основной моде
Fig. 2. Distribution of the electric field strength along the slot resonator, the length of which is half the wavelength at the frequency corresponding to its first mode

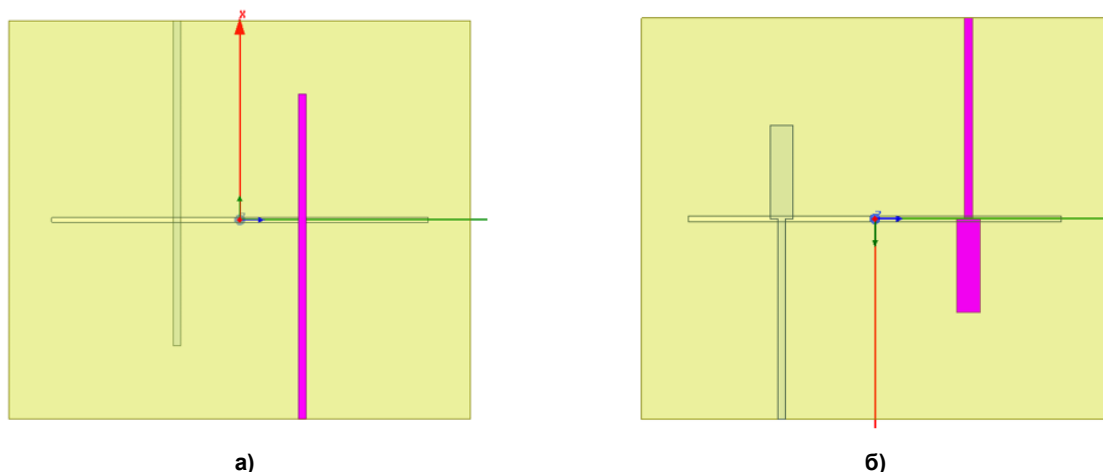


Рис. 3. Расположение микрополосковых линий при «возбуждении»:
а) 1, 2 моды щелевого резонатора; б) 1–3 моды щелевого резонатора
Fig. 3. Location of microstrip lines for “excitation” of:
a) 1, 2 modes of the slot resonator; b) 1–3 modes of a slot resonator

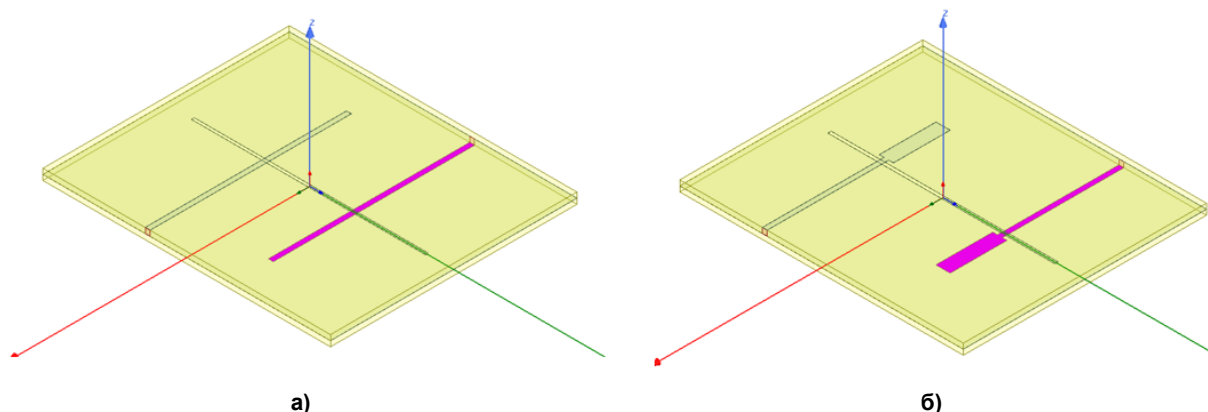


Рис. 4. Расположение микрополосковых линий при «возбуждении»:
а) 1, 2 моды щелевого резонатора; б) 1–3 моды щелевого резонатора
Fig. 4. Location of microstrip lines for “excitation” of:
a) 1, 2 modes of the slot resonator; b) 1–3 modes of a slot resonator

Таким образом, для исследования многомодового режима щелевого резонатора целесообразно рассмотреть следующие варианты конструкции ППФ на основе микрополоскового перехода:

- 1) первая конструкция ППФ (далее – конструкция ППФ № 1) содержит микрополосковый переход, расположение микрополосковых линий которого обеспечивает «возбуждение» основной моды щелевого резонатора (см. рис. 1);
- 2) вторая конструкция ППФ (далее – конструкция ППФ № 2) содержит микрополосковый переход, расположение микрополосковых линий которого обеспечивает «возбуждение» первых двух мод щелевого резонатора (см. рис. 3а, 4а);
- 3) третья конструкция ППФ (далее – конструкция ППФ № 3) содержит микрополосковый переход, расположение микрополосковых линий которого обеспечивает «возбуждение» первых трех мод щелевого резонатора (см. рис. 3б, 4б).

2. Электродинамическое моделирование ППФ

Для исследования трех представленных выше конструкций ППФ (см. рис. 1, 3, 4) проведено численное электродинамическое моделирование в программе ANSYS HFSS. Моделирование было выполнено при использовании суперкомпьютерных ресурсов НИУ ЮУрГУ [14]. При выполнении моделирования были использованы следующие параметры:

- в качестве источника сигнала (волна ТЕМ-типа), поступающего на микрополосковые линии, использованы дискретные порты с волновым сопротивлением 50 Ом;
 - в качестве материала подложки использован ARLON AD1000 толщиной 1,27 мм (относительная диэлектрическая проницаемость 10,2, тангенс угла диэлектрических потерь 0,0023);
 - размеры диэлектрических оснований составляют (70×60) мм.
- Параметры основных элементов конструкций ППФ приведены в табл. 1.

Параметры основных элементов конструкций ППФ

Таблица 1

Parameters of the main elements of BPFs designs

Table 1

Наименование параметра	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Центральная частота, МГц	1000	1500	2000
Ширина микрополосковых резонаторов, мм	1,18	1,18	3,5
Длина микрополосковых резонаторов, мм	27	18	13,9
Ширина щелевого резонатора, мм	0,7	0,7	0,7
Длина щелевого резонатора, мм	56	56	56

Так, длина щелевого резонатора во всех конструкциях была равна 56 мм, что соответствует половине длины волны на частоте 1000 МГц (частота основной моды) с учетом коэффициента её укорочения в диэлектрике. Длина микрополосковых резонаторов соответствует четверти длины волны на центральной частоте для каждой конструкции. Ширина микрополоскового резонатора в составе конструкции ППФ № 3 была определена по результатам моделирования.

3. Результаты моделирования

3.1. S-параметры

В результате моделирования для трех рассматриваемых конструкций ППФ были получены следующие зависимости S-параметров в диапазоне частот 0,2–4 ГГц (рис. 5–7, табл. 2).

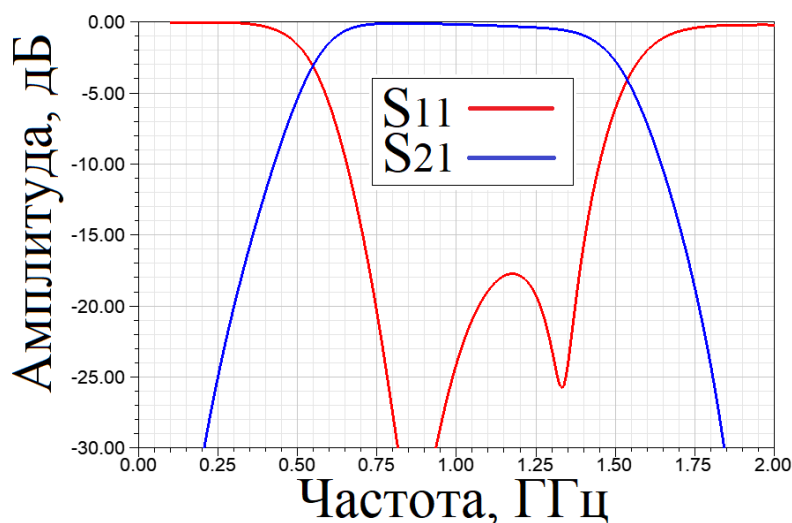


Рис. 5. Зависимости коэффициентов передачи и отражения в диапазоне частот для конструкции ППФ № 1

Fig. 5. Dependences of the transmission and reflection coefficients in the frequency range for the design of BPF No. 1

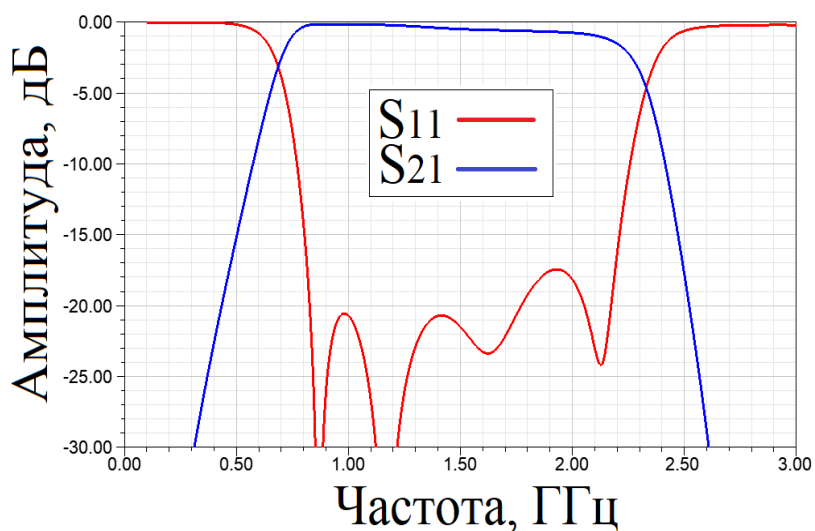


Рис. 6. Зависимости коэффициентов передачи и отражения в диапазоне для конструкции ППФ № 2
Fig. 6. Dependences of the transmission and reflection coefficients in the frequency range for the design of BPF No. 2

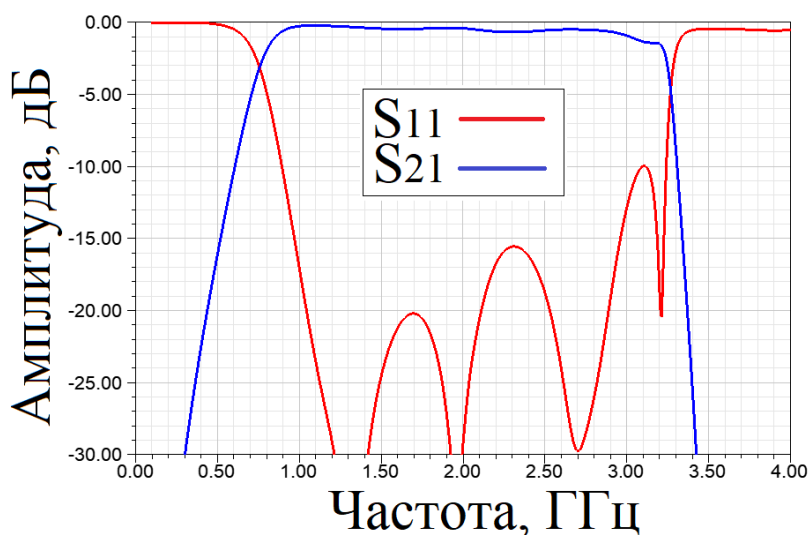


Рис. 7. Зависимости коэффициентов передачи и отражения в диапазоне частот для конструкции ППФ № 3
Fig. 7. Dependences of the transmission and reflection coefficients in the frequency range for the design of BPF No. 3

Амплитудно-частотные характеристики исследуемых ППФ
Amplitude-frequency characteristics of the investigated BPFs

Таблица 2

Table 2

Наименование параметра	Конструкция ППФ № 1	Конструкция ППФ № 2	Конструкция ППФ № 3
Центральная частота, МГц	1000	1500	2000
Затухание на центральной частоте, дБ	0,15	0,5	0,5
Полоса пропускания по уровню -3 дБ	950	1600	2500
Полоса пропускания по уровню -20 дБ	1480	2090	2930
Полоса пропускания по уровню КСВН ≤ 1,5, МГц	720	1420	2030

Из результатов моделирования следует, что рассматриваемые конструкции ППФ характеризуются хорошим согласованием с волновым сопротивлением 50 Ом (КСВН менее 1,5 в широком диапазоне частот), малым затуханием на центральной частоте (не более 0,5 дБ), а также значительным подавлением сигнала вне полосы его пропускания (более 30 дБ).

3.2. Распределение электромагнитных полей

С помощью программы ANSYS HFSS получено распределение электромагнитного поля для каждой из конструкций ППФ (рис. 8–10). Для анализа физического процесса частотно-селективной передачи СВЧ-сигнала с одного порта к другому обратимся к распределению напряженности электрического и магнитного полей (рис. 8) в конструкции ППФ № 1. Так из распределения напряженности магнитного поля (рис. 8а) следует, что его наибольшая амплитуда соответствует месту пересечения проекции щелевого резонатора и микрополосковой линии. Это приводит к «возбуждению» щелевого резонатора, в пространстве которого образуется электрическое поле (рис. 8б), направление которого перпендикулярно магнитному полю.

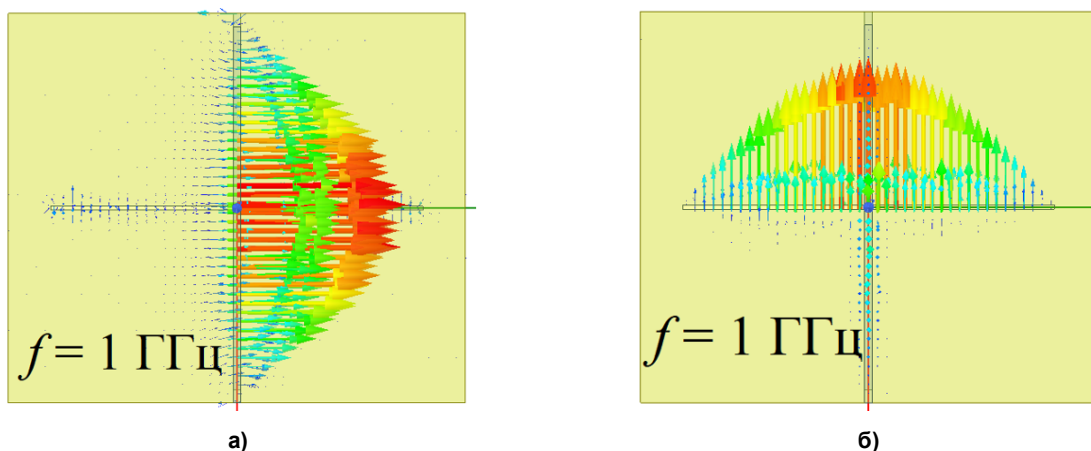


Рис. 8. Распределение: а) напряженности магнитного поля вдоль микрополосковой линии на частоте 1 ГГц для конструкции ППФ № 1; б) напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора на частоте 1 ГГц для конструкции ППФ № 1
Fig. 8. Distribution of: a) magnetic field strength along the microstrip line at a frequency of 1 GHz for the design of BPF No. 1; b) the electric field strength along the slot resonator at a frequency of 1 GHz for the design of BPF No. 1

Аналогичным образом происходит «возбуждение» щелевого резонатора в составе конструкций ППФ № 2 (рис. 9) и № 3 (рис. 10).

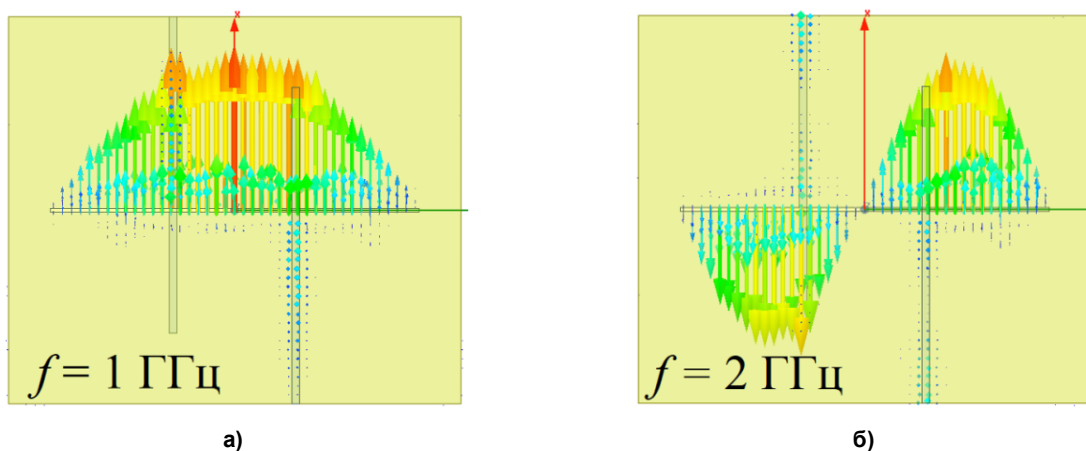


Рис. 9. Распределение напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора на частоте: а) 1 ГГц, б) 2 ГГц для конструкции ППФ № 2
Fig. 9. Distribution of the electric field strength along the slot resonator at the frequency: a) 1 GHz, b) 2 GHz for the design of BPF No. 2

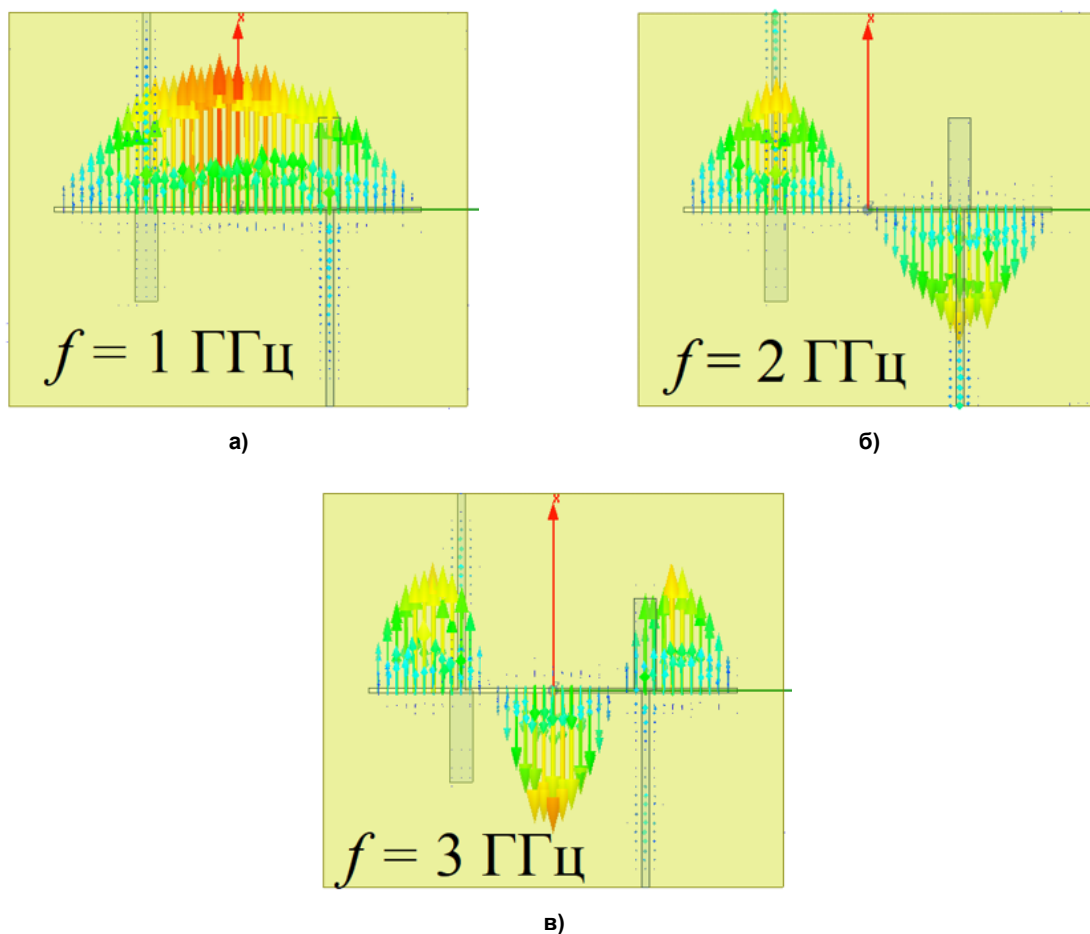


Рис. 10. Распределение напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора на частоте:
а) 1 ГГц, б) 2 ГГц, в) 3 ГГц для конструкции ППФ № 3
Fig. 10. Distribution of the electric field strength along the slot resonator at the frequency:
a) 1 GHz, b) 2 GHz, c) 3 GHz for the design of BPF No. 3

Из представленных распределений напряженности электрического поля (см. рис. 8–10) можно сделать выводы о том, что оно имеет синусоидальный характер с различным периодом его повторения. Это соответствует характеру распределения электрического поля вдоль щелевой линии передачи с коротким замыканием на её конце [15].

Равенство нулю амплитуды напряженности электрического поля в непосредственной близости к коротким краям щелевого резонатора для каждой из конструкций ППФ объясняется выполнением граничных условий для тангенциальной составляющей электрического поля по поверхности металла [16].

Заключение

Результаты проведенного исследования доказывают возможность практического применения полосно-пропускающих фильтров, разработанных на основе многослойной технологии в составе радиопередающих устройств современных систем радиолокации и радионавигации. Так, согласно полученным результатам исследуемые полосно-пропускающие фильтры характеризуются хорошим согласованием с антенно-фидерным трактом 50 Ом ($K_{СВН} \leq 1,5$), затуханием на центральной частоте – не более 0,5 дБ, а также подавлением внеполосного электромагнитного излучения более чем на 30 дБ. Также в работе получены распределения напряженности электрического поля вдоль щелевого резонатора для каждой из представленных конструкций ППФ. Согласно полученным распределениям можно сделать вывод об его синусоидальной зависимости, что соответствует характеру распределения электрического поля вдоль щелевой линии передачи с коротким замыканием на её конце.

Список литературы

1. Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации (статистические данные). URL: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/> (дата обращения: 17.12.2021).
2. Li-Tian Wang, Yang Xiong, Ming He. Review on UWB Bandpass Filters. In book: *UWB Technology – Circuits and Systems*. London, IntechOpen. 2019. URL: <http://doi.org/10.5772/intechopen.87204> (дата обращения: 17.12.2021).
3. Hsu C.-L., Hsu F.-C., Kuo J.-K. Microstrip Bandpass Filters for Ultra-Wideband (UWB) Wireless Communications // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 2005. P. 679–682. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2005.1516698>.
4. Xu L., Zhu T. Design of a Ultra-Wideband (UWB) Filter based on Defected Ground Structure // *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. 2015. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413142>.
5. Han L., Wu K., Zhang X. Development of Packaged Ultra-wideband Bandpass Filters // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010. Vol. 58. P. 220–228. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2036399>.
6. Wang Y.X., Chen Y.L., Zhou W.H., Yang W.C., Zen J. Dual-Band Bandpass Filter Design Using Stub-Loaded Hairpin Resonator and Meandering Uniform Impedance Resonator // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2021. Vol. 95. P. 147–153. doi: 10.2528/PIERL20102102.
7. Wu L., Hu P., Li C., Li L., Tang C. A Novel Compact Microstrip UWB BPF with Quad Notched Bands Using Quad-Mode Stepped Impedance Resonator // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2019. Vol. 83. P. 51–57. doi: 10.2528/PIERL18123002.
8. Gao Y.-Q., Shen W., Wu L., Sun X.-W. Compact Microstrip BPF with High Selectivity Using Extended Tapped Lines // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018. Vol. 80. P. 39–46. doi: 10.2528/PIERL18081303.
9. Liu J., Lu J., He Z., Luo T., Ying X., Zhao J. Super Compact Microstrip UWB BPF with Triple-Notched Bands // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018. Vol. 73. P. 61–67. doi: 10.2528/PIERL17110804.
10. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н., Клыгач Д.С., Вахитов М.Г. Особенности применения объемно-модульной технологии в проектировании СВЧ электронных устройств // *Ural Radio Engineering Journal*. 2021. Т. 5, № 2. С. 91–103. doi: 10.15826/urej.2021.5.2.001.
11. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. Сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр на основе микрополоскового перехода для обеспечения высокого уровня скрытности инфокоммуникационных систем // *Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере*. 2021. № 3(41). С. 30–37. doi: 10.14529/secur210304.
12. Guo X., Zhu L., Wang J., Wu W. Wideband Microstrip-to-Microstrip Vertical Transitions Via Multiresonant Modes in a Slotline Resonator // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2015. Vol. 63, no. 6. P. 1902–1909. doi: 10.1109/TMTT.2015.2422695.
13. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017. Vol. 65. P. 2866–2877. doi: 10.1109/TMTT.2017.2675418.
14. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science // *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018. Chelyabinsk, 2018. P. 1–7. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570068*.
15. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. Сверхширокополосный полосно-пропускающий фильтр на основе многослойного полосково-щелевого перехода // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2021, № 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.13>.
16. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011. 732 p.

References

1. *Tablica raspredeleniya polos radiochastot mezhdu radiosluzhbami Rossijskoj Federacii (statisticheskie dannye)* [Table of distribution of radio frequency bands between the radio services of the Russian Federation (statistical data)]. Available at: <https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/> (accessed 17.12.2021). (In Russ.)
2. Li-Tian Wang, Yang Xiong, Ming He. Review on UWB Bandpass Filters. In book: *UWB Technology – Circuits and Systems*. London, IntechOpen. 2019. Available at: <http://doi.org/10.5772/intechopen.87204> (accessed 17.12.2021).
3. Hsu C.-L., Hsu F.-C., Kuo J.-K. Microstrip Bandpass Filters for Ultra-Wideband (UWB) Wireless Communications. In: *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*; 2005. P. 679–682. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2005.1516698>.
4. Xu L., Zhu T. Design of a Ultra-Wideband (UWB) Filter based on Defected Ground Structure. In: *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*; 2015. P. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413142>.
5. Han L., Wu K., Zhang X. Development of Packaged Ultra-wideband Bandpass Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010;58:220–228. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2009.2036399>.
6. Wang Y.X., Chen Y.L., Zhou W.H., Yang W.C., Zen J. Dual-Band Bandpass Filter Design Using Stub-Loaded Hairpin Resonator and Meandering Uniform Impedance Resonator. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2021;95:147–153. doi: 10.2528/PIERL20102102.
7. Wu L., Hu P., Li C., Li L., Tang C. A Novel Compact Microstrip UWB BPF with Quad Notched Bands Using Quad-Mode Stepped Impedance Resonator. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2019;83:51–57. doi: 10.2528/PIERL18123002.
8. Gao Y.-Q., Shen W., Wu L., Sun X.-W. Compact Microstrip BPF with High Selectivity Using Extended Tapped Lines. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018;80:39–46. doi: 10.2528/PIERL18081303.
9. Liu J., Lu J., He Z., Luo T., Ying X., Zhao J. Super Compact Microstrip UWB BPF with Triple-Notched Bands. *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2018;73:61–67. doi: 10.2528/PIERL17110804.
10. Fomin D.G, Dudarev N.V., Darovskikh S.N., Klygach D. S., Vakhitov M.G. [Specific features of volume-modular technology application in the design of microwave electronic devices]. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(2):91–103. (In Russ.) doi: 10.15826/urej.2021.5.2.001.
11. Fomin D.G, Dudarev N.V., Darovskikh S.N. [Ultra-wideband band-pass filter based on a microstrip transition to ensure a high level of secrecy of infocommunication systems]. *Bulletin of the Ural Federal District. Information security*. 2021;3(41):30–37. (In Russ.) doi: 10.14529/secur210304.
12. Guo X., Zhu L., Wang J., Wu W. Wideband Microstrip-to-Microstrip Vertical Transitions Via Multiresonant Modes in a Slotline Resonator. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2015;63(6):1902–1909. doi: 10.1109/TMTT.2015.2422695.
13. Yang L., Zhu L., Choi W.-W., Tam K.-W. Analysis and design of wideband microstrip-to-microstrip equal ripple vertical transitions and their application to bandpass filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;65:2866–2877. doi: 10.1109/TMTT.2017.2675418.
14. Kostenetskiy P., Semenikhina P. SUSU Supercomputer Resources for Industry and fundamental Science. In: *2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC), Chelyabinsk, 13–15 November 2018*. Chelyabinsk; 2018. P. 1–7. doi: 10.1109/GloSIC.2018.8570068.
15. Fomin D.G, Dudarev N.V., Darovskikh S.N. [Ultra-wideband band-pass filter based on a multi-layer strip-slot transition]. *Journal of Radio Electronics*. 2021;(10). (In Russ.) <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.10.13>
16. Pozar, D.M. *Microwave Engineering*. 4th ed. Hoboken: Wiley; 2011. 732 p.

Информация об авторах

Фомин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; Fomin95@ya.ru.

Даровских Станислав Никифорович, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; darovskikhsn@susu.ru.

Дударев Николай Валерьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; dudarevvn@susu.ru.

Прокопов Игорь Игоревич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; Prokopov174@mail.ru.

Дударев Святослав Валерьевич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; asp20dsv252@susu.ru.

Information about the authors

Dmitriy G. Fomin, postgraduate student of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Fomin95@ya.ru.

Stanislav N. Darovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; darovskikhsn@susu.ru.

Nikolay V. Dudarev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Senior Lecturer of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dudarevvn@susu.ru.

Igor I. Prokopov, postgraduate student of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Prokopov174@mail.ru.

Svyatoslav V. Dudarev, postgraduate student of the Department of Information and Communication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asp20dsv252@susu.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 20.12.2021; одобрена после рецензирования 10.01.2022; принята к публикации 17.01.2022.

The article was submitted 20.12.2021; approved after reviewing 10.01.2022; accepted for publication 17.01.2022.

Управление в социально-экономических системах Control in Social and Economic Systems

Научная статья
УДК 004.6
doi: 10.14529/ctcr220107

МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ СВЯЗАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫХ АКТОВ МЕТОДАМИ NLP

**Валерьян Ринатович Аббазов¹, Владимир Александрович Балуев²,
Андрей Витальевич Мельников³, Михаил Александрович Русанов⁴**

^{1, 2, 3, 4} Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий,

г. Ханты-Мансийск, Россия

¹ abbazov.v.r2000@gmail.com

² baluevva@uriit.ru

³ melnikovav@uriit.ru

⁴ m_rusanov@ugrasu.ru

Аннотация. Современные методы прогнозирования временных рядов позволяют получить весьма точные и качественные прогнозы при наличии ретроспективных данных. Однако результаты работы этих методов определяются объемом и качеством обучающей выборки. Когда временной ряд отсутствует, имеет малое количество точек или вовсе не достоверен, методы прогнозирования временных рядов неэффективны. В таком случае принято использовать подходы для нахождения иных показателей, так или иначе коррелирующих с искомым, далее называемых косвенными показателями. В рамках работы над прогнозированием социально-экономических показателей возникла необходимость в формировании перечня косвенных показателей, однако имеющиеся решения для данной задачи не обеспечивают требуемой достоверности. В большинстве случаев в работах используются данные социальных сетей, форумов и других источников, которые не могут считаться объективными, так как являются выражением субъективной точки зрения и могут быть подвержены умышленным фальсификациям и искажениям. Такие риски неприемлемы при разработке системы, создаваемой для принятия управленческих решений на уровне государства. **Цель исследования:** разработка методов поиска косвенных показателей, основывающихся на объективных источниках информации. Данные методы позволяют сформировать перечень косвенных показателей, не привлекая экспертов и исключая риски некорректности первичных данных. **Материалы и методы.** Исследования проводились на основе нормативно-правовых актов Российской Федерации и ее субъектов. Данный источник был выбран по причине того, что нормативные документы являются объективными и основополагающими документами государства. Они не являются представлением субъективной точки зрения автора или группы лиц. Для эксперимента была собрана часть нормативной базы с 2016 по 2021 год, относящаяся к категориям: сельское хозяйство, медицина, социальная сфера и другие. **Результаты.** Определен метод нахождения косвенных показателей, разработаны и апробированы различные алгоритмы ранжирования косвенных показателей, сформированы косвенные показатели для нескольких социально-экономических показателей. Процесс выявления косвенных показателей построен на применении методов Data Mining и NLP к базе данных нормативно-правовых актов Российской Федерации. **Заключение.** Полученное решение позволило сформировать список N-грамм, связанных с искомым показателем. На данном этапе интерпретация N-граммы в показатель производится с помощью эксперта, однако для этого не требуется иметь компетенций в предметной области показателя.

Ключевые слова: социально-экономические показатели, N-грамма, показатель деятельности ВДЛ, data mining, NLP

Для цитирования: Метод нахождения связанных показателей на основе анализа нормативно-правовых актов методами NLP / В.Р. Аббазов, В.А. Балуев, А.В. Мельников, М.А. Русанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 88–96. doi: 10.14529/ctcr220107.

METHOD OF FINDING RELATED INDICATORS BASED ON ANALYSIS OF REGULATORY LEGAL ACTS BY NLP METHODS

Valer'yan R. Abbazov¹, Vladimir A. Baluev², Andrey V. Melnikov³, Mikhail A. Rusanov⁴

^{1, 2, 3, 4} Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia

¹ abbazov.v.r2000@gmail.com

² baluevva@uriit.ru

³ melnikovav@uriit.ru

⁴ m_rusanov@ugrasu.ru

Abstract. Modern methods of forecasting time series allow us to obtain very accurate and high-quality forecasts in the presence of retrospective data. However, the results of these methods are determined by the volume and quality of the training sample. When a time series is missing, has a small number of points, or is not reliable at all, time series forecasting methods are ineffective. In this case, it is customary to use approaches to find other indicators that somehow correlate with the desired one, hereinafter referred to as indirect indicators. As part of the work on forecasting socio-economic indicators, it became necessary to form a list of indirect indicators, however, the available solutions for this task do not provide the required reliability. In most cases, these works use data from social networks, forums and other data sources that cannot be considered objective. Since they are an expression of a subjective point of view and may be subject to deliberate falsifications and distortions. Such risks are unacceptable when developing a system created for making managerial decisions at the state level. **Aim.** Development of methods for searching for indirect indicators based on objective sources of information. These methods make it possible to form a list of indirect indicators without involving experts and eliminating the risks of inaccuracy of primary data. **Materials and methods.** The research was conducted on the basis of regulatory legal acts of the Russian Federation and its subjects. This source was chosen because regulatory documents are objective and fundamental documents of the state. They are not a representation of the subjective point of view of the author or a group of persons. For the experiment, a part of the regulatory framework from 2016 to 2021 was collected, related to the categories: agriculture, medicine, social sphere and others. **Results.** The method of finding indirect indicators is defined, various algorithms for ranking indirect indicators are developed and tested, indirect indicators for several socio-economic indicators are formed. The process of identifying indirect indicators is based on the application of Data Mining and NLP methods to the database of regulatory legal acts of the Russian Federation. **Conclusion.** The resulting solution allowed us to form a list of N-grams associated with the desired indicator. At this stage, the interpretation of the N-gram into an indicator is carried out with the help of an expert, however, this does not require having competencies in the subject area of the indicator.

Keywords: socio-economic indicators, N-gram, VDL activity indicator, data mining, NLP

For citation: Abbazov V.R., Baluev V.A., Melnikov A.V., Rusanov M.A. Method of Finding Related Indicators Based on Analysis of Regulatory Legal Acts by NLP Methods. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):88–96. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220107.

Введение

Для решения задачи расчета и прогнозирования показателей эффективности высших должностных лиц необходимо было решить подзадачу сбора первичных данных для расчета показателя и его дальнейшего прогнозирования. В методике расчета данных показателей приведены первичные и их источники, но лишь для некоторых показателей. Первичные данные для оставшихся показателей было необходимо искать в публичных источниках, статистических сборниках и различных отчетах. Для оценки применимости найденных первичных данных было выделено три критерия:

- **объем** – количество точек временного ряда. Чем больше объем, тем лучше модели прогнозирования смогут определить закономерности временного ряда;
- **детализация** – временной интервал между близлежащими точками временного ряда. Так как прогноз показателей деятельности ВДЛ требовался с детализацией по кварталам, то первичные данные с интервалом более года неприменимы (методы интерполяции могли упустить важные закономерности, происходящие в рамках одного года);

● **достоверность** – определяет объективность первичных данных. Достоверными первичными данными являются те, что являются физически исчисляемыми (рождаемость, количество построенных школ, доход населения) и предоставляются специализированными службами, такими как Росстат. В качестве примера недостоверного источника информации можно привести первичные данные, полученные в результате социального опроса, проведенного СМИ. Даже если опрос был проведен корректно, а его результаты могут являться статистически значимыми, то необходимы исследование и проверка корректности каждого такого прогноза, что многократно увеличивает трудозатраты.

В случае если первичные данные соответствовали всем трем критериям, то они были использованы для дальнейших расчетов и прогнозирования. Ожидаемо, что далеко не все первичные данные соответствовали объявленным критериям, более того, для части показателей найти пригодные первичные данные не удалось вовсе.

Для решения задач расчета и прогнозирования показателей, не имеющих первичных данных, было принято решение о разработке метода поиска косвенных показателей, где **косвенный показатель** – это показатель, позволяющий дать оценку динамики изменения для искомого показателя любым другим способом, отличным от описанного в методике расчета [1].

1. Обзор литературы

Анализ публикаций показал, что для задач отбора косвенных показателей, как правило, прибегают к экспертному подходу или рассматривают случай, когда искомым показателем известен и необходимо проверить гипотезу связи искомого показателя с косвенным или набором косвенных показателей [2–7]. В противном случае прибегают к построению графов знаний [8–10], которые позволяют выделить связанные с искомым показателем факторы.

Стоит выделить ряд статей, использующих машинное обучение для интеллектуального анализа текстов для выявления связи расчетного показателя с набором косвенных показателей. Например, в статье [2], в которой описан подход, использующий интеллектуальный анализ текста на основе китайских финансовых новостей в Интернете, для предсказания тенденции цены акций на основе метода опорных векторов. Было обработано более 2 млн новостей в период 2008–2015 годов. С использованием корпуса новостей формируются словарь стоп-слов и точный словарь тональности. На основе описанного корпуса предлагается оригинальная модель прогнозирования с использованием SVM.

Стоит отметить достаточно большое количество статей, посвященных графам знаний. Так, в статье [8] описывается подход для построения тематических графов знаний о мировых событиях на основе газетных статей и показано, что сущности, извлеченные из таких графов, улучшают прогнозы промышленного производства США, Германии и Японии. Для проверки модели использовался корпус из более миллиарда новостных статей за период с 2015 по 2021 год.

Описанные в литературе подходы формирования косвенных показателей можно разделить на три класса: методы на основе экспертной оценки, методы на основе использования графа знаний и методы, использующие инструменты Data Mining.

Экспертный подход обладает рядом недостатков. Во-первых, показатели ВДЛ относятся к слишком разрозненным предметным областям (экономика, здравоохранение, образование, строительство и т. д.), что требует привлечения одного, а лучше нескольких экспертов для анализа каждой предметной области. Во-вторых, экспертный подход является субъективным, при котором невозможно сформулировать строгие критерии отбора косвенных показателей. Не редки случаи, когда эксперты в одной предметной области могут быть не согласны с решениями друг друга. В-третьих, эксперт не всегда способен выявить неявные зависимости. Связь расчетного с косвенным показателем не обязательно может быть интерпретируема.

Основанный на графах знаний подход к построению косвенных показателей также обладает рядом недостатков. Например, в [8, 9] построения графа знаний на основе использования технологий Data Mining описывают процесс обработки новостных заголовков, анализа социальных сетей либо использования глобальных графов знаний, таких как GDELT [11]. Ввиду специфики решаемой задачи основываться на данных из социальных сетей или новостных статей не представляется возможным, так как данные источники не объективны и могут включать в себя умышленные искажения информации.

Помимо этого, большинство подходов, основанных на графах знаний, связывает то, что в качестве вершин графа выступают именованные сущности, полученные в результате NER (Named Entity Recognition) [12–14]. Это не применимо для решаемой нами задачи, так как названия показателей деятельности ВДЛ именованными сущностями не являются. Возможно применить метод построения графа знаний, основывающегося на словах или словосочетаниях, но данный инструментарий не гарантирует получения приемлемого результата в нашем случае, а также сложен и трудозатратен.

В рамках данной работы предлагается использовать методы, которые используют инструменты Data Mining, требующие определения подходящих первоисточников текстовых данных, а также разработки методов агрегации и интерпретации полученных результатов.

2. Модуль извлечения N-грамм, полученных на основе анализа базы данных НПА

В качестве обучающей выборки было решено использовать корпус данных нормативно-правовых актов (НПА) Российской Федерации. Источником получения НПА стал «Официальный интернет-портал правовой информации» [15], являющийся федеральным информационным ресурсом. На данном ресурсе содержатся все правовые акты федерального уровня, уровня субъектов Федерации и муниципальных образований. Данный ресурс насчитывает порядка двух миллионов документов, относящихся к Российской Федерации.

Для проведения эксперимента были использованы только наиболее актуальные нормативно-правовые акты. Размер датасета составил более 180 тысяч документов различных тематик, таких как медицина, сельское хозяйство, строительство и прочие.

Для того чтобы сформировать из каждого текста датасета набор N-грамм, был разработан следующий алгоритм.

1. Текст проходит этап предобработки с помощью регулярных выражений, с целью удаления всех символов, кроме русскоязычных букв и знаков пунктуации.
2. Текст разделяется на предложения.
3. Для каждого предложения проводится синтаксический разбор.
4. На основе синтаксического разбора формируются N-граммы из последовательно связанных слов длиной от одного до трех слов.
5. Все слова в N-грамме лемматизируются.
6. Полученная N-грамма заносится в базу данных, сохраняя ссылку на исходный документ.

Разбивка текста на предложения, а также синтаксический разбор предложения осуществлялся с помощью библиотеки *Natasha* [16], а для лемматизации была использована библиотека *ru morphology2* [17].

3. Модуль ранжирования N-грамм

Для того чтобы определить косвенные показатели, необходимо сформировать некое структурированное представление всех полученных ранее 130 миллионов N-грамм. Данное представление должно быть устроено таким образом, чтобы N-граммы с самыми высокими оценками были наиболее семантически близки к названиям косвенных показателей.

В качестве критерия ранжирования была выбрана частотность взаимного упоминания N-грамм. Будем считать, что две N-граммы взаимно упоминаются, если они встречаются в одном тексте. Таким образом, в качестве входного параметра процедура ранжирования получает название целевого показателя, который также преобразуется в N-грамму, а на выходе выдает список всех N-грамм, встречающихся в одном тексте с целевой.

Опишем этапы построения алгоритма ранжирования списка N-грамм, включая его апробацию.

В первую очередь рассмотрим самый простой подход – ранжирование по количеству взаимных упоминаний. При использовании данного подхода N-граммами с самой высокой оценкой будут N-граммы, которые больше всего встречались в одном документе с целевой N-граммой. Преимущество данного подхода в полноте выдачи, так как ни одна N-грамма не будет исключена из итогового списка. Однако это же будет и слабой стороной данного алгоритма, поскольку приводит к слишком высокому зашумлению результатов. При использовании данного алгоритма на вершине выдачи будут появляться такие N-граммы, как «Российская Федерация», «постановле-

ние», «год», «проект» и т. п. Таким образом, наивысшая оценка будет у N-грамм, выполняющих служебную роль в предложении, а не содержательную. Следовательно, необходим алгоритм, позволяющий избавиться от слишком часто употребляемых N-грамм, которые присущи практически каждому документу из корпуса НПА и не определяют семантику для расчетного показателя.

В следующей версии алгоритма ранжирования была доработана формула расчета оценки таким образом, что слишком частотные N-граммы, которые встречались во всем корпусе, получали уменьшающий коэффициент, а редкие N-граммы – наоборот, увеличивающий. Данный коэффициент рассчитывался методом аналогично методу TF-IDF [18]. Формула расчета оценки N-граммы выглядела следующим образом:

$$\text{Score} = \left(1 - \frac{\text{Total Mentioning}}{\text{Max Total Mentioning}}\right) \cdot \text{Cross Mentioning}, \quad (1)$$

где Score – оценка ранжирования для N-граммы; Total Mentioning – количество упоминаний N-граммы в корпусе; Max Total Mentioning – количество упоминаний одной N-граммы в корпусе; Cross Mentioning – количество упоминаний N-граммы с целевой N-граммой в одних документах.

При использовании данного подхода слишком частотные N-граммы, аналогично «стоп-словам», получают околонулевые значения. Однако при использовании данного подхода количество неинформативных N-грамм сократилось незначительно. Причем наивысшую оценку имели односоставные N-граммы. Причиной этого стал тот фактор, что, даже имея невысокий множитель, высокочастотная N-грамма встречалась в каждом документе. Поэтому при перемножении коэффициента на количество всех упоминаний, а их может быть больше, чем количество текстов с целевой N-граммой, значения оказывались выше других.

Также проводилась апробация формулы (1) с заменой Max Total Mentioning на Max Cross Mentioning, то есть на максимальную частоту среди документов, содержащих целевую N-грамму, а не всего корпуса. В этом случае качественного улучшения ранжированной выдачи не наблюдалось.

Проанализировав результаты вышеописанных апробаций, было выявлено, что одной лишь оценки, учитывающей частотность N-граммы, недостаточно. Необходимы дополнительные критерии фильтрации, например, такие как добавление порогового значения количества упоминаний N-граммы в корпусе и в документах в целевом множестве.

С учетом всего вышесказанного был предложен следующий алгоритм ранжирования. Множеством всех N-грамм считаются все N-граммы, полученные из корпуса нормативно-правовых

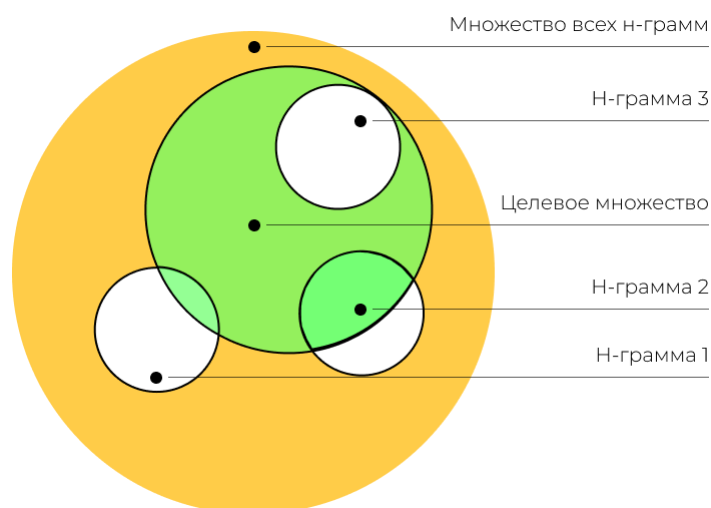


Рис. 1. Множество всех N-грамм
Fig. 1. Set of all N-grams

актов (рис. 1). Целевым множеством являются N-граммы, встречающиеся с N-граммой искомого показателя в одном документе. Причем N-граммы из целевого множества можно условно поделить на 3 типа.

1. N-грамма почти не встречается в целевом множестве или не встречается вовсе.
2. N-грамма встречается в целевом множестве и в остальной части множества N-грамм.
3. N-грамма встречается только в целевом множестве.

Наиболее значимы при построении расчетного показателя являются N-граммы 2-го и 3-го типов. N-граммы 3-го типа и N-грамма расчетного показателя

имеют между собой родительскую связь, а следовательно, это лучшие кандидаты для косвенного показателя, так как вероятнее всего расчетный показатель формируется на основе дочерних. N-граммы 2-го типа интересны в том случае, когда пересечение данных множеств значительно и можно допустить наличие семантической связи между N-граммами.

В предлагаемом алгоритме при ранжировании N-грамм 3-го типа могут встретиться N-граммы, которые имеют низкое количество упоминаний, при этом не являясь содержатель-

ными. Для отсеивания подобных случаев необходимо ввести пороговое значение количества упоминаний.

В итоге мы получаем следующий алгоритм ранжирования: для каждой N-граммы, входящей в целевое множество, определяется оценка, равная отношению упоминаний данной N-граммы в целевом множестве к количеству упоминаний данной N-граммы во всем корпусе, при этом исключаются все N-граммы, количество упоминаний которых ниже заданного порогового значения.

Так как пороговое значение существенно зависит от расчетного показателя, то его значение должен определять эксперт опытным путем.

4. Эксперимент

На основе разработанной общей методики с применением созданных программных решений, описанных выше, был проведен эксперимент по прогнозированию показателя деятельности ВДЛ «Численность населения субъекта Российской Федерации».

На основе названия показателя деятельности производим выбор N-граммы: «население, численность».

Производим поиск среди N-грамм собранного датасета НПА и отбираем документы, в которых встречается искомая N-грамма. После этого формируем список всех N-грамм, встречающихся в этих документах. На текущем корпусе НПА для данного показателя деятельности ВДЛ извлечено 3 075 584 N-грамм. Большая их часть малоинформативна, поэтому следующим этапом проводим ранжирование полученного результата.

Эксперт, используя разработанный программный продукт, имеет возможность вручную фильтровать список полученных N-грамм по критерию оценки и количеству упоминаний и выбрать семантически близкие кандидаты для косвенных показателей из списка N-грамм. Пример интерфейса программного продукта представлен на рис. 2.

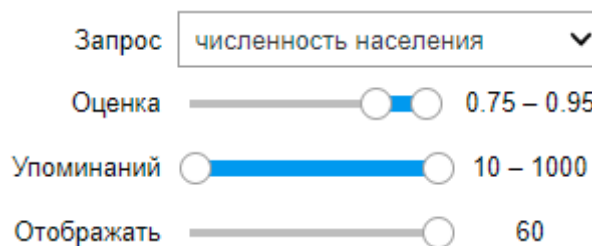


Рис. 2. Пример интерфейса программного продукта
Fig. 2. Example of a product program

Пример полученных N-грамм представлен в таблице.

Пример полученных N-грамм
An example of the obtained N-grams

N-грамма	Количество упоминаний	Оценка
Миграционный, убыль	96	0,989691
Подразделение, расположить, территория	91	0,989130
Посёлок, расположить, территория	90	0,989011
Возраст, дифференциация, норматив	81	0,987805
Возраст, дифференциация	81	0,987805
Обслуживающий, фельдшерский	72	0,986301
Медицинский, организация, подушевой	71	0,986111

Для текущего показателя выделены следующие косвенные показатели:

- 1) ожидаемая продолжительность жизни при рождении, число лет;
- 2) число родившихся;
- 3) число умерших;
- 4) миграционный прирост, убыль;
- 5) численность врачей;
- 6) численность лиц, которым оказана помощь амбулаторно и при выездах.

Выводы

Полученное решение позволило сформировать список N-грамм, связанных с искомым показателем. На данном этапе интерпретация N-граммы в показатель производится с помо-

щью эксперта, однако для этого не требуется иметь компетенции в предметной области показателя.

Стоит отметить, что авторам не известен способ валидации подобных решений. В качестве аргумента в пользу работоспособности данного метода можно привести тот факт, что для показателя «Численность населения» были найдены все указанные в методике расчета показателей ВДЛ переменные: число родившихся, число умерших, показатель миграции. Также в результатах апробации на других показателях ВДЛ были получены логичные, но не очевидные на первый взгляд показатели, например, для показателя «Продолжительность жизни при рождении» был найден косвенный показатель «Численность среднего медицинского персонала» и «Уровень бедности».

Также косвенной валидацией метода поиска связанных показателей на основе анализа нормативно-правовых актов методами NLP может служить объединение прогнозов косвенных показателей и сравнение объединенного прогноза с временным рядом показателя по метрике SMAPE. Для показателей «Население субъекта РФ» и «Ожидаемая продолжительность жизни при рождении» результаты расчета оценки по метрике SMAPE получились 2,3 и 6,6 % соответственно.

Вместе с тем следует отметить важную роль эксперта при интерпретации получаемых N-грамм и выборе кандидатов на косвенные показатели. Снизить субъективизм оценки эксперта возможно путем создания рекомендательной системы, базирующейся на основе метода автоматического определения параметров ранжирования N-грамм.

Список литературы

1. Об утверждении методик расчета показателей для оценки эффективности деятельности высших должностных лиц (руководителей высших исполнительных органов государственной власти) субъектов Российской Федерации и деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации: постановление Правительства Рос. Федерации от 03 апреля 2021 г. № 542. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560760968> (дата обращения: 21.12.2021).
2. Yancong Xie, Hongxun Jiang. Stock market forecasting based on text mining technology: A support vector machine method. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1909.12789> (дата обращения: 21.12.2021).
3. F. Swen Kuh, Grace S. Chiu, Anton H. Westveld. Modeling National Latent Socioeconomic Health and Examination of Policy Effects via Causal Inference. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1911.00512> (дата обращения: 21.12.2021).
4. Isao Yagi, Yuji Masuda, Takanobu Mizuta. Analysis of the Impact of High-Frequency Trading on Artificial Market Liquidity. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2010.13038> (дата обращения: 21.12.2021).
5. Qi-Qiao He, Patrick Cheong-Iao Pang, Yain-Whar Si. Multi-source Transfer Learning with Ensemble for Financial Time Series Forecasting. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.15593> (дата обращения: 21.12.2021).
6. Dilusha Weeraddana, Nguyen Lu Dang Khoa, Lachlan O Neil, Weihong Wang, Chen Cai. Energy consumption forecasting using a stacked nonparametric Bayesian approach. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2011.05519> (дата обращения: 21.12.2021).
7. Rajapaksha D., Bergmeir C., Hyndman R.J. LoMEF: A Framework to Produce Local Explanations for Global Model Time Series Forecasts. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2111.07001.pdf> (дата обращения: 21.12.2021).
8. Sonja Tilly, Giacomo Livan. Macroeconomic forecasting with statistically validated knowledge graphs. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2104.10457> (дата обращения: 21.12.2021).
9. Jie Huang, Kevin Chen-Chuan Chang, Jinjun Xiong, Wen-mei Hwu. Open relation modeling: Learning to define relations between entities. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2108.09241> (дата обращения: 21.12.2021).
10. Madhav Nimishakavi, Uday Singh Saini, Partha Talukdar. Relation schema induction using tensor factorization with side information. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1605.04227> (дата обращения: 21.12.2021).
11. Yihong Yuan. Modeling Inter-country Connection from Geotagged News Reports: A Time-Series Analysis. 2017. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61845-6_19 (дата обращения: 21.12.2021).

12. Badgajar A., Chen S., Wang A., Yu K., Intrevado P., Brizan D.G. Quantum Criticism: A Tagged News Corpus Analysed for Sentiment and Named Entities. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.05267> (дата обращения: 21.12.2021).

13. Tosin P. Adewumi, Foteini Liwicki, Marcus Liwicki. Word2Vec: Optimal Hyper-Parameters and Their Impact on NLP Downstream Tasks. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2003.11645> (дата обращения: 21.12.2021).

14. Shuxiao Chen, Koby Crammer, Hangfeng He, Dan Roth, Weijie J. Su. Weighted Training for Cross-Task Learning. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2105.14095> (дата обращения: 21.12.2021).

15. Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://pravo.gov.ru/> (дата обращения: 21.12.2021).

16. Veselov D., Kukushkin A., Zamaraev A.N., Yarantsev D., Tihonov S. Solves basic Russian NLP tasks, API for lower level Natasha projects. 2021. URL: <https://github.com/natasha/natasha/> (дата обращения: 21.12.2021).

17. Korobov M. Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages. 2015. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-26123-2_31 (дата обращения: 21.12.2021).

18. Juan Ramos. Using TF-IDF to Determine Word Relevance in Document Queries. 2003. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.1424&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 21.12.2021).

References

1. *Ob utverzhdenii metodik rascheta pokazateley dlya otsenki effektivnosti deyatel'nosti vysshikh dolzhnostnykh lits (rukovoditeley vysshikh ispolnitel'nykh organov gosudarstvennoy vlasti) sub"ektov Rossiyskoy Federatsii i deyatel'nosti organov ispolnitel'noy vlasti sub"ektov Rossiyskoy Federatsii* [On the approval of methods for calculating performance indicators of the supreme executive bodies of state power of the constituent entities of the Russian Federation and the activities of executive bodies of the constituent entities of the Russian Federation]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/560760968> (accessed 21 December 2021).

2. Yancong Xie, Hongxun Jiang. *Stock market forecasting based on text mining technology: A support vector machine method*. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1909.12789> (accessed 21 December 2021).

3. F. Swen Kuh, Grace S. Chiu, Anton H. Westveld. *Modeling national latent socioeconomic health and examination of policy effects via causal inference*. 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1911.00512> (accessed 21 December 2021).

4. Isao Yagi, Yuji Masuda, Takanobu Mizuta. *Analysis of the Impact of High-Frequency Trading on Artificial Market Liquidity*. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2010.13038> (accessed 21 December 2021).

5. Qi-Qiao He, Patrick Cheong-Iao Pang, Yain-Whar Si. *Multi-source Transfer Learning with Ensemble for Financial Time Series Forecasting*. 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2103.15593> (accessed 21 December 2021).

6. Dilusha Weeraddana, Nguyen Lu Dang Khoa, Lachlan O Neil, Weihong Wang, Chen Cai. *Energy consumption forecasting using a stacked nonparametric Bayesian approach*. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2011.05519> (accessed 21 December 2021).

7. Rajapaksha D., Bergmeir C., Hyndman R.J. *LoMEF: A Framework to Produce Local Explanations for Global Model Time Series Forecasts*. 2021. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2111.07001.pdf> (accessed 21 December 2021).

8. Sonja Tilly, Giacomo Livan. *Macroeconomic forecasting with statistically validated knowledge graphs*. 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2104.10457> (accessed 21 December 2021).

9. Jie Huang, Kevin Chen-Chuan Chang, Jinjun Xiong, Wen-mei Hwu. *Open relation modeling: Learning to define relations between entities*. 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2108.09241> (accessed 21 December 2021).

10. Madhav Nimishakavi, Uday Singh Saini, Partha Talukdar. *Relation schema induction using tensor factorization with side information*. 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1605.04227> (accessed 21 December 2021).

11. Yihong Yuan. *Modeling Inter-country Connection from Geotagged News Reports: A Time-Series Analysis*. 2017. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61845-6_19 (accessed 21 December 2021).
12. Badgajar A., Chen S., Wang A., Yu K., Intrevado P., Brizan D.G. *Quantum Criticism: A Tagged News Corpus Analysed for Sentiment and Named Entities*. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2006.05267> (accessed 21 December 2021).
13. Tosin P. Adewumi, Foteini Liwicki, Marcus Liwicki. *Word2Vec: Optimal Hyper-Parameters and Their Impact on NLP Downstream Tasks*. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2003.11645> (accessed 21 December 2021).
14. Shuxiao Chen, Koby Crammer, Hangfeng He, Dan Roth, Weijie J. Su. *Weighted Training for Cross-Task Learning*. 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2105.14095> (accessed 21 December 2021).
15. *Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii* [Official Internet portal of legal information] Available at: <http://pravo.gov.ru/> (accessed 21 December 2021).
16. Veselov D., Kukushkin A., Zamaraev A.N., Yarantsev D., Tihonov S. *Solves basic Russian NLP tasks, API for lower level Natasha projects*. 2021. Available at: <https://github.com/natasha/natasha/> (accessed 21 December 2021).
17. Korobov M. *Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages*. 2015. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-26123-2_31 (accessed 21 December 2021).
18. Juan Ramos. *Using TF-IDF to Determine Word Relevance in Document Queries*. 2003. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.1424&rep=rep1&type=pdf> (accessed 21 December 2021).

Информация об авторах

Аббазов Валерьян Ринатович, программист информационно-аналитического отдела, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, г. Ханты-Мансийск, Россия; abbazov.v.r2000@gmail.com.

Балуев Владимир Александрович, руководитель центра информационно-аналитических систем, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, г. Ханты-Мансийск, Россия; baluevva@uriit.ru.

Мельников Андрей Витальевич, д-р техн. наук, проф., директор, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, г. Ханты-Мансийск, Россия; melnikovav@uriit.ru.

Русанов Михаил Александрович, старший преподаватель института цифровой экономики, Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, г. Ханты-Мансийск, Россия; m_rusanov@ugrasu.ru.

Information about the authors

Valer'yan R. Abbazov, programmer of Information Analysis Department, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; abbazov.v.r2000@gmail.com.

Vladimir A. Baluev, head of the Center for Information and Analytical Systems, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; baluevva@uriit.ru.

Andrey V. Melnikov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., director, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; melnikovav@uriit.ru.

Mikhail A. Rusanov, senior lecturer of the Institute of Digital Economy, Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russia; m_rusanov@ugrasu.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 23.12.2021; одобрена после рецензирования 12.01.2022; принята к публикации 18.01.2022.

The article was submitted 23.12.2021; approved after reviewing 12.01.2022; accepted for publication 18.01.2022.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПРЕДПРИЯТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО СЕКТОРА

Олег Иванович Дранко¹, Евгений Владимирович Благодарный²

¹ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,

г. Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

г. Москва, Россия

¹ olegdranko@gmail.com

² blagodarny@phystech.edu

Аннотация. Управление организациями существенно зависит от выбора критериев функционирования и развития. На начальном этапе перехода к рыночной экономике основным критерием для многих российских организаций являлся денежный поток. При условии достаточного денежного потока основным критерием является прибыль (финансовый результат). Недостатком этого критерия является его краткосрочность. В данной работе освещается подход к управлению, направленный на создание стоимости. Этот подход широко используется в практике управления западными организациями, но является достаточно новым для России и требует адаптации для применения на российских организациях. **Цель исследования.** Основной целью исследования является выработка моделей и методов повышения эффективности организаций реального сектора. В данной работе рассматривается разработка модели оценки стоимости организации доходным методом с использованием дисконтированных денежных потоков. Рассматривается вопрос создания/разрушения (увеличения или уменьшения) стоимости при росте выручки. Для многих российских организаций рост бизнеса сопровождается уменьшением стоимости. Разработан критерий создания стоимости, несоблюдение которого при росте выручки будет приводить к разрушению (уменьшению) стоимости. **Материалы и методы.** Использована двухпериодная модель оценки стоимости в аналитическом виде. Модель стоимости разработана для «зрелых» организаций, которые могут характеризоваться стабильными параметрами развития: операционной прибылью и капиталоемкостью. **Результаты.** В качестве объекта исследования рассмотрена одна из крупнейших металлургических организаций России. Собраны и обработаны исходные данные по финансово-экономическому состоянию этой организации. Модель оценки стоимости применена к одной из металлургических компаний России. Точность результатов расчетов по оценке стоимости составила 6 % по отношению к фактической рыночной цене, что можно признать удовлетворительным результатом. **Заключение.** Данный подход позволил упростить оценку стоимости компании и выработать комплекс мероприятий по повышению (а не снижению) ее стоимости. Увеличение выручки инвестиционно непривлекательной компании приводит к разрушению (уменьшению) ее стоимости. Вместо положительного результата стейкхолдеры получают отрицательный при внешне благополучной динамике развития организации. Предложенная модель является типовой и может применяться для анализа развития многих «зрелых» организаций.

Ключевые слова: модель оценки стоимости организации, Value-Based Management, создание/разрушение стоимости; инвестиционная привлекательность, рост бизнеса, имитационное моделирование

Для цитирования: Дранко О.И., Благодарный Е.В. Модель оценки стоимости на примере предприятия металлургического сектора // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 97–105. doi: 10.14529/ctcr220108.

MODEL OF VALUATION ON THE EXAMPLE OF THE METALLURGICAL ENTERPRISE

Oleg I. Dranko¹, Evgeniy V. Blagodarnyy²

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

¹ olegdranko@gmail.com

² blagodarnyy@phystech.edu

Abstract. The management of organizations essentially depends on the choice of criteria for the functioning and development. At the initial stage of the transition to a market economy, the main criterion for many Russian organizations was cash flow. The following criterion is the net income (financial result), provided sufficient cash flow. The disadvantage of this criterion is its short duration. This paper highlights the value creation approach to management. This approach is widely used in managing Western organizations, but it is pretty new for Russia and requires adaptation in Russian organizations. **Purpose of the study.** The study's primary purpose is to develop models and methods to improve the efficiency of organizations in the real sector. This paper discusses the development of a model for assessing the value of an organization by the income method using discounted cash flows. The issue of creation/destruction (increase or decrease) of value with an increase in revenue is being considered. For many Russian organizations, business growth is accompanied by a decrease in value. A criterion for creating value has been developed, non-observance of which will lead to the destruction (increase) of value with an increase in revenue. **Materials and methods.** A two-period model for evaluating the cost in an analytical form was used. The value model is designed for "mature" organizations characterized by stable development parameters: operational profitability and capital-to-output ratio. **Results.** One of the largest metallurgical organizations in Russia is considered as the object of research. Collected and processed initial data on the financial and economic condition of this organization. The valuation model was applied to one of the metallurgical companies in Russia. The accuracy of the calculation results for the valuation was 6% in relation to the actual market price, which can be considered a satisfactory result. **Conclusion.** This approach simplifies the assessment of the company's value and develops measures to increase (rather than reduce) its value. An increase in the revenue of an unattractive investment company leads to its value destruction (decrease). Instead of a positive result, stakeholders get a negative one, given the seemingly favorable dynamics of the organization's development. The proposed model is typical and can be used to analyze the development of many "mature" organizations.

Keywords: business valuation model, Value-Based Management, value creation/destruction, investment attractiveness, business growth, simulation

For citation: Dranko O.I., Blagodarnyy E.V. Model of valuation on the example of the metallurgical enterprise. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):97–105. (In Russ.). doi: 10.14529/ctcr220108.

Введение

Подходы к управлению компанией, как и философия, лежащая в их основе, претерпевали значительные изменения в течение времени. Трудно поспорить с тем, что и в настоящее время многие предприятия рассматривают свою деятельность с точки зрения генерации прибыли, какой бы миссией и целями их деятельность не была завуалирована. Традиционно основной фокус в управлении был сделан на финансовых мерах и контроле бюджета. Деньги имеют разную стоимость во времени, и одна и та же сумма в текущий момент и через год имеет разную ценность, что может подталкивать к максимизации прибыли в ближайшей перспективе. Со временем традиционная концепция смещалась в сторону более «стратегического» подхода, который охватывает управление организацией более широким взглядом. Внимание стало уделяться идентификации, измерению и использованию экономической полезности организации для её стейкхолдеров (будь то в широком или узком понимании термина). Именно управление, направленное на создание стоимости компании (Value-Based Management), является основным подходом, используемым в развитых странах. Данный подход, его особенности, использование и результаты рассматривались в многочисленных научных работах, начиная с конца прошлого века, и, не теряя своей актуальности, продолжают рассматриваться по настоящее время [1–3]. Сохранение и даже уси-

ление внимания к управлению, направленному на создание стоимости компании, подтверждается текущим анализом литературы [4]. Автор указанной работы по состоянию на 2019 г. отмечает, что международная литература о системах управления, направленных на создание стоимости организации, сконцентрирована в периоде с 2002 по 2018 г., причём 25 % всех работ по заданной тематике попадает на 2016–2018 гг. Достаточно подробный анализ и классификация литературы по управлению стоимостью приведены в работах [4–6]. В настоящей работе рассматривается модель оценки фундаментальной стоимости компании на основании дисконтированных денежных потоков и критерий создания/разрушения стоимости. Модель апробирована на примере данных ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

1. Обзор

Управление, направленное на создание стоимости, принимает критерий роста стоимости бизнеса за основную финансовую цель компании. Очевидным следствием из этого следует учёт обозначенной цели при принятии решений на каждом из уровней организации. Концепция управления, направленного на создание стоимости, включает в себя три основные составляющие [7]. Первой составляющей является трансформация мышления. Именно максимизация стоимости должна ставиться и приниматься в качестве цели компании. Другими словами, компания должна всецело следовать философии создания стоимости. Второй составляющей является идентификация факторов стоимости. Организации необходимо определить, какие параметры определяют её стоимость. Третьей составляющей является разработка и введение управленческих процессов с ориентацией на создание стоимости. Эта составляющая является фактическим воплощением первой составляющей как при принятии решений, так и в текущей операционной деятельности организации. Как отмечается в работах [8, 9], управление, направленное на создание стоимости, «создаёт интегрированную систему для измерения и управления предприятиями с чётко выраженной целью создания большей долгосрочной стоимости для стейкхолдеров». Создавая такую внутренне-присущую стоимость, организации будут иметь более высокую продуктивность (эффективность) и обеспечат большее благосостояние стейкхолдеров именно в долгосрочной перспективе [10].

Однако существует процесс, обратный созданию стоимости, – её разрушение. Термином «разрушение» (destruction) западные авторы подчеркивают важность и сложность процесса управления стоимостью, который может вести к уменьшению стоимости (а не к увеличению, что является ожидаемым позитивным результатом управления).

Существует множество работ об изменениях стоимости в процессе слияний и поглощений, в том числе её уменьшении, независимо от того, было ли такое слияние и поглощение вертикальным или горизонтальным [11–13]. В более общих терминах создание и разрушение стоимости освещено в работе [14]. Так, G. Mahajan [15] для снижения разрушающего воздействия на стоимость поднимает проблему активного менеджмента. Он предлагает задуматься над тем, «что делают пилоты, когда автоматика не работает или работает с перебоями?» и «что является оптимальным соотношением ручного и автоматического контроля. Что должно превалировать над другим и когда?». Взглянув на проблему под другим углом, для снижения разрушающего воздействия можно выделить важность тщательного выбора организации для поглощения, понимание изменения технологии в соответствующем индустриальном секторе, осознание рисков, связанных с размером приобретаемой организации и мотивами приобретающей организации [16].

Контринтуитивно разрушение стоимости организации может наблюдаться и при видимом улучшении общепринятых показателей деятельности. Одним из парадоксов, согласно работе [17], является «отсутствие значимой корреляции между созданной стоимостью и ЕБИТ (Earnings Before Interest and Taxes)», «прибыль определяется независимо от созданной добавленной стоимости». Эмпирическое исследование подтверждает, что ЕБИТ не служит индикатором способности организации создавать стоимость. Вторым парадоксом, обозначенным в этой же работе, является то, что ЕБИТ, которая должна отражать эффективность бизнеса, никоим образом не связана с производительностью ресурсов.

Является ли организация «создающей стоимость», «нейтральной» или «разрушающей стоимостью», зависит от средневзвешенной стоимости капитала WACC (Weighted Average Cost of Capital) [18]. К разрушению стоимости организации приводит и увеличение роста выручки, если ROIC (Return on Invested Capital) меньше WACC [7].

2. Общее описание модели

Нормативными документами¹ установлены три подхода к оценке стоимости:

- доходный подход;
- сравнительный подход;
- затратный подход.

Также для определения стоимости используется средневзвешенная оценка по трём данным методам, однако вес каждого из подходов оставлен на усмотрение оценщика. В рамках данной работы рассматривается доходный подход как наиболее «сильный инструмент для анализа даже сложных ситуаций» [19].

3. Математическая модель

Для определения стоимости бизнеса (организации) доходным подходом методом дисконтированных денежных потоков использована двухпериодная модель. Суть модели заключается в следующем: на основе данных управленческой отчётности за несколько предыдущих лет (фактические имеющиеся данные) прогнозируются финансовые потоки нескольких будущих лет. При прогнозировании используются два периода – прогнозный и постпрогнозный. Используется ряд предположений, основным из которых является фиксированный темп роста номинальных (не дисконтированных) финансовых потоков в постпрогнозный период, что организация замедлит свой рост, придя к относительно небольшому, но стабильному уровню роста. Двухпериодная модель описывается формулой

$$EV = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{FCF_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^T \frac{FCF_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=T+1}^{\infty} \frac{FCF_t}{(1+r)^t} = EV_1 + EV_2, \quad (1)$$

где EV – стоимость бизнеса (enterprise value), FCF_t – финансовые потоки года t (free cash flows), t – индекс времени, r – ставка дисконтирования, T – длительность прогнозного периода, EV_1 – стоимость бизнеса в прогнозируемом периоде, а EV_2 – стоимость бизнеса в постпрогнозируемом периоде.

Для преобразования данной формулы введём два новых показателя:

$$a = \Delta IC / \Delta S, \quad (2)$$

где a – капиталоемкость, IC – инвестированный капитал, S – выручка;

$$m = NOPLAT / S, \quad (3)$$

где m – коэффициент операционной прибыльности, $NOPLAT$ – чистая операционная прибыль, скорректированная на налоги (Net Operating Profit Less Adjusted Tax).

Капиталоемкость оценивается как отношение прироста инвестированного капитала к приросту выручки. Под инвестированным капиталом будет пониматься разница между активами и кредиторской задолженностью. В случае равномерного роста бизнеса и соблюдения пропорции роста инвестированного капитала от выручки приведённая выше формула упрощается за счёт использования абсолютных, а не приростных показателей. То есть при обозначенном допущении капиталоемкость равна сроку оборачиваемости инвестированного капитала за год и выражается как отношение инвестированного капитала к выручке:

$$a = IC / S. \quad (4)$$

Обозначенное допущение не может быть адекватно применено к организациям на всех этапах жизненного цикла, поэтому модель, использующая подобное допущение, имеет ограничение применимости. Данное допущение сделано для так называемых «зрелых» организаций, на оценку которых и направлена используемая в настоящей работе модель.

Далее, учитывая, что $\Delta S_t = S_t s_t / (1 + s_t)$, можно привести формулу к преобразованному виду [20]:

$$EV = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{S_t (m_t - a_t s_t / (1 + s_t))}{(1+r)^t}. \quad (5)$$

¹ Приказ Минэкономразвития России от 20.05.2015 № 297 «Об утверждении Федерального стандарта оценки «Общие понятия оценки, подходы и требования к проведению оценки (ФСО № 1)» и Приказ Минэкономразвития России от 01.06.2015 № 326 «Об утверждении Федерального стандарта оценки «Оценка бизнеса (ФСО № 8)».

Продолжая преобразование, учитывая сделанные допущения постоянства a , m и s , формула модели оценки стоимости организации сводима к аналитическому виду, который позволит изучение целевых индикаторов с изменениями в данных, используемых моделью. Формула в аналитическом виде имеет следующий вид:

$$EV = S_0 \left\{ \frac{m(1+s) - as}{s-r} \left[\left(\frac{1+s}{1+r} \right)^T - 1 \right] + \frac{m(1+g) - ag}{r-g} \left(\frac{1+s}{1+r} \right)^T \right\}. \quad (6)$$

Из приведённой формулы очевидно, что результаты оценки зависят от выручки, темпа роста выручки в прогнозном периоде, темпа роста выручки в постпрогнозный период, коэффициента операционной прибыльности, коэффициента дисконтирования, капиталоемкости и длины прогнозного периода. Для сходимости ряда формулы (5) требуется, чтобы ставка дисконтирования была больше постпрогнозного темпа роста $r > g$.

Работа [7] приводит вывод формулы оценки стоимости организации через экономическую прибыль. Экономическая прибыль или убыток – это разница между выручкой и затратами на все использованные ресурсы, а также альтернативными издержками. При расчете экономической прибыли из выручки вычитаются и явные издержки, и альтернативные. Отмечается, что увеличение стоимости организации будет наблюдаться только при дисконтированной сумме экономической прибыли, большей нуля. Однако в используемой модели присутствуют два существенно отличающихся в плане расчётов периода – прогнозный и постпрогнозный. Прогнозный представляет собой сумму финансовых потоков за определённое число лет этого периода, а постпрогнозный суммирует потоки за все оставшиеся года деятельности организации, предполагая, что организация будет функционировать вечно, вычислить которую можно благодаря тому, что такая сумма представляет собой бесконечно убывающую геометрическую прогрессию при ранее обозначенном условии $r > g$. Отсюда важно обозначить факт, что значительная доля оценочной стоимости организации может приходиться на постпрогнозный период и распределением финансовых потоком во времени нельзя пренебречь [21]. Также работа [21] показывает, что увеличение стоимости организации за счёт увеличения выручки достигается, если разница между коэффициентом операционной прибыльности и капиталоемкостью, умноженной на ставку дисконтирования, больше нуля (в относительных величинах). В противном случае увеличение выручки не будет вести к максимизации стоимости организации. В абсолютных величинах обозначенное в указанной работе условие путём умножения на выручку записывается следующим образом:

$$NOPLAT - r \cdot IC > 0. \quad (7)$$

Данное выражение по своей сути является «условием инвестиционной привлекательности».

Таким образом, одно рассмотрение такого индикатора как выручка в отдельности с точки зрения максимизации прибыли не является целесообразным и требуется более широкий взгляд на оценку организации с учётом целого ряда индикаторов и их значений.

4. Исходные данные и результаты расчётов

Предложенная модель иллюстрируется на примере ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Данными, на основании которых производились расчёты, являются бухгалтерский баланс (форма № 1) и отчёт о финансовых результатах (форма № 2)².

Для расчёта фундаментальной стоимости компании по модели использовались фактические данные за 2015–2020 гг. Длина прогнозного периода установлена равной трём годам ($T=3$). Постпрогнозный темп роста принят равным $g=2\%$, и ставка дисконтирования – равной $r=11,1\%$. Ставка дисконтирования, являющаяся одним из существенных параметров как для расчёта фундаментальной стоимости компании, так и для проверки на удовлетворение условия инвестиционной привлекательности, рассчитывалась как объединение двух компонент. Первой компонентой является ключевая ставка ЦБ РФ, которая на 31.12.2020 составляла $4,25\%$ ³. Второй компонентой является премия за риск капитала, которая оценена в $6,85\%$ ⁴. Теорию и подробности методики расчёта премии за риск капитала можно узнать в работе [22].

² https://www.audit-it.ru/buh_otchet/7414003633_pao-magnitogorskiy-metallurgicheskiy-kombinat.

³ http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_12453/886577905315979b26c9032d79cb911cc8fa7e69/.

⁴ <https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/pc/datasets/ctryprem.xlsx>.

Исходные данные для проверки модели на примере одного из крупнейших металлургических комбинатов России приведены в табл. 1.

Исходные данные ПАО «ММК», млн руб.

Таблица 1

Initial data of PJSC MMK, million rubles

Table 1

Показатель	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Баланс (1700)	307 978	295 195	351 568	387 023	391 483	428 126
Кредиторская задолженность (1520)	30 950	35 370	59 735	66 122	66 194	89 218
Прибыль (убыток) от продаж (2200)	72 078	79 689	86 463	116 462	83 261	73 756
Выручка (2110)	314 115	339 111	392 782	458 218	434 869	400 237

На основании описанных данных при использовании приведённой в настоящей работе модели расчёты привели к оценке фундаментальной стоимости ПАО «ММК» по состоянию на 31.12.2020 г. в 663 млрд руб. против 625 млрд руб. рыночной капитализации на эту же дату⁵. Отклонение составляет 6 %, что существенно меньше рыночного колебания курсов акций в течение года и разброса в консенсус-оценках аналитиков. Данный расчет показывает приемлемую точность оценки стоимости.

Используя приведённые в разделе «Математическая модель» формулы и определения, получаем значения, приведённые в табл. 2.

Расчетные данные ПАО «ММК»

Таблица 2

Calculated data of PJSC MMK

Table 2

Показатель	2015	2016	2017	2018	2019	2020
IC, инвестированный капитал, млн руб.	277 028	259 825	291 833	320 901	325 289	338 908
NOPLAT, млн руб.	57 662	63 751	69 170	93 169	66 609	59 005
a, капиталоемкость	0,88	0,77	0,74	0,70	0,75	0,85
m, коэффициент операционной прибыльности	0,18	0,19	0,18	0,20	0,15	0,15
Инвестиционная привлекательность (отн.)	0,09	0,10	0,09	0,13	0,07	0,05
Инвестиционная привлекательность (абс.), млн руб.	26 912	34 911	36 777	57 549	30 502	21 386

Вывод: инвестиции в ПАО «ММК» на протяжении всего рассматриваемого периода удовлетворяли условию инвестиционной привлекательности в рамках подхода по управлению стоимостью.

Заключение

В данной работе описан подход к управлению, направленный на создание стоимости. Применяется модель оценки стоимости компании с использованием дисконтированных денежных потоков и условие привлекательности инвестиций.

Данный подход позволил упростить оценку стоимости компании и выработать комплекс мероприятий по повышению (а не снижению) ее стоимости.

Разработанная модель применена для оценки стоимости одного из крупнейших металлургических комбинатов России. Точность оценочных расчетов составила 6 % и может быть признана удовлетворительной.

⁵ https://smart-lab.ru/q/MAGN/f/q/MSFO/market_cap/.

Увеличение выручки инвестиционно непривлекательной компании приводит к разрушению (уменьшению) ее стоимости. Вместо положительного результата стейкхолдеры получают отрицательный при внешне благополучной динамике развития организации. Предложенная модель является типовой и может применяться для анализа развития многих «зрелых» организаций.

Список литературы

1. Ittner C.D., Larcker D.F. Assessing empirical research in managerial accounting: a value-based management perspective // *Journal of Accounting and Economics*. 2001. Vol. 32, iss. 1–3. P. 349–410.
2. Otley D. Performance management: a framework for management control systems research // *Management Accounting Research*. 1999. Vol. 10, iss. 4. P. 363–382.
3. Knauer T., Silge L., Sommer F. The shareholder value effects of using value-based performance measures: Evidence from acquisitions and divestments // *Management Accounting Research*. 2018. Vol. 41. P. 43–61.
4. Corazza G. Value Based Management Systems and Firm Performance: An Analysis of the Literature // *Management International Conference 2019: Managing Geostrategic Issues; Proceedings of the Joint International Conference*. Opatija, Croatia, University of Primorska Press, 2019. P. 77–89.
5. Beck V., Bretzelmaier B. Value Based Management – A Critical Literature Review // *International Journal of Sales, Retailing and Marketing*. 2012. Vol. 1, iss. 3. P. 3–20.
6. Blume K.H. Value-based management as a tailor-made management practice? A literature review // *Journal of Management and Governance*, 2016. Vol. 20, iss. 3. P. 553–590.
7. McKinsey & Company, Koller T., Goedhart M., Wessels D. Valuation: Measuring and Managing the Value of Companies. 7th ed., New York, NY, Wiley Finance, 2020. 896 p.
8. Ausloos M. Valuation Models Applied to Value-Based Management – Application to the Case of UK Companies with Problems // *Forecasting*. 2020. Vol. 2, iss. 4. P. 549–565.
9. Hannington T. How to Measure and Manage Your Corporate Reputation. London, Routledge, 2016. 112 p.
10. Copeland T.E. Why value value? // *The McKinsey Quarterly*. 1994. No. 4. P. 97–109.
11. Ibrahim M., Meghouar H. Sources of value creation and destruction in horizontal mergers and acquisitions // *Managerial Finance*. 2019. Vol. 45, iss. 10/11. P. 1398–1415.
12. Meckl R., Röhrle F. Do M&A deals create or destroy value? A meta-analysis // *European Journal of Business and Economics*. 2016. Vol. 11, iss. 2. P. 9–19.
13. Weiss S. A Governance Solution to Prevent the Destruction of Shareholder Value in M&A Transactions, 2019. URL: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3317584> (дата обращения: 20.12.2021).
14. Stokes P., Mahajan G., Lucas G., Hughes P. Creating Value – Value Co-Creation and Value Destruction // *EFMD Global Focus*. 2018. Vol. 12, iss. 2. P. 44–47.
15. Mahajan G. Critically Exploring Value Destruction to Create More Value // *Journal of Creating Value*. 2019. Vol. 5, iss. 1. P. 3–10.
16. Wei T., Clegg J. Exploring sources of value destruction in international acquisitions: A synthesized theoretical lens // *International Business Review*. 2017. Vol. 26, iss. 5. P. 927–941.
17. Pulic A. Do We Know if We Create or Destroy Value // *International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*. 2004. Vol. 4, iss. 4. P. 349–359.
18. Chakraborty A., Grant J.L., Trahan E.A. The EVA Style Approach to Tactical Asset Allocation // *The Journal of Wealth Management*. 2017. Vol. 20, iss. 2. P. 41–53.
19. Steiger F. The Validity of Company Valuation Using Discounted Cash Flow Methods, 2010. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1003/1003.4881.pdf> (дата обращения: 20.12.2021).
20. Дранко О.И. Аналитическая модель стоимости компании: факторы капиталистического соревнования // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2015. № 30(315). С. 2–15.
21. Dranko O.I. The Aggregate Model of Business Valuation by Three Methods // 13th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2020). Moscow, IEEE, 2020. P. 1–4.
22. Damodaran A. Equity Risk Premiums (ERP): Determinants, Estimation, and Implications – The 2021 Edition, 2021. 144 p. URL: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3825823> (дата обращения: 21.12.2021).

References

1. Ittner C.D., Larcker D.F. Assessing empirical research in managerial accounting: a value-based management perspective. *Journal of Accounting and Economics*. 2001;32(1–3):349–410.
2. Otley D. Performance management: a framework for management control systems research. *Management Accounting Research*. 1999;10(4):363–382.
3. Knauer T., Silge L., Sommer F. The shareholder value effects of using value-based performance measures: Evidence from acquisitions and divestments. *Management Accounting Research*. 2018;41:43–61.
4. Corazza G. Value Based Management Systems and Firm Performance: An Analysis of the Literature. In: *Management International Conference 2019: Managing Geostrategic Issues; Proceedings of the Joint International Conference*. Opatija, Croatia, University of Primorska Press; 2019. P. 77–89.
5. Beck V., Bretzelmaier B. Value Based Management – A Critical Literature Review. *International Journal of Sales, Retailing and Marketing*. 2012;1(3):3–20.
6. Blume K.H. Value-based management as a tailor-made management practice? A literature review. *Journal of Management and Governance*. 2016;20(3):553–590.
7. McKinsey & Company, Koller T., Goedhart M., Wessels D. *Valuation: Measuring and Managing the Value of Companies*. 7th ed., New York, NY, Wiley Finance; 2020. 896 p.
8. Ausloos M. Valuation Models Applied to Value-Based Management – Application to the Case of UK Companies with Problems. *Forecasting*. 2020;2(4):549–565.
9. Hannington, T. *How to Measure and Manage Your Corporate Reputation*. London, Routledge; 2016. 112 p.
10. Copeland T.E. Why value value? *The McKinsey Quarterly*. 1994;(4):97–109.
11. Ibrahim M., Meghouar H. Sources of value creation and destruction in horizontal mergers and acquisitions. *Managerial Finance*. 2019;45(10/11):1398–1415.
12. Meckl R., Röhrle F. Do M&A deals create or destroy value? A meta-analysis. *European Journal of Business and Economics*. 2016;11(2): 9–19.
13. Weiss S. A Governance Solution to Prevent the Destruction of Shareholder Value in M&A Transactions. 2019. Available at: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3317584> (accessed 20 December 2021).
14. Stokes P., Mahajan G., Lucas G., Hughes P. Creating Value – Value Co-Creation and Value Destruction. *EFMD Global Focus*. 2018;12(2):44–47.
15. Mahajan G. Critically Exploring Value Destruction to Create More Value. *Journal of Creating Value*. 2019;5(1):3–10.
16. Wei T., Clegg J. Exploring sources of value destruction in international acquisitions: A synthesized theoretical lens. *International Business Review*. 2017;26(5):927–941.
17. Pulic A. Do We Know if We Create or Destroy Value. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*. 2004;4(4):349–359.
18. Chakraborty A., Grant J.L., Trahan E.A. The EVA Style Approach to Tactical Asset Allocation. *The Journal of Wealth Management*. 2017;20(2):41–53.
19. Steiger F. The Validity of Company Valuation Using Discounted Cash Flow Methods. 2010. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1003/1003.4881.pdf> (accessed 20 December 2021).
20. Dranko O.I. Analytical model of company value: factors of capitalist competition. *National interests: priorities and security*. 2015;30(315):2–15. (In Russ.)
21. Dranko O.I. The Aggregate Model of Business Valuation by Three Methods. *13th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD’2020)*. Moscow, IEEE. 2020:1–4.
22. Damodaran A. Equity Risk Premiums (ERP): Determinants, Estimation, and Implications – The 2021 Edition. 2021. 144 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3825823> (accessed 21 December 2021).

Информация об авторах

Дранко Олег Иванович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия; olegdranko@gmail.com.

Благодарный Евгений Владимирович, аспирант, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия; blagodarny@phystech.edu.

Information about the authors

Oleg I. Dranko, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; olegdranko@gmail.com.

Evgeniy V. Blagodarnyy, postgraduate student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia; blagodarny@phystech.edu.

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 22.12.2021; одобрена после рецензирования 11.01.2022; принята к публикации 18.01.2022.

The article was submitted 22.12.2021; approved after reviewing 11.01.2022; accepted for publication 18.01.2022.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ИННОВАЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ СИТУАЦИОННОГО ПОДХОДА

Татьяна Александровна Аверина¹, Сергей Алексеевич Баркалов²,
Мария Викторовна Черных³

^{1, 2, 3} Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

¹ ta_averina@mail.ru

² bsa610@yandex.ru

³ voronova-marie@mail.ru

Аннотация. Современные тренды в экономике и сфере научно-технического прогресса требуют перехода на более инновационный путь развития. Данная тенденция способна обеспечить формирование и аккумулирование нового качества научно-исследовательского и производственно-технического потенциала страны в обозримой перспективе. Таким образом, определяется необходимость в обеспечении грамотного управления инновационными проектами. Проблема качества инновационных строительных проектов порождается недостаточно эффективным управлением проектами данного типа. При формировании грамотного подхода к управлению инновационными строительными проектами обеспечивается значимое конкурентное преимущество для организаций, реализующих эти проекты, что в перспективе формирует тенденцию роста компании и получение большей доли рынка. **Целью** данного исследования является разработка методических положений по проведению мониторинга качества инновационных проектов в сфере строительства. **Методы.** В рамках исследования применялись традиционные подходы сравнительного анализа, методы статистического исследования, методы моделирования и др. **Результатом** исследования является разработка методики мониторинга качества инновационных проектов в сфере строительства на основе формирования комплексной системы показателей, реализуемой в условиях ситуационного подхода. **Заключение.** Достижение качества проекта не гарантирует полного достижения качества продукта проекта. По заявленным условиям качество проекта обуславливается его сохранением в рамках проектного треугольника как в период реализации, так и по завершении проекта. Что касается инновационных строительных проектов, несмотря на то, что данная отрасль консервативна в вопросе реализации инноваций, подобные проекты все же реализуются и выводят компании на лидирующие позиции на рынке. Безусловно, данные проекты на протяжении всего жизненного цикла сопровождаются наличием высокого уровня рисков, однако при должном уровне контроля и своевременности качественных управленческих решений инновационный проект имеет значительные шансы на успех. Индивидуальность условий каждого инновационного строительного проекта не позволяет выявить абсолютно универсальную эффективную методику мониторинга качества проекта, однако можно добиться повышения эффективности мониторинга качества данных проектов при условии соблюдения разработанных рекомендаций.

Ключевые слова: инновационные проекты, инновационные строительные проекты, мониторинг качества проектов, методика мониторинга качества проектов, ситуационный подход к мониторингу проекта, рекомендации по мониторингу проекта

Для цитирования: Аверина Т.А., Баркалов С.А., Черных М.В. Разработка методики мониторинга качества инновационных строительных проектов на основе ситуационного подхода // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 106–115. doi: 10.14529/ctcr220109.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR MONITORING THE QUALITY OF INNOVATIVE CONSTRUCTION PROJECTS BASED ON A SITUATIONAL APPROACH

Tat'yana A. Averina¹, Sergey A. Barkalov², Mariya V. Chernykh³

^{1, 2, 3} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

¹ ta_averina@mail.ru

² bsa610@yandex.ru

³ voronova-marie@mail.ru

Abstract. Modern trends in the economy and in the field of scientific and technological progress require a transition to a more innovative way of development. This trend is able to ensure the formation and accumulation of a new quality of research and production and technical potential of the country in the foreseeable future. Thus, the need to ensure competent management of innovative projects is determined. The problem of the innovative construction projects quality is caused by the insufficiently effective management of this type of projects. When forming a competent approach to the management of innovative construction projects, a significant competitive advantage is provided for organizations implementing these projects, which generally forms the company's growth trend and the acquisition of a greater market share. **The purpose** of this study is to develop methodological guidelines for monitoring the quality of innovative projects in the construction sector. **Methods.** The study used traditional approaches of comparative analysis, statistical research methods, modeling methods, etc. **The result** of the research is the development of a new methodology for monitoring the quality of innovative projects in the construction sector based on the formation of a comprehensive system of indicators implemented in the context of a situational approach. **Conclusion.** Achieving project quality does not guarantee full achievement of project product quality. According to the stated conditions, the quality of the project is determined by its preservation within the project triangle both during the implementation period and after the completion of the project. As for innovative construction projects, despite the fact that this industry is conservative in terms of implementing innovations, such projects are still being implemented, and thus bring companies to a leading position in the market. Of course, these projects throughout the entire life cycle are accompanied by the presence of a high level of risks, however, with the proper level of control and timeliness of high-quality management decisions, an innovative project has significant chances of success. The individual conditions of each innovative construction project do not allow us to identify an absolutely universal effective methodology for monitoring the quality of the project, but it is possible to improve the effectiveness of monitoring the quality of these projects, provided that the developed recommendations are followed.

Keywords: innovative projects, innovative construction projects, project quality monitoring, project quality monitoring methodology, situational approach to project monitoring, project monitoring recommendations

For citation: Averina T.A., Barkalov S.A., Chernykh M.V. Development of a Methodology for Monitoring the Quality of Innovative Construction Projects Based on a Situational Approach. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(1):106–115. (In Russ.). doi: 10.14529/ctcr220109.

Введение

Современная политика России направлена на выведение и удержание страны в лидирующих позициях на мировом рынке. Строительный сектор считается одной из ключевых отраслей, определяющих решение задач экономического и научно-технического развития страны. И ведущая роль строительного комплекса заключается в достижении стратегических целей путем реализации проектов. При этом непременным условием является повышение эффективности капитального строительства на основе более рационального потребления ресурсов, реализации проектов, приносящих более значимые результаты [1]. Современные тренды в экономике и сфере научно-технического прогресса требуют перехода на более инновационный путь развития. Данная тенденция способна обеспечить формирование и аккумуляцию нового качества научно-исследовательского и производственно-технического потенциала страны в обозримой перспективе. Таким образом, определяется необходимость в обеспечении грамотного управления инновационными проектами [2–4].

Целью данного исследования является разработка методических положений по проведению мониторинга качества инновационных проектов в сфере строительства.

Рассмотрению различных аспектов управления качеством инновационных проектов посвящены труды как отечественных, так и зарубежных ученых [5–8]. Вместе с тем изучение работ специалистов в данной области показывает, что проблема качества инновационных строительных проектов требует дальнейшего изучения как самостоятельное направление, формирование которого продиктовано инновационным вектором в мировой экономике.

Разработка методики мониторинга качества инновационных проектов в строительстве

В деятельности строительной организации наблюдается постоянная адаптация к непрерывному потоку изменений, проведение которой требует внесения корректировок в деятельность компании. Для успешного достижения поставленных целей путем реализации инновационных проектов необходим подход к управлению изменениями инновационного характера. Грамотное управление инновационной деятельностью позволяет компании выйти на новый уровень на рынке, приобрести значимое конкурентное преимущество. Аналогичным образом эффективно налаженная инновационная деятельность в разрезе экономики страны оказывает влияние на положение страны на мировом рынке.

Ситуационный подход позволяет применять научные концепции, принципы и методы, использование которых обосновывается условиями конкретных ситуаций и факторами, оказывающими влияние на успешность деятельности строительной организации в целом [9].

Опираясь на материалы отечественных и зарубежных исследователей по вопросам проведения мониторинга качества реализации инновационных строительных проектов (далее – ИСП), сформируем комплексную модель мониторинга качества данных проектов, базирующуюся на использовании комплекса показателей в условиях ситуационного подхода. Алгоритм ее реализации состоит из 7 этапов.

Шаг 1. Определение цели и задач формируемой методики мониторинга качества ИСП. Целью данной методики является создание эффективной внутрипроектной системы мониторинга качества ИСП, позволяющей обеспечивать получение качественных и информативных данных на разных уровнях управления, в том числе в условиях ситуационного подхода.

Для обеспечения поставленной цели данная методика призвана решить следующие задачи:

- сбор информационного массива, необходимого для проведения анализа и формирования управленческих решений;
- группировка данных по сформулированным областям анализа;
- проведение анализа по определенным группам показателей;
- выявление отклонений от заранее сформированных нормативных значений показателей и проведение факторного анализа ситуации;
- моделирование рискованных ситуаций и возможных сценариев развития ситуаций;
- прогнозирование ключевых показателей методики на будущий период с учетом сложившейся ситуации.

Шаг 2. Определение параметров, контролируемых в рамках формируемой методики мониторинга качества ИСП. Обеспечение качества инновационного строительного проекта предполагает успешное его завершение в рамках проектного треугольника и в соответствии со всеми правилами, действующими в организации-исполнителе. Таким образом, опираясь на проектный треугольник, целесообразным является проведение мониторинга по следующим ключевым аспектам: сроки, бюджет и показатели проекта. Ввиду того, что проект относится к категории инновационных, в методику также логичным будет включить показатели рисков [10].

Комплексная система показателей предполагает их группировку определенным образом, связанным с особенностями ИСП. Качественно реализованный проект подразумевает его сохранение в рамках проектного треугольника, поэтому данный фактор обосновывает формирование групп «финансы», «сроки» и «результаты». Поскольку цели и задачи для ИСП являются эндогенным фактором, их мониторинг может быть затруднен ввиду частых и, возможно, коренных изменений, однако упускать из внимания данную сторону проекта является ошибочным. В связи с тем, что в исследовании акцент делается на инновационные проекты, принимая во внимание высокие уровни неопределенности и рисков, добавляется еще одна группа показателей – «риски».

Шаг 3. Определение факторов, оказывающих влияние на качество ИСП.

Из ранее рассмотренных трудов отечественных и зарубежных исследователей можно определить следующий перечень факторов:

– внешние факторы:

• многообразие строительных стандартов и нормативов, обилие региональных особенностей и в техническом, и в правовом аспектах;

• проявление консерватизма к инновациям со стороны потребителей;

• неплатежеспособность заказчиков;

• слабая поддержка инновационной деятельности со стороны государства;

• и т. д.;

– внутренние факторы:

• высокий риск для строителей-новаторов за результат;

• низкий уровень технических знаний и профессиональной подготовки специалистов в отрасли, а также незаинтересованность команды проекта в достижении намеченного результата;

• недостаточное инвестирование в исследования в инновационной сфере компании;

• высокая себестоимость ввода в эксплуатацию объектов;

• и т. д.

Перечень данных факторов может иметь значительно большее количество пунктов, тем более с учетом индивидуальных особенностей проекта.

Шаг 4. Определение этапов проведения мониторинга качества ИСП согласно разрабатываемой методике. На основании изученных материалов по данной теме можно определить следующую последовательность осуществления мониторинга качества ИСП:

1) анализ внешних и внутренних факторов;

2) анализ степени достижения результатов проекта;

3) анализ сроков реализации проекта;

4) анализ стоимости проекта;

5) анализ рисков проекта;

6) формирование предложений по внесению изменений;

7) внесение изменений (если требуется), учет произведенных изменений.

Шаг 5. Определение методов проведения мониторинга качества ИСП и формы предоставления информации.

Наиболее оптимальным по временным и финансовым аспектам в условиях ситуационного подхода является применение системы отчетности для мониторинга качества ИСП. Для проведения наиболее эффективного мониторинга качества проекта, учитывая специфику ИСП, предлагается рассмотреть данную процедуру по следующей форме. Для более удобного восприятия передаваемой данными показателями информации форма и структура предложенной методики выглядит следующим образом (рис. 1):

Каждый из секторов включает в себя показатели ранее обозначенных групп. Данная группировка не является строгой, поскольку показатели также зависят от факторов, относящихся к другим группам. Количество показателей, включенных в сек-



Рис. 1. Структура системы показателей мониторинга ИСП
Fig. 1. Structure of the ICP monitoring indicator system

тор, может быть изменено руководителем проекта при необходимости, однако рекомендуемое большинством исследователей (с точки зрения более эффективного восприятия информации) количество показателей – 3–8.

Как отмечалось ранее, для руководителей и заинтересованных сторон высшего звена временной ресурс в работе имеет значительные ограничения, поэтому, как правило, руководство требует краткую информацию о состоянии проекта, которая могла бы наиболее полно осветить интересующие их аспекты реализации проекта.

С целью отображения текущей ситуации состояния показателя введена цветовая индикация («зеленый» – отклонения отсутствуют, «желтый» – незначительные отклонения, «красный» – критические отклонения). Для отображения наиболее полной картины по проекту целесообразна разработка трех диаграмм, представленных ранее на рис. 1: в общем по проекту, в отчетном периоде, прогнозный период (рис. 2).

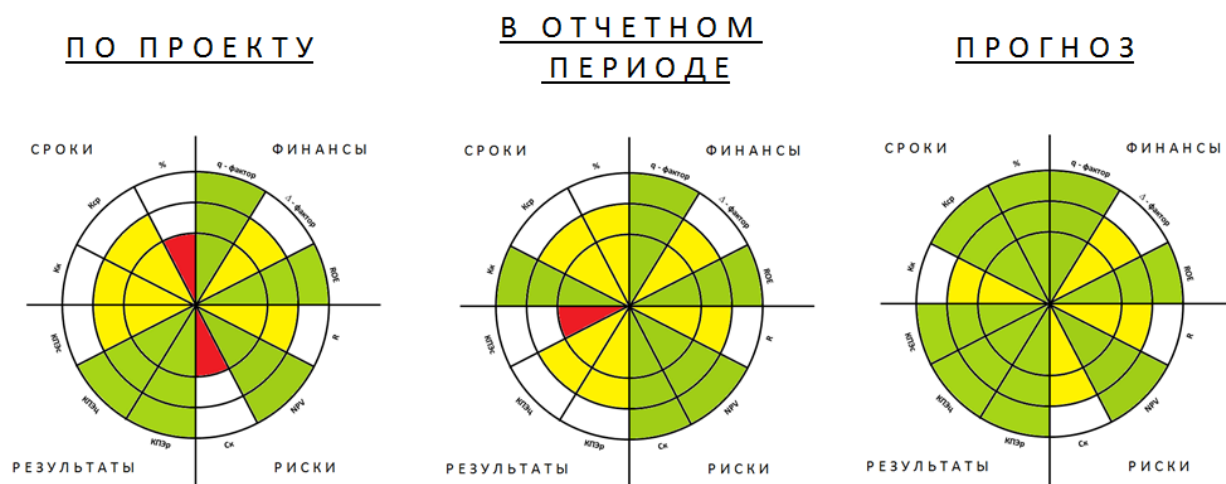


Рис. 2. Система показателей для проведения мониторинга ИСП
Fig. 2. The system of indicators for monitoring ICP

Таким образом, в рассматриваемой системе показатели группируются следующим образом:

- «финансы» – показатели, характеризующие финансовый сектор управления ИСП, значения которых играют наиболее значимую роль для всех заинтересованных сторон и напрямую оказывают влияние на качество проекта;
- «сроки» – показатели, характеризующие временной параметр управления ИСП, значения которых играют наиболее значимую роль для всех заинтересованных сторон и напрямую оказывают влияние на качество проекта;
- «результаты» – показатели, характеризующие объем и содержание ИСП, значения которых играют наиболее значимую роль для всех заинтересованных сторон и напрямую оказывают влияние на качество проекта;
- «риски» – показатели, характеризующие рискованный сектор управления ИСП, значения которых играют наиболее значимую роль для всех заинтересованных сторон и напрямую оказывают влияние на качество проекта.

Шаг 6. Рассмотрение расчетных показателей, включенных в систему мониторинга качества ИСП.

1. Финансы:

– q-фактор (согласно модели Тобина). Показатель характеризуется соотношением оценочной рыночной стоимости активов, вовлеченных в реализацию проекта, и их восстановительной стоимости. Показатель рассчитывается по формуле

$$q = Q_p / Q_b,$$

где Q_p – рыночная стоимость активов, вовлеченных в реализацию проекта; Q_b – восстановительная стоимость активов, вовлеченных в проект;

– Δ – фактор (согласно модели Тобина). Показатель характеризуется как разность между текущей рентабельностью инвестированного в проект капитала и средневзвешенной стоимостью капитала, заложенного в бизнес-план проекта. Показатель рассчитывается по формуле

$$\Delta = S_p - S_k,$$

где S_p – текущая рентабельность инвестированного в проект капитала; S_k – средневзвешенная стоимость капитала, заложенного в бизнес-план проекта;

– рентабельность собственного капитала (ROE) (согласно модели Дюпона). Данный показатель отображает, сколько прибыли генерирует капитал эмитента. Показатель рассчитывается по формуле

$$ROE = \frac{\text{Чистая прибыль}}{\text{Выручка}} \cdot \frac{\text{Выручка}}{\text{Активы}} \cdot \frac{\text{Активы}}{\text{Соб. капитал}}$$

2. Сроки:

– % выполнения работ. Данный показатель характеризует объем выполненных на текущий момент времени работ согласно календарному графику проекта. Показатель рассчитывается по формуле

$$\% = \Phi / \Pi,$$

где Φ – процент фактически выполненных (завершенных) работ на конец отчетного периода; Π – плановый процент выполненных работ согласно план-графику проекта;

– $K_{ср}$. Данный показатель характеризует количество сорванных работ, т. е. работ, которые по тем или иным причинам не были завершены в планируемый период [11]. Показатель рассчитывается по формуле

$$K_{ср} = (K_{да} + K_{дс} + K_{ср} + K_{пр}) / K_P,$$

где $K_{да}$ – количество утвержденных актов на дополнительные работы по каждому объекту, строящемуся в рамках проекта; $K_{дс}$ – количество дополнительных соглашений по каждому объекту, строящемуся в рамках проекта; $K_{ср}$ – количество судебных разбирательств по каждому объекту, строящемуся в рамках проекта; $K_{пр}$ – количество предписаний, актов и справок о нарушениях строительства, выданных контролирующим органом; K_P – количество запланированных к выполнению работ в отчетном периоде;

– K_k . Показатель отображает количество переносов сроков завершения проекта и количество дней, на которые осуществлен перенос. Показатель рассчитывается по формуле

$$K_k = \sum_1^n x_i,$$

где x_i – фактическое количество дней, на которые отсрочено завершение проекта; n – количество переносов сроков завершения проекта.

3. Результаты:

– КПЭс. Данный показатель характеризует степень достижения определенных в проекте вех (контрольных точек, КТ). Показатель рассчитывается по формуле

$$КПЭс = КТ_д / КТ_з,$$

где $КТ_д$ – количество своевременно достигнутых КТ в отчетном периоде, а также достигнутые КТ, которые были запланированы к достижению в предыдущие отчетные периоды, но фактически к началу отчетного периода не были достигнуты; $КТ_з$ – количество запланированных в отчетном периоде КТ (за исключением достигнутых досрочно в предыдущих отчетных периодах);

– КПЭц. Показатель достижения целей позволяет оценить степень достижения плановых значений показателей проекта за отчетный период. Показатель рассчитывается по формуле

$$КПЭц = \frac{\sum_1^n \frac{ПЦф}{ПЦп}}{n},$$

где $ПЦф$ – фактическое (достигнутое) значение показателя проекта за отчетный период; $ПЦп$ – плановое значение показателя проекта, установленное на конец отчетного периода; n – количество показателей проекта в паспорте проекта в отчетном периоде;

– КПЭр. Показатель достижения результатов позволяет оценить степень достижения плановых значений результатов проекта за отчетный период. Показатель рассчитывается по формуле

$$КПЭр = \frac{\sum_1^n \frac{ПРф}{ПРп}}{n},$$

где $ПРф$ – фактическое (достигнутое) значение показателя результата проекта за отчетный период; $ПРп$ – плановое значение показателя результата проекта, установленное на конец отчетного периода; n – количество показателей результатов проекта в паспорте проекта в отчетном периоде.

4. Риски:

– S_k . Данный показатель отображает стоимость компании с учетом имеющейся неопределенности, характерной для инновационных проектов [12]. Показатель рассчитывается по формуле

$$C_k = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \frac{x_{kt}^{HP} \cdot p_{x_{kt}^{HP}}}{(1+e_{kt})^t} - \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \frac{(y_{kt}^{HP} \cdot p_{y_{kt}^{HP}} + y_{kt}^{HP} \cdot p_{y_{kt}^{HP}})}{(1+e_{kt})^t},$$

где x_{kt}^{HP} – размер условного денежного потока, полученного за отчетный период; $p_{x_{kt}^{HP}}$ – степень наступления риска, адекватная условному притоку денежных средств в отчетном периоде; y_{kt}^{HP} – размер условного денежного оттока, полученного за отчетный период; $p_{y_{kt}^{HP}}$ – степень наступления риска, адекватная условному оттоку денежных средств в отчетном периоде; y_{kt}^{HP} – размер дополнительного условного денежного оттока; T – инвестиционный горизонт; K – совокупность объектов внутри экономического пространства, где возможна реализация проекта; e_{kt} – безрисковая годовая ставка дисконтирования на текущий момент;

– NPV. Данный показатель отображает чистую приведенную стоимость (ЧПС), позволяет оценить итоговую сумму всех денежных потоков с учетом стоимости используемого капитала. Показатель рассчитывается по формуле

$$NPV = -IC + \frac{\sum_{t=0}^N CF^t}{(1+i)^t},$$

где IC – сумма начальных вложений; N – количество периодов (месяцев, лет) реализации проекта; t – время, для которого нужно вычислить ЧПС; i – коэффициент дисконтирования для необходимого вида вложений; CF^t – ожидаемый потом денег (чистый) за установленный период времени;

– R. Показатель отображает разницу суммарной экспертной оценки рисков (с учетом вероятности наступления рисков событий), полученной в отчетном периоде, и базовой величины этого показателя [13]. Показатель рассчитывается по формуле

$$R = \frac{R_{оп}}{R_б} \cdot 100 \%,$$

где $R_{оп}$ – суммарная экспертная оценка рисков инновационного строительного проекта, полученная в отчетном периоде, вычисляемая по формуле

$$R_{оп} = \frac{\sum_1^n \sum_1^m p_i \max \min(x_{ij}; \bar{x}_j) \cdot P_n}{\sum_1^n P_n},$$

где n – количество рисков, влияющих на проект; m – количество факторов риска; p_i – вероятность наступления факторов риска (отношение числа реализации факторов риска к общему числу рассмотренных событий); x_{ij} – экспертная оценка i -го эксперта j -го фактора риска; \bar{x}_j – среднее значение экспертной оценки по j -му фактору риска; P_n – значимость наступления данного риска для проекта; $R_б$ – базовое значение суммарной экспертной оценки рисков, определенное на этапе планирования проекта по аналогичной формуле.

С целью автоматизации процесса составления отчета согласно предложенной системе расчет данных показателей возможен с помощью MSExcel или другого программного обеспечения, позволяющего проводить подобные расчеты.

Шаг 7. Рассмотрение методики мониторинга качества ИСП в разрезе уровней управления и определение периодичности предоставления отчетности.

Для тактического уровня управления устанавливается ежеквартальная периодичность предоставления отчетности, для стратегического уровня – ежегодная. Однако, учитывая особенность ИСП, может потребоваться ситуативная периодичность отчетности, которая носит оперативный характер, и в данном случае важна подготовленность персонала и готовность работать в подобном режиме. Данная особенность ИСП легла в основу подбора показателей, рассматриваемых в системе мониторинга качества ИСП.

Подводя итог, можно сказать, что рассмотренная методика мониторинга инновационного строительного проекта должна выступать как инструмент, обеспечивающий устойчивость проекта, своевременность обнаружения рисков и отклонений, обоснованность управленческих решений с целью достижения успешной и эффективной реализации ИСП.

Научно-практические рекомендации по мониторингу качества инновационных проектов в сфере строительства

Анализ специфики ИСП и их мониторинга позволяет составить некоторые научно-практические рекомендации по осуществлению мониторинга качества ИСП [14].

1. Система мониторинга качества ИСП должна обладать четкой структурой, в том числе структурой потоков информации. Данная иерархия должна быть понятна всем сотрудникам, уча-

ствующим в данной цепочке, во избежание задержки информации или ее искажения. Тщательность подготовки сотрудников к работе позволит интегрировать методику мониторинга качества ИСП в систему управления проектами, действующую в компании.

2. Как правило, наиболее часто в компаниях проводится оперативный мониторинг с заданной нормативными документами периодичностью, что составляет «стабильную/регулярную» составляющую мониторинга ИСП. Однако высокий уровень рисков, который сопровождает реализацию проекта на всех этапах его жизненного цикла, порождает «ситуативную» составляющую, для которой разработанная методика может являться вполне актуальной, поскольку дает оперативную информацию по состоянию проекта в наглядной форме. И как отмечалось ранее, в данном случае важна подготовленность сотрудников не только в вопросе теоретических и практических знаний, но и в аспекте личных качеств, таких как стрессоустойчивость, умение контролировать ситуацию в трудных условиях, умение выделять главную информацию, находить причинно-следственные связи и т. д.

3. Процесс подбора методов и инструментов для проведения мониторинга качества ИСП является избирательным и индивидуальным для компаний. Разработанная методика может включать в себя различные показатели, которые в рамках конкретного инновационного проекта являются наиболее оптимальными для него. Данное решение принимается руководителем проекта по согласованию со всеми заинтересованными лицами. Важным аспектом в данном процессе является вопрос функционирования в компании системы управления проектами. При разработке методики мониторинга качества ИСП предполагалось, что в компании действует данная система на основании соответствующих регламентирующих положений.

4. Реализация того или иного проекта всегда является уникальной деятельностью, которая может опираться на некоторый банк знаний, однако некоторые процессы все же требуют творческого подхода, что немаловажно со стороны сотрудников. Развитие интереса среди команды проекта позволяет качественно и своевременно обнаруживать риски, отклонения, решать поставленные задачи с высокой отдачей и качеством. Следствием этого является расширение инструментария мониторинга от графиков до когнитивной визуализации, позволяющих использовать ментальных карт и когнитивных моделей.

5. В случае реализации ИСП важно применение такого организационного механизма, как agile-технологии (или гибкое управление). Такой способ управления проектами позволит с меньшими затратами временных ресурсов определить отклонения и риски и своевременно на них отреагировать в отличие от применения классических методов управления. Однако, как уже не раз оговаривалось, строительная отрасль является консервативной средой в вопросах инноваций, поэтому наиболее оптимальным подготовительным действием перед началом реализации проекта является обучение и, что очень важно, принятие сотрудниками новой схемы работы и взаимодействия.

6. Реализация инновационных решений, в том числе их качество, непосредственно зависит от объемов инвестирования (также венчурных фондов). И в данном случае оценка проекта может повлиять на возможность его реализации, его содержание [15].

Заключение

На основании изученных материалов разработана методика мониторинга качества ИСП, согласно которой мониторинг осуществляется на основании комплексной системы показателей, сгруппированных по значимым областям проекта, сформированным на основании проектного треугольника и особенностей ИСП. Данная методика включает в себя цели и задачи ее реализации, учет контролируемых параметров, перечень факторов, оказывающих на них влияние, методы определения расчетных показателей, структуру передачи информации, а также уровни осуществления мониторинга качества ИСП. Также в работе даны как методические, так и научно-практические рекомендации для осуществления наиболее эффективного мониторинга качества инновационных проектов в сфере строительства.

Подводя итог, стоит отметить, что достижение качества проекта не гарантирует полного достижения качества продукта проекта. По заявленным условиям качество проекта обосновывается его сохранением в рамках проектного треугольника. Что касается инновационных строительных проектов, хоть данная отрасль и консервативна в вопросе реализации инноваций, подобные

проекты все же реализуются и выводят компании в лидирующие позиции на рынке. Безусловно, данные проекты на протяжении всего жизненного цикла сопровождаются наличием высокого уровня рисков, однако при должном уровне контроля и своевременности качественных управленческих решений инновационный проект имеет значительные шансы на успех.

Список литературы

1. Аверина Т.А., Баркалов С.А., Баутина Е.В. и др. *Азбука управления проектами*. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2018. 328 с.
2. Аверина Т.А., Баркалов С.А., Насонова Т.В. *Инновационный менеджмент в структурных схемах: учеб. пособие*. Воронеж, 2016.
3. Аверина Т.А., Баркалов С.А., Баутина Е.В., Колодяжный С.А. *Технологическое предпринимательство. Движение вперед – рост и развитие: учеб.* Старый Оскол, 2020.
4. Burkov V.N., Burkova I.V., Zaskanov V.G. *Smart Control Mechanisms in Digital Technologies of Decision-Making // Advances in Systems Science and Applications*. 2021. Vol. 21, no. 2. P. 1–7. doi: 10.25728/assa.2021.21.2.641.
5. Белоусов В.Е., Дорофеев Д.В., Кудрявцева И.С. *Механизмы планирования и оценивания результатов функционирования двухуровневых организационных систем // Проектное управление в строительстве*. 2021. № 2 (23). С. 90–96.
6. Белоусов В.Е., Дорофеев Д.В., Зенкова Е.Н. *Применение методов информационной инженерии для изменения структуры многоуровневых систем организационного управления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2021. Т. 21, № 2. С. 136–144. doi: 10.14529/ctcr210213.
7. Потудинский А.В., Кравец О.Я. *Многоуровневые организационные системы: управление на основе моделей вероятностного анализа моментов контроля состояния*. Воронеж, 2021.
8. Barkalov S., Kurochka P., Khodunov A., Kalinina N. *Selection Model of Work Technology Based on Multi-Criteria Evaluations // E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACSEE 2019*. 2020. P. 08030. doi: 10.1051/e3sconf/202016408030.
9. Голубкова И.В. *Основные подходы к управлению качеством на предприятии // Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2017. Т. 39. С. 1506–1510.
10. Манина Т.С. *Оценка эффективности инновационных проектов // Молодой ученый*. 2019. № 21 (259). С. 221–222.
11. Голубова О.С. *Показатели эффективности управления проектами в строительстве // Труды БГТУ*. 2017. № 2 (202). С. 37–43.
12. Selyutina L., Pesotskaya E., Rybnov E., Sitdikov S. *Risks accounting when building a management system for innovative and investment processes in construction // E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 217 (4). P. 11010. doi: 10.1051/e3sconf/202021711010.
13. Горбунов Д.В. *Риски инновационных проектов и методы их оценки // Вектор науки ТГУ*. 2014. № 3 (29). С. 123–126.
14. Малла Осман Шади Мустафа. *Особенности управления инновационными проектами в сфере строительства // Экономика, статистика и информатика*. 2015. № 3. С. 99–103.
15. Седаш Т.Н. *Инновационные проекты: особенности реализации и методы оценки // Финансовая аналитика: проблемы и решения*. 2012. № 2 (92). С. 20–27.

References

1. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V. et al. *Azbuka upravleniya proektami* [The ABC of Project Management]. Staryi Oskol: LLC “Thin High-tech Technologies”; 2018. 328 p. (In Russ.)
2. Averina T.A., Barkalov S.A., Nasonova T.V. *Innovatsionnyi menedzhment v strukturnykh skhemakh: ucheb. posobie* [Innovation Management in Structural Schemes. Textbook]. Voronezh, 2016. (In Russ.)
3. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V., Kolodyazhnyi S.A. *Tekhnologicheskoe predprinimatel'stvo. Dvizhenie vpered – rost i razvitie: ucheb.* [Technological entrepreneurship. Moving forward – growth and development. Textbook]. Staryi Oskol; 2020. (In Russ.)
4. Burkov V.N., Burkova I.V., Zaskanov V.G. *Smart Control Mechanisms in Digital Technologies of Decision-Making*. *Advances in Systems Science and Applications*. 2021;21(2):1–7. doi: 10.25728/assa.2021.21.2.641.

5. Belousov V.E., Dorofeev D.V., Kudryavtseva I.S. Mechanisms of planning and estimation of results of functioning of two-level organizational systems. *Proektnoe upravlenie v stroitel'stve*. 2021;2(23):90–96. (In Russ.)
6. Belousov V.E., Dorofeev D.V., Zenkova E.N. Application of Methods of Information Engineering for Change of Structure of Multilayer Systems of Organizational Management. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(2):136–144. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr210213.
7. Potudinskii A.V., Kravets O.Ya. *Mnogourovnevnye organizatsionnye sistemy: upravlenie na osnove modelei veroyatnostnogo analiza momentov kontrolya sostoyaniya* [Multilevel organizational systems: management based on probabilistic analysis models of state control moments]. Voronezh, 2021. (In Russ.)
8. Barkalov S., Kurochka P., Khodunov A., Kalinina N. Selection Model of Work Technology Based on Multi-Criteria Evaluations. In: *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019*; 2020. P. 08030. doi: 10.1051/e3sconf/202016408030.
9. Golubkova I.V. [Basic Approaches to Quality Management at the Enterprise]. *Scientific and methodological electronic journal "Concept"*. 2017;39:1506–1510. (In Russ.)
10. Manina T.S. [Evaluation of the Effectiveness of Innovative Projects]. *Molodoi uchenyi*. 2019;21(259):221–222. (In Russ.)
11. Holubava V.S. Performance indicators for project management in construction. *Works of BSTU*. 2017;2(202):37–43. (In Russ.)
12. Selyutina L., Pesotskaya E., Rybnov E., Sitdikov S. Risks accounting when building a management system for innovative and investment processes in construction. *E3S Web of Conferences*. 2020;217(4):11010. doi: 10.1051/e3sconf/202021711010.
13. Gorbunov D.V. Risks of innovative projects and methods of their assessment. *Vector of Science TSU*. 2014;3(29):123–126. (In Russ.)
14. Malla Osman Shadi Mustafa. Features innovative project management in the construction industry. *Economics, statistics and computer science*. 2015;(3):99–103. (In Russ.)
15. Sedash T.N. [Innovative Projects: Implementation Features and Evaluation Methods]. *Financial Analytics: Problems and Solutions*. 2012;2(92):20–27. (In Russ.)

Информация об авторах

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия; ta_averina@mail.ru.

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия; bsa610@yandex.ru.

Черных Мария Викторовна, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия; voronova-marie@mail.ru.

Information about the authors

Tat'yana A. Averina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta_averina@mail.ru.

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; bsa610@yandex.ru.

Mariya V. Chernykh, Master student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; voronova-marie@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 13.12.2021; одобрена после рецензирования 27.12.2021; принята к публикации 10.01.2022.

The article was submitted 13.12.2021; approved after reviewing 27.12.2021; accepted for publication 10.01.2022.

ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПОЛИТИЧЕСКОЙ НАУКЕ

Яков Давидович Гельруд¹, Людмила Ивановна Шестакова²

^{1, 2} Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

¹ gelrud@mail.ru

² shestakovali@susu.ru

Аннотация. Политические процессы представляют собой сложную систему организационного типа. В статье мы рассматриваем некоторые положения, которые вытекают из принципа системного подхода, имеющие прямое отношение к управлению сложными организационными системами. При этом основное внимание обращаем на тесную связь принципа системного подхода и математического моделирования систем организационного управления. **Цели и задачи.** Основной целью статьи является рассмотрение идей системного подхода, которые заключаются в акцентировании внимания на качества и свойства, присущие системе в целом. Поведение отдельных элементов системы анализируется только в том смысле, в каком они имеют отношение к целедостижению и к эффективности функционирования системы в целом. Реализацию системного подхода для организации управления с учетом принципа обратной связи обеспечивает математическое моделирование. **Методы.** Математическая модель позволяет формировать логически стройное формализованное описание управленческих задач. В формальной структуре задачи выделяются следующие элементы принятия решений: цели, управляемые переменные, внешние переменные, неконтролируемые параметры, ограничения, решение, критерий эффективности. Разработка *математической модели* заключается в установлении взаимосвязей между всеми элементами формальной структуры задачи и отражении их с помощью математических выражений (уравнений, неравенств и т. п.). **Результаты.** В статье представлена декомпозиция процесса разработки управленческого решения в составе следующих этапов: вербальная постановка задачи (формулировка проблемы), формирование математической модели, решение задачи, анализ решения, корректировка модели (при необходимости) и нахождение скорректированного решения, реализация окончательно принятого решения в практику управления. В конце статьи рассматривается пример решения управленческой задачи в соответствии со всеми перечисленными этапами. **Заключение.** Использование математического моделирования и методов для решения управленческих задач в профессиональной деятельности политика позволяет повысить эффективность принимаемых им решений и обеспечивает его коммуникационными средствами за счет использования профессионального математического языка.

Ключевые слова: системный подход, математическое моделирование, формальная структура задачи, декомпозиция процесса разработки управленческого решения

Для цитирования: Гельруд Я.Д., Шестакова Л.И. Основы математического моделирования в политической науке // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 116–124. doi: 10.14529/ctcr220110.

FUNDAMENTALS OF MATHEMATICAL MODELING IN POLITICAL SCIENCE

Yakov D. Gelrud¹, Lyudmila I. Shestakova²

^{1, 2} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ gelrud@mail.ru

² shestakovali@susu.ru

Abstract. Political processes are a complex system of organizational type. In this article, we are considering certain aspects, which stem from the principle of the system approach and are directly related to management of complex organizational systems. At the same time, the main attention is paid to the close

connection of the principle of the system approach and the mathematical modeling of the systems of organizational management. **Goals and objectives.** The main goal of the article is to consider the ideas of the system approach, which imply the focus of attention on the quality and properties inherent to the system in general. The behavior of separate elements of the system is analyzed only in the context in which these are related to the achievement of the goal and to the effectiveness of the system's functioning on the whole. Mathematical modeling ensures the fulfillment of the system approach for management organization taking into account the feedback principle. **Methods.** Mathematical model allows to form a logically harmonious formalized description of the managerial tasks. The following elements of decision-making are distinguished in the formal structure: goals, controllable variables, external variables, uncontrolled parameters, limitations, decision, efficiency criterion. The development of a *mathematical model* includes the determining of the interrelations between all the elements of the formal structure of the task and portraying them as mathematical expressions (equations, inequalities, etc.). **Results.** The article presents a decomposition of the process of developing a managerial solution comprising the following stages: verbal task setting (problem statement), forming of a mathematical model, task solving, solution analysis, model correction (if necessary) and finding a corrected solution, implementation of the final decision made in the management practice. In the end of the article, we consider an example of solving a managerial task in accordance with all the listed stages. **Conclusion.** The use of mathematical modeling and methods of solving managerial tasks in professional activity of a political figure allows to improve the effectiveness of the decisions made by this person and provides him/her with communication means, thanks to using the professional language of mathematics.

Keywords: system approach, mathematical modeling, formal structure of a task, decomposition of the process of developing a managerial solution.

For citation: Gelrud Ya.D., Shestakova L.I. Fundamentals of mathematical modeling in political science. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):116–124. (In Russ.). doi: 10.14529/ctcr220110.

Введение

Системы управления политическими процессами являются разновидностями систем управления организационного типа. Используемые здесь методы широко используются в экономике, социологии. Несмотря на сложный характер задач управления политическими процессами, длительное время политики шли методом проб и ошибок, опираясь на свой ум, здравый смысл и интуицию. Ум и интуиция, конечно, важны, но в настоящее время сложность политических процессов, их интенсивность, социальная цена ошибочно принятых решений стимулируют органы власти при принятии решений руководствоваться более современной и надежной методикой. Достижения зарубежных авторов в этой области достаточно подробно изложены в [1–5]. К сожалению, приходится констатировать, что достижения российских ученых в рассматриваемой области существенно скромнее. Во-первых, наша страна позже других стала внедрять математические методы и информатизацию в практику управления сложными организационными системами. Кроме того, унаследованный со времен СССР догматизм и зачастую абсурдная секретность при принятии политических решений создавали громадные трудности для изучения и практического применения методов моделирования в политической работе.

Также следует отметить, что подготовка наших специалистов-политологов оставляет желать лучшего в части изучения математического моделирования систем управления. В данной статье и серии последующих мы предполагаем дать обзор системы математических методов, используемых при моделировании в политической науке, и рекомендации по их применению.

1. Принцип системного подхода

Потребности общественного и научно-технического прогресса привели к появлению и активному использованию системного подхода. Это новое направление научного познания, суть которого заключается в нижеследующем.

Политические системы характеризуются организованной сложностью, способностью к целенаправленному поведению в условиях неопределенности информации и различных возмущающих воздействий. Сложные системы имеют свойства, которыми не обладают отдельные, входящие в систему объекты (это свойство называется «*эмерджентность*» от английского emergent – возникший) [6]. Большинство свойств сложной системы присущи не ее элементам, а проявляются

в результате взаимодействия этих элементов. Например, ни один из элементов самолета (двигатель, крылья, фюзеляж, шасси) летать не может, а самолет (как сложная система) летит! Господствовавшие прежде методы научного анализа показали свою несостоятельность при исследовании сложных систем.

Исследование системы в целом, а не как совокупность составляющих ее элементов, является основной идеей системного подхода. Согласно этому подходу главными являются качества, присущие системе в целом. Поведение отдельных элементов системы анализируется только в том смысле, в каком они имеют отношение к целедостижению и к эффективности функционирования системы в целом.

Особое значение приобретает системный подход для обеспечения эффективного управления *системами организационного типа* [7]. Это системы, элементами которых являются люди (функциональные службы, отдельные исполнители и т. п.).

Эти элементы организационных систем имеют локальные цели и свои критерии, которые в основном часто противоречат друг другу и не совпадают с целями и критериями эффективности системы в целом.

Понимание этого свойства (несовпадение локальных и глобальных целей и критериев) есть важнейший фактор создания системного мышления руководителей или отдельного лица, принимающего решение (ЛПР). Игнорирование этого принципа, попытка оптимизации работы отдельных подразделений, территорий без учета глобальных целей приводит к снижению эффективности деятельности организационной системы в целом. ЛПР должен обеспечить суммарную эффективность всей организации, зачастую игнорируя интересы отдельных ее подразделений, которые могут повредить достижению общей цели, при этом добиваться этого приходится в условиях противоречащих друг другу локальных целей. Лицо, принимающее политические решения, должно ясно осознавать, что достигнуть глобальных целей можно исключительно в случае, когда система рассматривается как единое целое, для чего требуется оценка действия всех ее составляющих элементов, их взаимовлияния и объединения их таким образом, чтобы добиться эффективного функционирования организации *в целом* [8].

При этом эффективное решение для системы в целом (*глобальный оптимум*) чаще всего не обеспечивает оптимального состояния отдельных частей системы. Этот основополагающий принцип системного подхода формулируется как «несовпадение глобальных и локальных оптимумов» [9].

Таким образом, основной проблемой эффективного управления системами организационного типа является нахождение глобального оптимума. Решение этой проблемы возможно двумя способами. Первый заключается в создании или совершенствовании самой организационной системы (системное проектирование). Второй способ заключается в эффективном решении задач управления, возникающих при функционировании организационных систем, на которые воздействует как внешняя среда, так и внутренние факторы.

В целях повышения эффективности деятельности организационных систем в силу объективной необходимости потребовалось создание соответствующей научной методологии, включающей специальные средства решения сложных задач организационного управления.

Прикладное направление системного подхода при решении задач организационного управления разрабатывалось в рамках разных научных дисциплин: «системный анализ», «исследование операций», «наука управления», «теория принятия решений» и т. п. У этих направлений много общего. Методологическую основу этих дисциплин составляют: математическое моделирование, системный подход и принцип обратной связи [10].

Далее рассмотрим сущность математического моделирования для обеспечения эффективного управления организационными системами. Именно математическое моделирование обеспечивает реализацию системного подхода для организации управления с учетом принципа обратной связи. При разработке управленческих решений математическое моделирование аналогично лабораторным экспериментам в технических науках.

2. Общие понятия математического моделирования

Управление в политической науке как области организационного управления обладает специфическими особенностями, связанными с большими рисками, неопределенностью и неполнотой информации. В этой области невозможно провести эксперименты для получения оптималь-

ного решения, так как политическую и социальную среду не вернуть в исходное состояние в силу необратимости политических процессов.

Моделирование заключается в исследовании не самого объекта, а некоторой искусственной системы, находящейся в объективном соответствии с анализируемым объектом, с целью получения о нем необходимой информации. Например, в самолетостроении строится уменьшенная модель самолета, помещается в аэродинамическую трубу и проводятся его испытания в различных условиях. В области организационного управления наиболее адекватным и мощным средством моделирования являются математические модели. Математическая модель позволяет учитывать и анализировать различные параметры системы, их сложные взаимосвязи и формировать логически стройное формализованное описание управленческих задач.

Справедливо утверждение, что правильно поставленная задача – половина ее решения, что само по себе является сложной задачей. Словесное описание задачи (вербальная постановка) должно осуществляться таким образом, чтобы обеспечить возможность ее дальнейшей формализации (представления на математическом языке), что и составляет суть математической модели.

Постановка задачи имеет четкую *формальную структуру*, что позволяет получить однозначную понимаемую ее формулировку.

В формальной структуре задачи выделяются следующие элементы принятия решений [11]:

- **цели**, которые должны быть достигнуты в результате решения задачи;
- **управляемые переменные**, значения которых определяются в процессе решения задачи;
- **внешние (экзогенные) переменные**, значения которых постоянны в процессе решения задачи, они зачастую имеют стохастический характер;
- **неконтролируемые параметры**, которые считаются вполне определенными при решении данной задачи;
- **ограничения** – это предельные значения выражений, в которые входят управляемые и неконтролируемые переменные, описывающих свойства и требования к системе принятия решения (ограничения по ресурсам, времени и пр.);
- **решение** – допустимое (удовлетворяющее всем ограничениям) множество значений управляемых переменных;
- **критерий эффективности** (целевая функция, показатель качества), который позволяет производить оценку и выбор лучшего (оптимального) варианта решений.

Все вышеприведенные элементы модели должны иметь количественный характер.

Разработка *математической модели* заключается в установлении взаимосвязей между всеми элементами формальной структуры задачи и отражении их с помощью математических выражений (уравнений, неравенств и т. п.).

Условия достижения цели записываются в виде выражений, отображающих зависимость между критериями эффективности и управляемыми переменными.

Совокупность математических выражений, описывающих ограничения и целевую функцию, и составляет **математическую модель** задачи.

Оптимальным решением называется допустимое решение, которое обеспечивает экстремум целевой функции (минимальное или максимальное ее значение в соответствии с условиями задачи).

Приведенные элементы структуры математической модели являются общими [12, 13]. При анализе отдельных управленческих задач может появиться дополнительный понятийный аппарат. Например, в задачах массового обслуживания появляются понятия *канал обслуживания*, *вероятность нахождения в системе n клиентов* и др.; в задачах управления проектами – *критические работы*, *критический путь*, *резервы времени* и т. п.; в задачах теории игр – *платежная матрица*, *цена игры*, *чистые и смешанные стратегии* и т. д.

При моделировании задачи прежде всего необходимо решить, какой принцип эффективности решения будет основополагающим (экономичности, социальной значимости или др.). Затем, если решающим принципом определен принцип экономичности, требуется выбрать его формулировку, соответствующую рассматриваемой ситуации принятия решений.

Существуют две формулировки принципа экономичности:

- требуется достичь заданных целей при минимальных затратах;
- требуется достичь максимума результата при заданных ограничениях на затраты.

Первая формулировка принципа экономичности называется «принцип экономии средств», а вторая – «принцип максимального результата».

Иногда у ЛПР возникает желание найти оптимальное решение задачи, используя сразу несколько критериев. Например, «найти решение, обеспечивающее максимальный эффект при минимуме издержек и минимуме времени».

Такая постановка задачи кажется вполне естественной и внешне привлекательной, но является неразрешимой. Нельзя одновременно найти экстремумы нескольких функций в случае их противоречивости. Например, мы ставим задачу добраться до работы за минимальное время с минимальными затратами, но минимальное время может быть достигнуто за счет поездки на такси, что дорого, а затраты могут быть сведены к минимуму, если пойти пешком, что долго. Такие постановки сложных задач управления в организационных системах называются многокритериальными, для этого рода задач существуют специальные методы нахождения компромиссного решения.

Вышеизложенное подтверждает принципиальную важность при постановке задачи корректного обоснования критерия эффективности, при этом выбирается и соответствующий вариант принципа экономичности.

Применение математического моделирования позволяет выработать *типологию* (классификацию) задач организационного управления.

Содержание задач определяет их индивидуальные различия, а форма определяет их сходство. Форма задачи определяется ее структурой – составом ее управляемых и неконтролируемых переменных и их взаимосвязью. Содержание задачи определяется сущностью этих величин. Процесс *абстракции* позволяет отделить содержание задачи от ее формы. Абстрагированная от содержания форма задачи формулируется на языке математики. Число конкретных содержательных задач принятия решений в системах организационного управления бесконечно большое, однако с точки зрения формы их можно отнести к определенным типам математических моделей. Это позволяет классифицировать задачи организационного управления, используя при этом их формальные, структурные описания. Отнесение задач к соответствующим типам математических моделей позволяет в наибольшей мере использовать уже накопленный теоретический и практический опыт их описания и разработанные алгоритмические средства их решения.

Классификация математических моделей весьма информативна. Всем известна классификация Линнея животного мира. Представим, что найдено некое ранее не известное биологам существо. При его рассмотрении обнаруживается, что его можно отнести к классу млекопитающих. Этот факт дает огромную информацию об этом животном! Так же и при моделировании задач управления организационными системами. ЛПР, знакомясь с задачей и пытаясь ее сформулировать, находит соответствие *формы* этой задачи, например, задаче линейного программирования.

Используя уже известную модель задачи линейного программирования, ЛПР теперь может дать ее четкую постановку, определить необходимую исходную информацию и ее вид для решения, а также результирующую информацию (оптимальные объемы производства, объемы необходимых видов ресурсов и их объективно обусловленные оценки и т. п.).

Значительный продуктивный практический опыт применения математического моделирования при разработке управленческих решений позволил создать понятийный аппарат и соответствующую терминологию для четкого формулирования задач на модельном и вербальном уровне. Представленные выше понятия, являющиеся структурными элементами модели, должны стать основой профессионального языка лиц, принимающих управленческие решения, влияя в существенной мере на их мышление.

Использование математического моделирования и методов для решения управленческих задач в профессиональной деятельности ЛПР позволяет повысить эффективность принимаемых им решений и обеспечивает его коммуникационными средствами за счет использования *профессионального математического языка*.

3. Декомпозиция процедуры разработки управленческого решения

Разработка управленческого решения является сложным и многоэтапным процессом. В литературе существуют разные варианты представления этого процесса в виде этапов [14, 15]. Наиболее адекватной нам представляется декомпозиция процесса разработки управленческого решения на следующие этапы:

- 1) вербальная постановка задачи (формулировка проблемы);
- 2) формирование математической модели;
- 3) решение задачи;
- 4) анализ решения;
- 5) корректировка модели (при необходимости) и нахождение скорректированного решения;
- 6) реализация окончательно принятого решения в практику управления.

Особую важность имеет первый этап. Здесь требуется правильно определить цели, выделить существенные ограничения, в наибольшей степени влияющие на принимаемое решение, сформулировать критерии оценки вариантов разработанных решений. На этом этапе максимально используется системный подход.

На втором этапе формируется математическая модель, представляющая собой по сути «перевод» на математический язык постановки задачи.

Третий этап заключается в генерировании различных вариантов управленческих решений посредством использования соответствующих алгоритмов, последующий их анализ и выбор наиболее эффективного. Найденное управленческое решение должно позволить наилучшим способом достигнуть поставленной цели с позиций системы *в целом*.

Именно в этом состоит главное преимущество системного подхода. Не должна ставиться цель обеспечения эффективного функционирования отдельных подразделений, так как благо для одного подразделения (региона, группы, и др.) может наносить вред другому или системе в целом. Поэтому понятие «наилучший вариант достижения поставленной цели» относительно, оно напрямую связано с тем, для кого оно принимается, фактически этот выбор осуществляет ЛПР.

Различные варианты действий называются *альтернативами*. Они бывают *зависимыми и независимыми*. Зависимые альтернативы оказывают влияние на оценки других. Например, альтернатива о реконструкции исторического центра города при планировании его развития влияет на другие варианты плана его реализации. Независимые альтернативы не влияют на оценку других альтернатив. Кроме того, встречаются задачи, в которых альтернативы формируются после реализации основных решений (конструируемые альтернативы).

При реализации каждой альтернативы может существовать несколько исходов: если известна их вероятность, то такая ситуация называется *принятие решений в условиях риска*, если неизвестна – *принятие решений в условиях неопределенности*. Если каждая альтернатива имеет только один исход, то такие модели называются детерминированными.

Итак, процесс нахождения наилучшего решения можно представить в виде следующей последовательности действий:

- определяется цель решения задачи;
- определяются возможные альтернативы ее решения;
- по каждой альтернативе определяются возможные исходы;
- производится оценка каждого исхода;
- исходя из поставленной цели, выбирается наилучшее решение.

На примере покажем реализацию вышеприведенных этапов.

Пример. Рассмотрим проблему создания и размещения агитационных материалов в период проведения предвыборной кампании. За основной критерий принимаем принцип экономичности. Допустим 3 варианта – телевидение, газеты, баннеры. Пусть стоимость рекламного видеоролика – 100 тыс. руб., его показ по ТВ – 40 тыс. руб. Стоимость рекламной статьи – 5 тыс. руб., печать – 20 тыс. руб. Стоимость и размещение баннера – 15 тыс. руб. Допустим, что количество людей, положительно реагирующих на агитационные материалы, увеличивается на 10 % с каждым показом видеоролика или выхода рекламной статьи (смотрят ТВ и читают газеты примерно одни и те же люди), а каждый баннер привлекает дополнительно одинаковое количество сторонников (они размещаются в разных точках региона). Эксперты оценили предполагаемое количество людей, привлеченных агитацией, при однократном размещении агитационного материала (табл. 1).

Прогнозы привлечения людей

Таблица 1

Table 1

People Attraction Predictions

Предполагаемое количество людей, привлеченных агитацией	Стоимость однократного размещения		
	ТВ – 140 тыс. руб.	Газета – 25 тыс. руб.	Баннер – 15 тыс. руб.
Оптимистический прогноз	13 000	10 000	2500
Наиболее вероятный	11 000	6000	2000
Пессимистический прогноз	8000	2000	600

В условиях ограниченного бюджета (1 млн руб.) необходимо определить оптимальное размещение, при котором будет получено наибольшее количество людей, привлеченных агитацией. Мы имеем три альтернативы – три варианта размещения, и для каждой альтернативы множество возможных исходов – различные годовые объемы размещения. Необходимо для каждого исхода рассчитать количество людей, привлеченных агитацией. В табл. 2 приведен вариант максимального использования ТВ.

Максимальное использование ТВ

Таблица 2

Table 2

Maximum TV usage

Предполагаемое количество людей, привлеченных агитацией	Стоимость размещения		
	20 ТВ – 900 тыс. руб.	4 газеты – 85 тыс. руб.	1 баннер – 15 тыс. руб.
Оптимистический прогноз	37 700	13 000	2500
Наиболее вероятный	31 900	7800	2000
Пессимистический прогноз	23 200	2600	600

В табл. 3 приведен вариант максимального использования газет.

Максимальное использование газет

Таблица 3

Table 3

Maximum use of newspapers

Предполагаемое количество людей, привлеченных агитацией	Стоимость размещения		
	1 ТВ – 140 тыс. руб.	40 газет – 805 тыс. руб.	3 баннера – 45 тыс. руб.
Оптимистический прогноз	13 000	49 000	3000
Наиболее вероятный	11 000	29 400	2400
Пессимистический прогноз	8000	9800	720

В табл. 4 приведен вариант среднего (равномерного) использования (10 ТВ, 10 газет, остальной бюджет – в баннеры).

Вариант равномерного использования

Таблица 4

Table 4

Uniform use option

Предполагаемое количество людей, привлеченных агитацией	Стоимость размещения		
	10 ТВ – 500 тыс. руб.	10 газет – 205 тыс. руб.	19 баннеров – 285 тыс. руб.
Оптимистический прогноз	24 700	19 000	47 500
Наиболее вероятный	20 900	11 400	38 000
Пессимистический прогноз	15 200	3800	11 400

Данный этап состоит в оценке возможных исходов путем расчета количества людей, привлеченных агитацией, получаемого при каждом варианте размещения.

Заключительный этап принятия решения представляет собой выбор оптимального решения. Из приведенных трех вариантов лучшим при всех прогнозах оказывается третий вариант, но таких вариантов распределения средств при данных условиях десятки миллионов. Для выбора лучшего варианта необходимо использовать специальные математические методы.

Кроме того, принятие решения зависит от заявленных в постановке задачи целей и соответствующих условий его принятия (размер бюджета, определенность информации, степень риска и т. п.).

В следующих статьях будут рассмотрены математические модели и методы для решения подобных задач в условиях риска и неопределенности.

Список литературы

1. Мангейм Дж.Б., Рич Р.К. Политология: методы исследования: пер. с англ. М.: Весь мир, 1997. 544 с.
2. Cox G.W. Strategic Voting Equilibria Under the Single Nontransferrable Vote // *The American Political Science Review*. 1994. Vol. 88, no. 3. P. 608–621.
3. Cox G.W., Shugart M.S. Strategic Voting under Proportional Representation // *Journal of Law, Economics and Organization*. 1996. Vol. 12, no. 2. P. 299–324.
4. Ordeshook P.C., Zeng L. Some Properties of Hare Voting with Strategic Voters // *Public Choice*. 1994. Vol. 78, no. 1. P. 87–101.
5. Potthoff H., Miller S. *The Social Democratic Party of Germany, 1848–2005*. Translated by M. Kane. Dietz, 2006.
6. Венцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 2010. 552 с.
7. Зайцев М.Г., Варюхин С.Е. Методы оптимизации управления и принятия решений: примеры, задачи, кейсы. М.: Дело АНХ, 2015. 640 с.
8. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2000. 296 с.
9. Гельруд Я.Д. Методы исследования в менеджменте: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2014. 282 с.
10. Козлов В.Н. Системный анализ, оптимизация и принятие решений. М.: Проспект, 2016. 176 с.
11. Баллод Б.А. Методы и алгоритмы принятия решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2009. 224 с.
12. Экономико-математические методы и прикладные модели / под. ред. В.В. Федосеева. М.: ЮНИТИ, 1999. 490 с.
13. Труды ИСА РАН: Математические модели социально-экономических процессов. Методы принятия решений. Численные методы решения. Экономические и социокультурные проблемы информационного общества. Управление рисками и безопасностью / под ред. С.В. Емельянова. М.: Красанд, 2013. 124 с.
14. Карданская Н.Л. Принятие управленческого решения. М.: ЮНИТИ, 1999. 407 с.
15. Андрейчиков А.В., Андрейчиков О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2001. 368 с.

References

1. Manheim J.B., Rich R.C. *Politologiya: metody issledovaniya* [Research Methods in Political Science]. Transl. from Engl. Moscow: Ves' mir Publ.; 1997. 544 p. (In Russ.)
2. Cox G.W. Strategic Voting Equilibria Under the Single Nontransferrable Vote. *The American Political Science Review*. 1994;88(3):608–621.
3. Cox G.W., Shugart M.S. Strategic Voting under Proportional Representation. *Journal of Law, Economics and Organization*. 1996;12(2):299–324.
4. Ordeshook P.C., Zeng L. Some Properties of Hare Voting with Strategic Voters. *Public Choice*. 1994;78(1):87–101.

5. Potthoff H., Miller S. *The Social Democratic Party of Germany, 1848–2005*. Translated by M. Kane. Dietz, 2006.
6. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsii: zadachi, printsipy, metodologiya* [Research of operations: Problems, principles, methodology]. Moscow: Nauka Publ., 2010. 552 p. (In Russ.)
7. Zaitsev M.G., Varyukhin S.E. *Metody optimizatsii upravleniya i prinyatiya reshenii: primery, zadachi, keisy* [Methods of optimization of management and decision-making: examples, tasks, cases]. Moscow: Delo ANKh Publ.; 2015. 640 p. (In Russ.)
8. Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya reshenii* [Theory and Methods of Decision Making]. Moscow: Logos Publ.; 2000. 296 p. (In Russ.)
9. Gel'rud Ya.D. *Metody issledovaniya v menedzhmente: ucheb. posobie* [Research methods in the management. Study guide]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2014. 282 p. (In Russ.)
10. Kozlov V.N. *Sistemnyi analiz, optimizatsiya i prinyatie reshenii* [System analysis, optimization and decision-making]. Moscow: Prospekt Publ.; 2016. 176 p. (In Russ.)
11. Ballod B.A. *Metody i algoritmy prinyatiya reshenii v ekonomike* [Methods and Algorithms of Decision-Making in Economics]. Moscow: Finansy i statistika Publ.; 2009. 224 p. (In Russ.)
12. Fedoseev V.V. (Ed.). *Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli* [Economic-mathematical methods and applied models]. Moscow: YuNITI Publ.; 1999. 490 p. (In Russ.)
13. Emel'yanov S.V. (Ed.). *Trudy ISA RAN: Matematicheskie modeli sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov. Metody prinyatiya reshenii. Chislennyye metody resheniya. Ekonomicheskie i sotsiokul'turnyye problemy informatsionnogo obshchestva. Upravlenie riskami i bezopasnost'yu* [Proceedings of the Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences: Mathematical Models of Social and Economical Processes. Methods of Decision-Making. Numerical Methods of Solving. Economical and Socio-cultural Problems of Information Society. Risk and Safety Management]. Moscow: Krasand Publ.; 2013. 124 p. (In Russ.)
14. Kardanskaya N.L. *Prinyatie upravlencheskogo resheniya* [Managerial Decision-Making]. Moscow: YuNITI Publ.; 1999. 407 p. (In Russ.)
15. Andreichikov A.V., Andreichikov O.N. *Analiz, sintez, planirovanie reshenii v ekonomike* [Analysis, synthesis and planning of decisions in economics]. Moscow: Finansy i statistika; 2001. 368 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Гельруд Яков Давидович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры международных отношений, политологии и регионоведения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; gelrud@mail.ru.

Шестакова Людмила Ивановна, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой международных отношений, политологии и регионоведения, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; shestakovali@susu.ru.

Information about the authors

Yakov D. Gelrud, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of International Relations, Political Science and Regional Studies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gelrud@mail.ru.

Lyudmila I. Shestakova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of International Relations, Political Science and Regional Studies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shestakovali@susu.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 14.11.2021; одобрена после рецензирования 28.11.2021; принята к публикации 05.12.2021.

The article was submitted 14.11.2021; approved after reviewing 28.11.2021; accepted for publication 05.12.2021.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

Automated process control systems

Научная статья
УДК 004.032.26 + 622.248.54
doi: 10.14529/ctcr220111

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИХВАТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ПО ГЛУБИНЕ СТВОЛА СКВАЖИНЫ НА ОСНОВЕ ЧЕТЫРЕХМОДУЛЬНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Шахбоз Шарифович Кодиров¹, Александр Леонидович Шестаков²

^{1, 2} Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

¹ shahboztjk@mail.ru

² admin@susu.ac.ru

Аннотация. Прихват технологического инструмента считается одним из самых капиталоемких видов аварий в бурении нефтяных и газовых скважин, которые оказывают существенное влияние на стоимость скважины. Прогнозирование прихвата технологического инструмента на стадии проектирования и в процессе бурения скважин позволяет минимизировать риски их возникновения, а также позволяет выбирать оптимальный способ предупреждения их возникновения для конкретных геолого-технических условий. Работа посвящена модели и алгоритму прогнозирования прихвата технологического инструмента по глубине ствола скважины на основе 4-модульной нейронной сети. В работе приведена классификация группы методов прогнозирования прихвата, а также критический обзор существующих методов. В работе приводится метод преобразования элементов входных данных на примере текстовых и категориальных типов данных. Благодаря этому в модели представляется возможность включения в перечень элементов входных данных ранее не воспринимаемые моделями такие геологические параметры, как типы горных пород, которые являются одним из важнейших факторов, влияющих на процесс возникновения прихвата. С целью формирования перечня значимых элементов входных данных представлен расчет коэффициентов корреляции между элементами входных данных и целевыми переменными. Экспериментальным методом выбирается тип и архитектура, а также гиперпараметры модульной нейронной сети. На основе обученной и проверенной 4-модульной модели прогнозирования предлагается алгоритм проведения процедуры прогнозирования прихвата на стадии проектирования и бурения скважины. Отличительной особенностью предлагаемого метода является то, что в модели прогнозирования в качестве элементов входных данных применяется широкий диапазон универсальных факторов, таких как геологические, технологические и реологические параметры бурового раствора, а также технико-технологические свойства и параметры бурения, влияющие на процесс возникновения всех типов прихвата. Предложенная модель в перспективе имеет возможность дообучаться и адаптироваться к новым данным, что часто происходит при бурении скважин на новых месторождениях.

Ключевые слова: классификация прихватов, методы распознавания и прогнозирования прихвата технологического инструмента, модульные нейронные сети, многослойный перцептрон, структурная регуляризация dropout, алгоритм прогнозирования прихвата технологического инструмента, корреляционная матрица

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта № 20-48-740031.

Для цитирования: Кодиров Ш.Ш., Шестаков А.Л. Модель и алгоритм прогнозирования прихвата технологического инструмента по глубине ствола скважины на основе четырехмодульной нейронной сети // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 125–138. doi: 10.14529/ctcr220111.

MODEL AND ALGORITHM FOR PREDICTING TECHNOLOGICAL TOOL STICKING BY WELLBORE DEPTH BASED ON THE FOUR-MODULE NEURAL NETWORK

Shahboz Sh. Qodirov¹, Aleksandr L. Shestakov²

^{1, 2} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ shahboztjk@mail.ru

² admin@susu.ac.ru

Abstract. Sticking the technological tools is considered one of the most capital-intensive types of accidents in oil and gas well drilling, which have a significant impact on the cost of the well. The prediction of stuck tools at the design stage and in the process of drilling allows to minimize the risks of its occurrence, and also allows to choose the optimal method of prevention for specific geological and technical conditions. The work is devoted to the model and algorithm of predicting technological tool sticking by the wellbore depth based on a 4-module neural network. In the work presented classification of a group of methods for predicting sticking and the main disadvantages of existing methods. In the paper is presented the method of transformation the input data elements, on the example of textual and categorical data types. Due to this, it is possible to include into the list of input data elements such geological parameters as rock types, which are one of the most important factors influencing the process of sticking tools, and previously not perceived by models. In order to form a list of significant input data elements, the calculation of correlation coefficients between input data elements and target variables is presented. The type and architecture, as well as the hyperparameters of the modular neural network are chosen experimentally. Based on the trained and tested 4-module prediction model, we propose an algorithm for conducting a sticking tool prediction procedure at the design and drilling stage of the well. A specific feature of the proposed method is that the prediction model uses a wide diapason of universal factors as input data elements, such as geological, technological and rheological parameters of drilling mud as well as technical and technological parameters of drilling influencing the process of all types of stuck tools. Model in perspective has the ability to retrain and adapt to new data, which often happens when drilling wells in new fields.

Keywords: classification of stuck tools, methods of technological tool sticking recognition and prediction, modular neural networks, multilayer perceptron, dropout structural regularization, technological tool sticking prediction algorithm, correlation matrix

Acknowledgments: The research was funded by RFBR and Chelyabinsk Region, project number 20-48-740031.

For citation: Qodirov Sh.Sh., Shestakov A.L. Model and Algorithm for Predicting Technological Tool Sticking by Wellbore Depth Based on the Four-Module Neural Network. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):125–138. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220111.

Введение

В бурении нефтяных и газовых скважин одним из самых тяжелых видов аварий, является прихват технологического инструмента (ТИ). Прихват ТИ – это сложный и быстропротекающий процесс, возникающий при нарушении условий устойчивости (стабильности) ствола скважины и подвижности колонны бурильных труб в стволе скважины, который приводит к потере подвижности технологического инструмента и невозможности дальнейшего углубления забоя скважины [1–3]. Несмотря на применение современных средств, технологий и оборудования для сооружения скважин при ведении буровых работ, прихваты все еще составляют весьма высокую долю (от 26 до 60 %) от общего числа встречающихся аварий [1–12]. В скважинах, в которых происходили прихваты, до 40 % из них перебуривались или ликвидировались, до 10 % прихваты в этих скважинах были ликвидированы более чем за 4 часа, и до 50 % среди них были ликвидированы менее чем за 4 часа, что приводило к большим убыткам за счет потери инструмента, потери пробуренной части ствола скважины, потери временных и материальных ресурсов, затраченных на перебуривание нового ствола [1–3]. Эти убытки становятся еще более серьезными, если в состав компоновки прихваченной части технологического инструмента входит забойная телеметрическая система.

Как было отмечено в работах [13, 14], по механизмам и причинам возникновения различают три типа прихвата: а) *дифференциальный прихват*; б) *прихват вследствие геометрических изменений ствола скважины*; в) *прихват вследствие зашламования или закупоривания кольцевого пространства твердыми частицами* [1–14]. Последние два типа (б и в) в зарубежной литературе именуется как механический прихват [1–9].

Прихват можно предотвратить, если по ранним, а также известным признакам правильно идентифицировать начальные условия возникновения того или иного вида прихватов и предпринимать своевременные меры, которые в нефтегазовом деле принято называть «предупреждением прихватов». Существует набор методов по предупреждению прихватов, которые обеспечивают безопасность и не требуют больших трудовых или материальных затрат. Однако своевременное распознавание и прогнозирование прихватов является сложной задачей, поскольку одни и те же наблюдаемые свойства, параметры и режимы бурения в разных ситуациях, условиях и операциях могут интерпретироваться по-разному. Достоверно распознавать и прогнозировать прихваты можно только, если учитывать большой набор влияющих факторов, что в полевых условиях в настоящее время не всегда возможно. Соответственно, разработка методов распознавания и прогнозирования прихватов, учитывающих множество важных факторов, позволит минимизировать риски возникновения непредвиденных прихватов. Следовательно, это позволит сократить финансовые, материальные и трудовые затраты во время буровых работ за счет сокращения времени на ликвидацию прихватов [1–3, 13].

По результатам глубокого анализа существующих методов и способов распознавания и прогнозирования прихватов было установлено, что все методы по физическому смыслу условно разделяются на две группы: *I – группа методов распознавания и прогнозирования прихватов по глубине ствола скважины*, заключающихся в том, что методами учитываются свойства и параметры по интервалам бурения скважины и выдаются прогнозы в виде вероятности возникновения прихватов, соответственно также по интервалам бурения; *II – группа методов распознавания и прогнозирования прихватов по времени бурения скважины*, заключающихся в том, что методами учитываются изменения значений множества параметров и режимов бурения по времени нахождения технологического инструмента в стволе скважины и выдаются прогнозы тоже по времени в виде вероятности возникновения прихвата по истечении определенного интервала времени [15].

В данной работе рассматриваются методы распознавания и прогнозирования прихватов по глубине бурения скважины.

Исследования в области развития и разработки методов распознавания и прогнозирования прихватов рассматривались в трудах отечественных и зарубежных учёных. Анализ наиболее значимых разработок зарубежных и отечественных авторов подробно рассмотрен в работах [13, 14]. Но следует отметить, что мнения отечественных и зарубежных ученых имеют расхождение в вопросе формулирования перечня входных данных (факторов, влияющих на процесс возникновения прихватов). Например, в работах авторов [2, 4–9] в качестве элементов входных данных применяются механические и динамические параметры и режимы бурения, такие как: осевая нагрузка на долото, частота вращения долота, крутящий момент, давление на стояке бурового насоса, расход бурового раствора, механическая скорость бурения. На практике бурения по этим показателям можно судить о начале возникновения прихватов, только если анализировать динамику изменения этих показателей за определенный промежуток временной последовательности. Но авторы используют мгновенные показатели и не учитывают динамику изменений этих параметров. Например, по показаниям крутящего момента практически невозможно распознавать прихват вследствие желобообразования, и это возможно только при анализе динамики изменения ряда параметров и режимов. По мгновенным показаниям механических и динамических параметров и режимов бурения распознавать или прогнозировать прихват не эффективно, так как они не описывают полноту процессов возникновения прихвата и сами зависят от множества других параметров. Следовательно, перечень упомянутых элементов входных данных не только не информативен, порой в некоторых случаях даже противоречив (см. [9], табл. 6–9 в работе).

Необходимо также отметить, что в своих моделях авторы не учитывали геологические параметры, такие как тип горной породы в зоне прихвата в качестве элемента входных данных. Одна-

ко для распознавания и прогнозирования прихватов по глубине ствола скважины данный фактор очень важен, так как в большей степени влияет на процесс возникновения прихватов, особенно дифференциального типа [1, 3].

В свою очередь, отечественными исследователями был проведен опрос специалистов, занимавшихся данной проблемой, о степени влияния различных факторов на возникновение прихватов. По результатам анализа существующих точек зрения с последующей статистической обработкой результатов ими был сформулирован перечень 18 факторов [10–12]. Перечень этих факторов подробно будут рассмотрены далее. Соответственно, нами тоже был осуществлен сбор данных о прихватах по этим 18 факторам.

Несмотря на огромный вклад указанных выше и других авторов, вопрос распознавания и прогнозирования прихвата ТИ все еще остается недостаточно изученной задачей. И в предложенных методах есть определенные недостатки, которые выше были подчеркнуты. Помимо этого, следует также отметить, что авторами не рассматривались применения модульных нейронных сетей, которые имеют высокую производительность в решении задачи мульти-классовой классификации и прогнозирования [16, 17].

На основе вышесказанного важной задачей является разработка модели прогнозирования прихвата с применением модульной нейронной сети, учитывающей важные и обобщающие факторы, влияющие на процесс возникновения прихвата. Данная статья посвящена разработке модели прогнозирования прихвата технологического инструмента по глубине ствола скважины на основе 4-модульной нейронной сети.

1. Подготовка набора данных о прихватах по глубине ствола скважины

В рассматриваемой работе в качестве набора данных о прихватах были использованы промысловые данные о прихватах ООО «НК ПАРИТЕТ», ООО «РУСГЕОСЕРВИС», а также архивные данные ВНИИКРнефти и ГУП «Гаджикнефть» по 146 прихватам скважин, в том числе 38 из них – дифференциальный прихват, 49 – прихват вследствие геометрических изменений ствола скважины и 59 – прихват вследствие зашламования или закупоривания кольцевого пространства твердыми частицами.

1.1. Перечень элементов входных данных

В модели в качестве элементов входных данных применяются косвенно-диагностические параметры (КДП), такие как: $X_{1,1}$ – глубина, на которой находится долото в момент прихвата, м; $X_{1,2}$ – наружный диаметр долота, мм; X_2 – тип горных пород в предполагаемой зоне прихвата; X_3 – пластовое давление в предполагаемой зоне прихвата, кгс/см²; X_4 – разность между давлением столба промывочной жидкости и пластовым давлением, в предполагаемой зоне прихвата, кгс/см²; X_5 – плотность бурового раствора, г/см³; X_6 – условная вязкость, с; X_7 – статическое напряжение сдвига при одной минуте в покое (СНС₁), мгс/см²; X_8 – статическое напряжение сдвига при 10 минутах в покое (СНС₁₀), мгс/см²; X_9 – водоотдача бурового раствора, см³/30 мин; X_{10} – длина компоновки низа бурильной колонны (КНБК), м; X_{11} – зазор между стенкой скважины и наружным диаметром максимально длинной части КНБК, мм; X_{12} – зенитный угол участка ствола скважины, градус; X_{13} – температура на глубине прихвата, °С; X_{14} – количество нефти в растворе, %; X_{15} – компоненты понизителя вязкости; X_{16} – компоненты понизителя водоотдачи; X_{17} – компоненты ингибирующей добавки; X_{18} – компоненты смазывающей добавки.

1.2. Преобразование некоторых элементов входных данных

Эти диагностические параметры по характеру описаний условно разделяются на *геологические* (X_2, X_3, X_{13}), *технологические и реологические параметры бурового раствора* ($X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}$), *технично-технологические параметры бурения* ($X_{1,1}, X_{1,2}, X_{10}, X_{11}, X_{12}$), а также по степени управляемости условно разделяются на *управляемые* ($X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}$) и *неуправляемые* ($X_{1,1}, X_{1,2}, X_2, X_3, X_4, X_5, X_{12}, X_{13}$) параметры. По степени изменчивости по времени они условно считаются статическими [10–12].

Как видно из описаний, некоторые косвенно-диагностические параметры, такие как X_2 , X_{15} , X_{16} , X_{17} и X_{18} , не числовые, а категориальные. Следовательно, разработка моделей на таких типах данных без дополнительного преобразования невозможна. Один из методов преобразования таких типов данных – это разделение элемента данных на субэлементы. Соответственно, данный метод был применен к нашим данным. Суть этого метода заключается в следующем: каждый элемент данных разделяется на субэлементы и каждому субэлементу данных присваиваются долевое значение в соответствии со своим основным элементом данных (табл. 1) [13, 14]. Такое разделение или своего рода кодирование позволяет повысить информативность выборки для нейронной сети и в дальнейшем улучшить качество ее работы [13].

Таблица 1

Разделение элементов данных на субэлементы [13, 14]

Table 1

Dividing data elements into sub-elements [13, 14]

X_2 – тип горных пород в зоне прихвата				X_{15} – понизители вязкости				X_{16} – понизители водоотдачи				X_{17} – ингибирующие добавки				X_{18} – смазывающие добавки		
$X_{2.1}$	$X_{2.2}$	$X_{2.3}$	$X_{2.4}$	$X_{15.1}$	$X_{15.2}$	$X_{15.3}$	$X_{15.4}$	$X_{16.1}$	$X_{16.2}$	$X_{16.3}$	$X_{16.4}$	$X_{17.1}$	$X_{17.2}$	$X_{17.3}$	$X_{17.4}$	$X_{18.1}$	$X_{18.2}$	$X_{18.3}$
Тип 1, %	Тип 2, %	Тип 3, %	Тип 4, %	Компонент 1, %	Компонент 2, %	Компонент 3, %	Компонент 4, %	Компонент 1, %	Компонент 2, %	Компонент 3, %	Компонент 4, %	Компонент 1, %	Компонент 2, %	Компонент 3, %	Компонент 4, %	Компонент 1, %	Компонент 2, %	Компонент 3, %

После того как некоторые элементы выборки были преобразованы, в результате были получены 35 компонентов КДП, которые косвенно характеризуют состояние технологического инструмента, находящегося в стволе скважины, на предмет возможного риска возникновения прихвата. Так как набор имеющихся данных состоит из трех групп прихватов, в качестве выходной информации о прихвате рассматривается 4 возможных состояния: Y_1 – дифференциальный прихват (под действием перепада давления); Y_2 – прихват вследствие геометрических изменений ствола скважины; Y_3 – прихват вследствие зашламования или закупоривания кольцевого пространства твердыми частицами; Y_4 – отсутствие прихвата.

1.3. Корреляционная матрица

Корреляционный анализ, как правило, используется как вспомогательный инструмент для понимания качества данных. Одним из важных показателей корреляционного анализа является коэффициент корреляции. Этот коэффициент в большинстве случаев рассчитывается для пары переменных, то есть между элементом набора данных – X_g и целевой переменной – Y_q .

Существует множество методов расчета коэффициента корреляции, среди которых часто применяемыми являются методы Пирсона, Спирмена и Кендалла. В решаемой задаче воспользуемся методом Спирмена, так как этот метод не требует строгих соблюдения нормального закона распределения для элементов данных в выборке и линейной зависимости между парами переменных [18]. Следовательно, для оценки статистической взаимосвязи между парами переменных из числа элемента входных данных и целевой переменной, на имеющихся исходных данных о прихватах по глубине ствола скважины произведен расчет коэффициентов корреляции. Результаты расчетов представлены на рис. 1а, 1б и 1с в виде корреляционной матрицы.

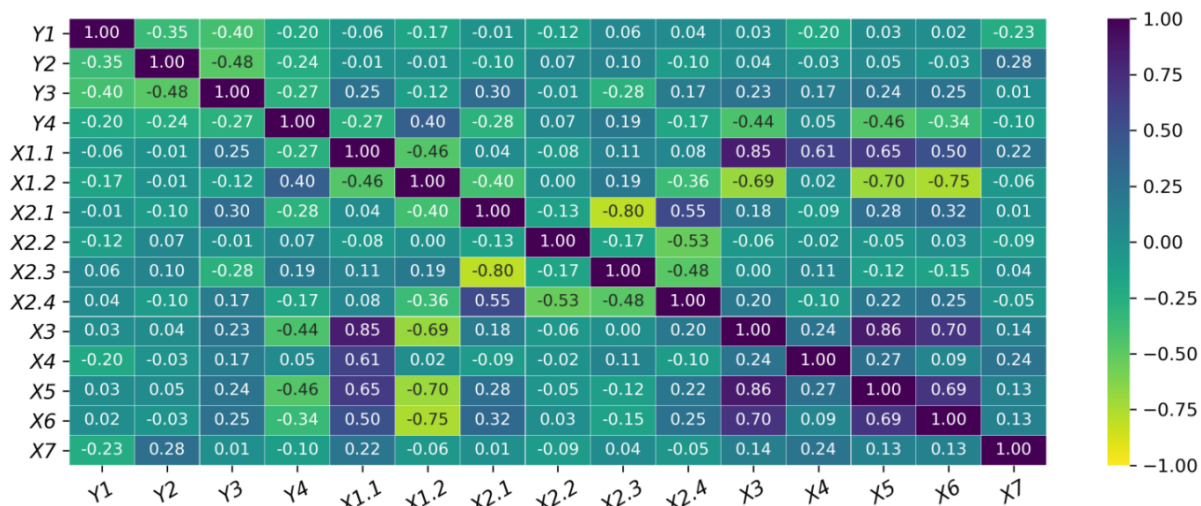


Рис. 1а. Корреляционная матрица, часть 1
Fig. 1a. Correlation matrix, part 1

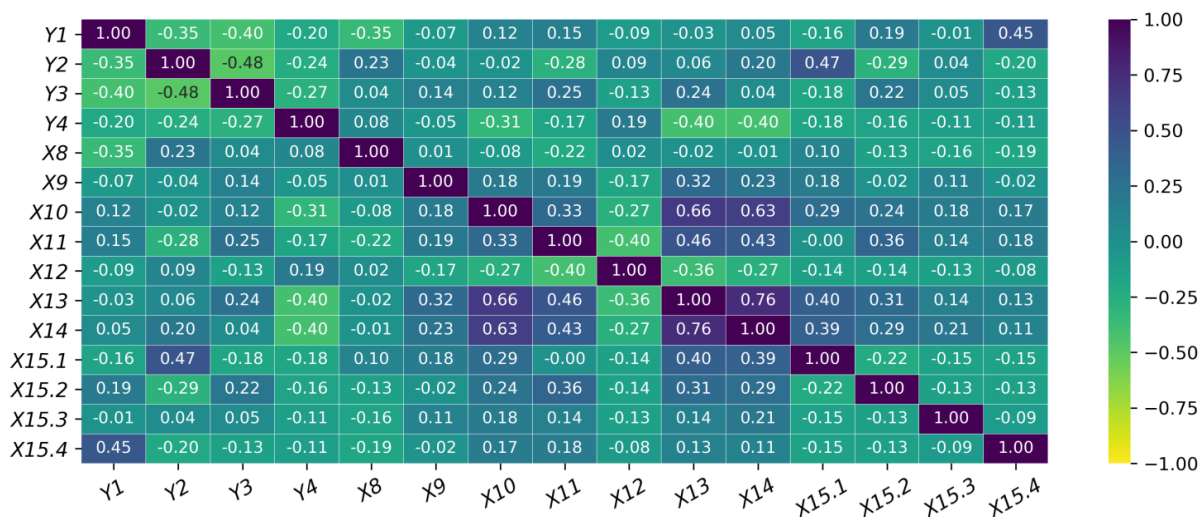


Рис. 1б. Корреляционная матрица, часть 2
Fig. 1b. Correlation matrix, part 2

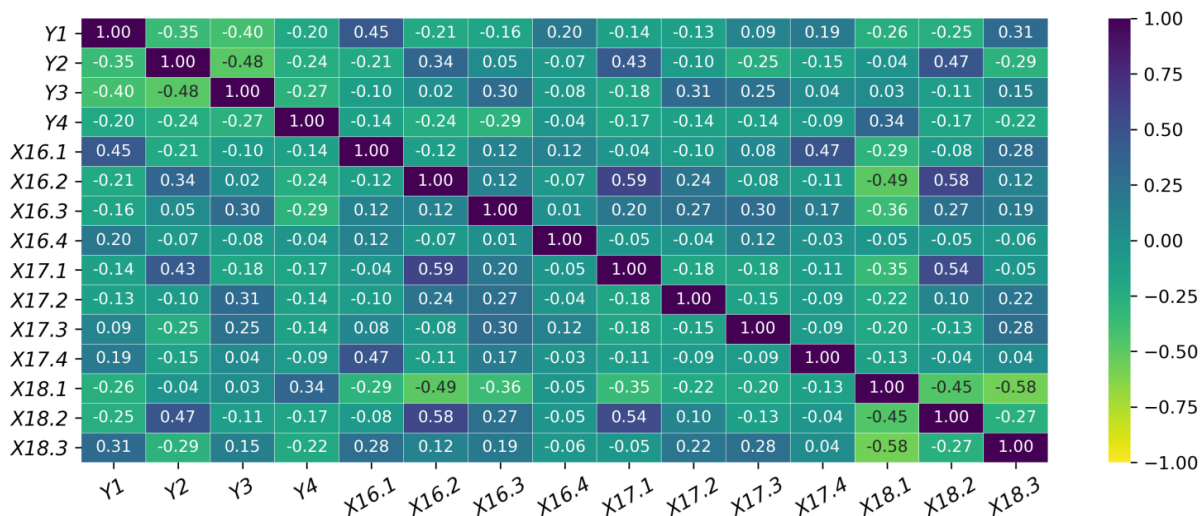


Рис. 1с. Корреляционная матрица, часть 3
Fig. 1c. Correlation matrix, part 3

По значениям коэффициентов корреляции все элементы входных данных были разделены на два списка: коррелирующие и слабокоррелирующие элементы. Далее для оценки значимости слабокоррелирующих элементов входных данных проводились экспериментальные исследования: обучалась и оценивалась сеть с участием всех элементов данных. А также обучалась и оценивалась сеть с последовательным исключением слабокоррелирующих элементов данных. Анализ результатов со сравнением мер ошибок работы сети показал, что все элементы входных данных имеют весомое влияние на качество работы сети и их исключать из набора данных нецелесообразно.

1.4. Разделение набора данных с последующей нормализацией значений их элементов

Для получения более точной и обобщенной оценки работоспособности модели [19–21] имеющийся набор данных был разделен на три непересекающиеся подвыборки: тренировочную, проверочную и тестовую, с последующей нормализацией значений элементов подвыборок. Это делалось для того, чтобы разрабатываемую модель обучить на тренировочной подвыборке, а процесс обучения модели оценивать на проверочной подвыборке. Соответственно, по завершении процесса обучения и проверки модели тестировать обученную модель с применением тестовой подвыборки.

Что касается нормализации, то это делалось с целью центрирования данных и приведения их к единичной дисперсии [13, 19–21]:

$$X_{\text{норм}g} = \frac{x_g - \bar{X}}{\sigma}, \quad (1)$$

где \bar{X} – среднее значение по X_g -му элементу данных; σ – среднеквадратическое отклонение.

2. Модульные нейронные сети

Модульные нейронные сети применяются при решении многих инженерных задач, особенно в задачах классификаций, в большинстве случаев превосходят результаты решения, полученные полносвязанными сетями [16, 17, 19]. Это связано с тем, что каждый отдельный модуль извлекает свои независимые признаки одного класса из нескольких классов. Таким образом, каждый модуль воспроизводит неповторимый другими модулями результат, следовательно, объединение выходных сигналов всех модулей в единую сеть позволяет повысить точность работы сети [16, 17, 19].

Основной проблемой проектирования модульных нейронных сетей является задача оптимального выбора структуры и топологии нейронной сети, а также правильная организация количества модулей [19]. В данной части работы в качестве модуля будет использована трехслойная полносвязанная нейронная сеть с оптимальными параметрами из работы [13].

Что касается организации количества модулей, то из условия оптимальности организации модульной нейронной сети [16, 17, 19] известно, что если на входы каждого модуля подавать одинаковые элементы набора данных и при этом конфигурации модулей идентичны между собой, тогда в процессе обучения сети каждый модуль будет извлекать одинаковые признаки (паттерны). То есть модули будут копировать друг друга, следовательно, смысл модульности сети пропадает, так как результаты работы такой сети ни чем не лучше полносвязанной сети с такими же конфигурациями. Для успешной разработки модульной сети необходимо, чтобы на входы каждого модуля поступали различные части элементов набора входных данных (не знакомые другим модулям части элементов данных) или их сочетание. В таком случае результаты работы полученной модульной сети будут значительно отличаться от результатов работы полносвязанной сети [16, 17, 19].

Как было отмечено выше, элементы набора данных о прихватах по глубине ствола скважины, состоящие из диагностических параметров, по характеру описаний условно разделяются на геологические, технологические и реологические параметры бурового раствора и технико-технологические параметры бурения. Исходя из этого, предлагается модульная сеть, состоящая из четырех модулей, каждый из которых представляет собой трехслойную ПНС из работы [13]. Соответственно, модули между собой имеют идентичные структуры за исключением входов, которые отличаются по качеству и количеству. Например, на входы: первого модуля поступают элементы данных, описывающие геологические параметры; второго модуля – элементы данных,

описывающие технологические и реологические параметры бурового раствора; третьего модуля – элементы данных, описывающие технико-технологические параметры бурения; четвертого модуля – все элементы данных, в том числе геологические параметры, технологические и реологические параметры бурового раствора, а также технико-технологические параметры бурения. Модули между собой построены параллельно, но выходы у них объединены полносвязанными слоями интегратора, который в свою очередь имеет 12 нейронов во входном слое, 128 нейронов в скрытом и, соответственно, 4 в выходном слое, так как имеем 4 группы образцов данных (рис. 2) [16, 17, 19]. Предложенная четырехмодульная нейронная сеть построена по стратегии стек-ансамблирования (stacking ensemble strategies) [16, 17, 19–21].

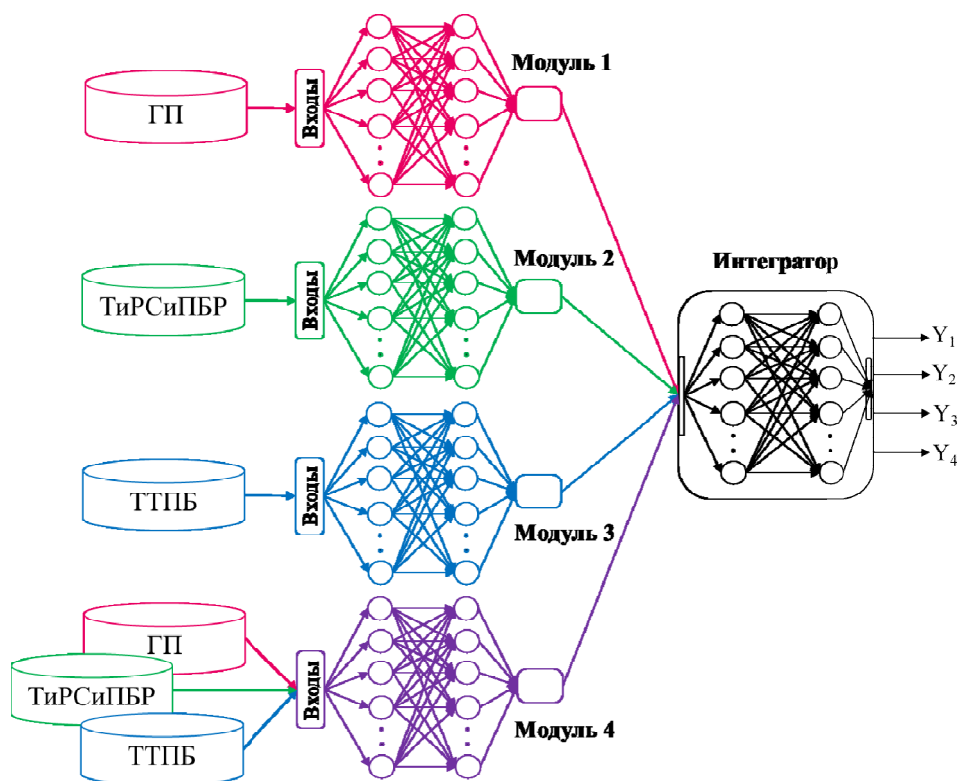


Рис. 2. Архитектура четырехмодульной нейронной сети: ГП – геологические параметры; ТиРСиПБР – технологические и реологические свойства и параметры бурового раствора; ТТПБ – технико-технологические параметры бурения

Fig. 2. The architecture of the four-module neural network: ГП – geological parameters; ТиРСиПБР – technological and rheological properties and parameters of the drilling fluid; ТТПБ – technical-technological parameters of drilling

Так как модульные сети относятся к многослойным персептронам, то, соответственно, для данной сети применяется алгоритм обучения сети с учителем и метод обратного распространения ошибки [19–21].

2.1. Функция ошибки работы сети

Для успешной реализации процесса обучения нейронной сети необходимо правильно определить функцию ошибки с учетом условия решаемой задачи и желаемого результата. *Функция ошибки* – это целевая функция, величину которой необходимо минимизировать в ходе обучения сети, следовательно, для решаемой нами задачи она будет представлять собой критерий успеха. Поскольку выходная информация рассматриваемой задачи имеет вероятностное распределение, в качестве *функции ошибки* применяем категориальную перекрестную энтропию (*Categorical cross-entropy*), которая задается выражением [13, 14, 19–21]:

$$L_{loss_q} = - \sum_{q=1}^4 Y_q \log(\hat{Y}_q), \quad (2)$$

где \hat{Y}_q – предсказанное моделью значение целевой переменной; Y_q – желаемое значение целевой

переменной [19]. Целевая переменная \hat{Y}_q представляет собой вектор из q элементов, соответствующий истинному полиномиальному распределению вероятности по всем классам. Если правильно определен только один класс, то вектор будет унитарным. Выходные данные сети (Y_q) также представляют собой вектор из q элементов, но соответствующий уже предсказанному сетью полиномиальному распределению вероятности. Категориальная перекрестная энтропия оценивает потери путем сравнения этих двух векторов (Y_q, \hat{Y}_q).

2.2. Мера оценки качества работы сети

В качестве меры оценки качества работы сети для мониторинга на этапах обучения, проверки и тестирования сети выберем меру *Accuracy* (*ACC*), так как имеющиеся исходные данные о прихватах по глубине ствола скважины имеют относительно симметричную пропорцию групп образцов данных. Мера *ACC* описывается следующим выражением [19–21]:

$$ACC = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}, \quad (3)$$

где *TP* – (true positive) количество верно предсказанных сетью прихватов; *TN* – (true negative) количество верно предсказанных сетью отсутствующих прихватов; *FP* – (false positive) количество неверно предсказанных сетью прихватов; *FN* – (false negative) количество неверно предсказанных сетью отсутствующих прихватов.

Данная мера в основном используется в задачах классификации и отображает долю точности работы сети. Под долей точности в рассматриваемой работе подразумевается вероятность правильного прогнозирования с распознаванием видов прихвата.

2.3. Оптимизатор процесса обучения сети

Оптимизатор – это алгоритм, с помощью которого сеть будет обновлять веса синаптических связей, опираясь на наблюдаемые данные и величины функции ошибки. Существует множество типов оптимизаторов, но ни один из них не может быть универсальным или лучшим для всех типов задач. Каждая задача имеет свою архитектуру сети, следовательно, оптимизатор для такой сети тоже будет специфическим. На практике оптимизатор выбирается только по результатам серии экспериментальных вычислений с сопоставлением результатов качества работы сети по каждому оптимизатору. По результатам экспериментальных вычислений для решаемой задачи среди множества типов оптимизаторов, в том числе SGD, Adadelta, Adagrad, Adam, Adamax, Adaline, Nadam и RMSprop, был определен наилучший оптимизатор – Adam (Adaptive Moment Estimation), работающий по стратегии градиентного спуска, но только с импульсом [19–21].

2.4. Структурная регуляризация *dropout*

Глубокие нейронные сети с большим количеством слоев способны создавать коадаптации элементов. «Коадаптация» – термин из нейронауки, означающий ситуацию, при которой связь между двумя элементами становится чрезвычайно сильной за счет ослабления связей между другими элементами. Обычно это приводит к переобучению модели на текущих данных. Один из вариантов борьбы с переобучением сети – это структурная регуляризация под названием «вероятностное прореживание» (на английском *dropout*). Во время обучения прореживание на вероятностной основе отбрасывает некоторые межнейронные связи в слоях [19–21].

Вероятностное прореживание межнейронных связей позволяет гарантировать, что никакой конкретный нейрон не окажется в постоянной зависимости от другого конкретного нейрона, благодаря чему модели становятся ошибкоустойчивыми. Прореживание не требует добавления в модель дополнительных параметров, а лишь одного гиперпараметра – «коэффициента прореживания».

В нашем случае экспериментальным способом выбраны коэффициенты прореживания 0,3 для второго и третьего слоев каждого модуля, а также для второго слоя интегратора.

Важно отметить, что прореживание применяется только во время обучения, следовательно, на этапе тестирования прореживание не производится [19].

В результате имеем четырехмодульную нейронную сеть с наилучшими гиперпараметрами, которые представлены в табл. 2.

Основные параметры четырехмодульной нейронной сети

Table 2

The main parameters of the four-module neural network

Параметры сети	Модуль 1	Модуль 2	Модуль 3	Модуль 4	Интегратор
Количество входов	8	22	5	35	16
Количество входов сети из числа элементов входных данных или выходов модулей и моделей	97	97	97	97	128
Функция активации первого слоя	–	–	–	–	ReLU
Коэффициент прореживания (dropout)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Количество нейронов во втором слое	52	52	52	52	52
Функция активации второго слоя	ReLU	ReLU	ReLU	ReLU	Sigmoid
Коэффициент прореживания (dropout)	0,3	0,3	0,3	0,3	–
Количество нейронов в выходном слое	4	4	4	4	4
Функция активации выходного слоя	ReLU	ReLU	ReLU	ReLU	Softmax
Тип функции ошибки сети	Категориальная перекрестная энтропия (Categorical cross-entropy)				
Тип оптимизатора сети	Adam				
Мера оценка качество работы сети	Accuracy (ACC)				
Количество эпох обучения сети	40–80				

Результаты вычислительных экспериментов на тестовой подвыборке показали, что точность работы четырехмодульной нейронной сети, которая имеет вероятность правильного прогнозирования с распознаванием видов прихвата 0,96, превосходит точность работы полносвязанной сети из работы [13], имеющий вероятность правильного прогнозирования с распознаванием видов прихвата 0,935.

2.5. Результаты вычислительных экспериментов

После того как модель прогнозирования была обучена и протестирована, приступают к процедуре экспериментальной оценки работоспособности модели, которая выполняется по следующему алгоритму (рис. 3) [14]: измеряют, определяют или рассчитывают косвенно-диагностические параметры бурения скважины (КДП) (рис. 3, позиция 1) для прогнозируемого интервала бурения бурящейся (или проекта) скважины. Производят нормализацию значений КДП (рис. 3, позиция 2) и передают в модель прогнозирования (рис. 3, позиция 3), которая, в свою очередь, выдает прогноз на прихват (рис. 3, позиция 4). Если модель прогнозирует (рис. 3, позиция 4) отсутствие прихвата, то на этом завершается (рис. 3, позиция 5) процедура прогнозирования для имеющихся КДП.

Если модель прогнозирует (рис. 3, позиция 4) прихват с указанием типа прихвата (рис. 3, позиция 3), тогда необходимо (рис. 3, позиция 7) скорректировать значения управляемых параметров из перечня КДП и повторять процедуру прогнозирования до тех пор, пока не достигается отрицательный прогноз на прихват. Тем не менее также необходимо обращать внимание на значение неуправляемых КДП и провести проверку правильности расчетов и определение этих параметров. Если изменениями значений управляемых параметров из перечня КДП не достигается отрицательного прогноза на прихват, то следует приступать к выработке мер по предупреждению или выводу скважины из прихватоопасного состояния [14].



Рис. 3. Алгоритм прогнозирования прихвата технологического инструмента по глубине ствола скважины [14]

Fig. 3. Algorithm of prediction technological tool sticking by the wellbore depth [14]

Предлагаемый способ прогнозирования прихвата технологического инструмента был реализован (воспроизведен) с использованием промысловых данных о прихватах ООО «НК ПАРИТЕТ», ООО «РУСГЕОСЕРВИС», а также архивных данных ВНИИКРнефть и ГУП «Гаджикнефть». В результате процедур по прогнозированию были получены прогнозные значения по глубине ствола скважины, показывающие вероятность возникновения прихватов для каждого интервала бурения. Способ продемонстрировал прогнозирование прихватов с вероятностью 0,96.

Заключение

В заключение следует отметить, что в разработке модели и алгоритма прогнозирования прихвата технологического инструмента на основе четырехмодульной нейронной сети учитываются важные и универсальные факторы, влияющие на природу возникновения прихватов, в том числе типы горных пород, химические реагенты и добавки в качестве элементов входных данных. В результате предложенная модель позволяет прогнозировать возникновение и определять тип прихвата (на экспериментальных данных) с вероятностью 0,96, что более чем на 20 % превосходит по точности традиционные методы, которые рассматривались в работе [13].

Представленная в статье модель и алгоритм прогнозирования прихватов может применяться в буровых предприятиях в качестве вспомогательного инструмента для оценки риска возможного возникновения прихвата (по интервалам бурения) на стадии проектирования или в процессе бурения скважины, что позволит минимизировать риски их возникновения. Отличительная способность представленной модели состоит в том, что модель имеет возможность дообучаться и адаптироваться под имеющиеся в буровом предприятии условия (перечень импортных реагентов, химических добавок, геологических условий, а также инструментов и технологий бурения).

Список литературы

1. Muqem M.A., Weekse A.E., Al-Hajji A.A. *Stuck Pipe Best Practices – A Challenging Approach to Reducing Stuck Pipe Costs // Presented at the SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition. Al-Khobar, Saudi Arabia. 2012. P. 1–10. doi: 10.2118/160845-MS.*
2. Alshaikh A.A., Albassam M.K., Al Gharbi S.H., Al-Yami A.S. *Detection of Stuck Pipe Early Signs and the Way Toward Automation // Society of Petroleum Engineers. 2018. P. 1–10. doi: 10.2118/192975-MS.*
3. Shahbazi K., Shahri M.P. *The development of a window for stuck pipe prediction // Petroleum Science and Technology. 2012. Vol. 30, iss. 2. P. 176–192. doi: 10.1080/10916461003792302.*
4. Miri R., Sampaio J.H.B., Afshar M., Lourenco A. *Development of Artificial Neural Networks to Predict Differential Pipe Sticking in Iranian Offshore Oil Fields // Society of Petroleum Engineers. 2007. P. 1–15. doi: 10.2118/108500-MS.*
5. Heinze L., Al-Baiyat I.A. *Implementing Artificial Neural Networks and Support Vector Machines in Stuck Pipe Prediction // Society of Petroleum Engineers. Kuwait. 2012. P. 1–13. doi: 10.2118/163370-MS.*
6. Jahanbakhshi R., Keshavarzi R., Jahanbakhshi R. *Intelligent Prediction of Wellbore Stability in Oil And Gas Wells: An Artificial Neural Network Approach // Presented at the 46th U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium. Chicago, Illinois. 2012. P. 1–9. ARMA-2012-243.*
7. Morteza E.N., Peyman E., Saeid J. *Prediction of drilling pipe sticking by active learning method (ALM) // Academic Journals. Journal of Petroleum and Gas Engineering. 2013. Vol. 4(7). P. 173–183. doi: 10.5897/JPGE2013.0166.*
8. Shoraka S.A.R., Shadzadeh S.R., Shahri M.P. *Prediction of Stuck Pipe in Iranian South Oil Fields Using Multivariate Statistical Analysis // Society of Petroleum Engineers. 2011. P. 1–10. doi: 10.2118/151076-MS.*
9. Murillo A., Neuman J., Samuel R. *Pipe sticking prediction and avoidance using adaptive fuzzy logic and neural network modeling // Paper presented at Production and Operations Symposium held in Oklahoma City, Oklahoma, USA. 2009. P. 1–15. SPE-120128.*
10. Самотой А.К., Воротнюк О.В. *Анализ априорных данных о факторах, действующих при прихвате колонны труб // Тр. ВНИИБТ. Борьба с осложнениями при бурении скважин. 1973. Вып. 7. С. 25–32.*
11. Аветисов А.Г., Ахмадуллин М.М., Самотой А.К. *Прогнозирование, предупреждение и ликвидация прихватов с использованием статистических методов // Тематический научно-технический обзор. М.: ВНИИОЭНГ. 1977. С. 62–73.*
12. Мирзаджанзаде А.Х., Аветисов А.Г., Булатов А.И. и др. *Методические указания по применению статистических методов в бурении нефтяных и газовых скважин. Краснодар, 1983. 72 с.*
13. Кодиров Ш.Ш., Шестаков А.Л. *Разработка искусственной нейронной сети для прогнозирования прихватов колонн бурильных труб // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 3. С. 20–32. doi: 10.14529/ctcr190302*
14. Пат. 2735794 Российская Федерация, МПК G06N 3/08 (2006.01). *Способ прогнозирования прихватов бурильных труб / А.Л. Шестаков, Ш.Ш. Кодиров; заявитель ЮУрГУ (НИУ). № 2020121477; заявл. 23.06.2020; опубли. 09.11.2020. 23 с.*
15. Qodirov S., Shestakov A. *Development of Artificial Neural Network for Predicting Drill Pipe Sticking in Real-Time Well Drilling Process // 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, Russia. 2020. P. 139–144. doi: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267873.*
16. Toreifi H., Rostami H., Manshad A.K. *New method for prediction and solving the problem of drilling fluid loss using modular neural network and particle swarm optimization algorithm // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2014. Vol. 4. P. 371–379. doi: 10.1007/s13202-014-0102-5.*
17. Shukla A., Tiwari R., Kala R. *Modular Neural Networks. In: Towards Hybrid and Adaptive Computing. Studies in Computational Intelligence, vol. 307. Springer, Berlin, Heidelberg; 2010. P. 307–335. doi: 10.1007/978-3-642-14344-1_14.*
18. Кошелева Н.Н. *Корреляционный анализ и его применение для подсчета ранговой корреляции Спирмена // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. № 5. С. 23–26.*

19. Francois Ch. *Deep Learning with Python*. Manning Publications, 2017. 386 p.
20. McMahan B., Rao D. *Natural Language Processing with PyTorch: Build Intelligent Language Applications Using Deep Learning*. O'Reilly Media, Inc., 2020. 337 p.
21. Wani M.A., Bhat F.A., Afzal S., Khan A.I. *Advances in Deep Learning. Studies in Big Data*, vol. 57. Springer Singapore, 2020. 159 p. doi: 10.1007/978-981-13-6794-6.

References

1. Muqem M.A., Weekse A.E., Al-Hajji A.A. Stuck Pipe Best Practices – A Challenging Approach to Reducing Stuck Pipe Costs. *Presented at the SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*. Al-Khobar, Saudi Arabia; 2012. P. 1–10. doi: 10.2118/160845-MS.
2. Alshaikh A.A., Albassam M.K., Al Gharbi S.H., Al-Yami A.S. Detection of Stuck Pipe Early Signs and the Way Toward Automation. *Society of Petroleum Engineers*; 2018. P. 1–10. doi: 10.2118/192975-MS.
3. Shahbazi K., Shahri M.P. The development of a window for stuck pipe prediction. *Petroleum Science and Technology*. 2012;30(2):176–192. doi: 10.1080/10916461003792302.
4. Miri R., Sampaio J.H.B., Afshar M., Lourenco A. Development of Artificial Neural Networks to Predict Differential Pipe Sticking in Iranian Offshore Oil Fields. *Society of Petroleum Engineers*; 2007. P. 1–15. doi: 10.2118/108500-MS
5. Heinze L., Al-Baiyat I.A. Implementing Artificial Neural Networks and Support Vector Machines in Stuck Pipe Prediction. *Society of Petroleum Engineers*. Kuwait; 2012. P. 1–13. doi: 10.2118/163370-MS.
6. Jahanbakhshi R., Keshavarzi R., Jahanbakhshi R. Intelligent Prediction of Wellbore Stability in Oil And Gas Wells: An Artificial Neural Network Approach. *Presented at the 46th U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium*. Chicago, Illinois; 2012. P. 1–9. ARMA-2012-243.
7. Morteza E.N., Peyman E., Saeid J. Prediction of drilling pipe sticking by active learning method (ALM). *Academic Journals. Journal of Petroleum and Gas Engineering*. 2013;4(7):173–183. doi: 10.5897/JPGE2013.0166.
8. Shoraka S.A.R., Shadizadeh S.R., Shahri M.P. Prediction of Stuck Pipe in Iranian South Oil Fields Using Multivariate Statistical Analysis. *Society of Petroleum Engineers*; 2011. P. 1–10. doi: 10.2118/151076-MS.
9. Murillo A., Neuman J., Samuel R. Pipe sticking prediction and avoidance using adaptive fuzzy logic and neural network modeling. *Paper presented at Production and Operations Symposium held in Oklahoma City*. Oklahoma, USA; 2009. P. 1–15. SPE-120128.
10. Samotoi A.K., Vorotnyuk O.V. [Analysis of a Priori Data on the Factors Affecting the Sticking of the Pipe Column]. *Trudy VNIIBT. Bor'ba s oslozhnennyami pri burenii skvazhin*. 1973;7:25–32. (In Russ.)
11. Avetisov A.G., Akhmadullin M.M., Samotoi A.K. [Prediction, Prevention and Liquidation of Sticking Pipe Using Statistical Methods]. *Tematicheskii nauchno-tekhnicheskii obzor*. Moscow, VNIIOENG; 1977. P. 62–73. (In Russ.)
12. Mirzadzhanzade A.Kh., Avetisov A.G., Bulatov A.I. et al. *Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu statisticheskikh metodov v burenii neftnykh i gazovykh skvazhin* [Methodological Guidelines on the Application of Statistical Methods in Oil and Gas Drilling]. Krasnodar; 1983. 72 p.
13. Qodirov Sh.Sh., Shestakov A.L. Development of Artificial Neural Network for Predicting Drill Pipe Sticking. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2019;19(3):20–32. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr190302.
14. Shestakov A.L., Qodirov Sh.Sh. *Sposob prognozirovaniya prikhvatov buril'nykh trub* [Method for prediction of sticking of drilling pipes]. Patent RF, no. 2735794, 2020.
15. Qodirov S., Shestakov A. Development of Artificial Neural Network for Predicting Drill Pipe Sticking in Real-Time Well Drilling Process. In: *2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. Chelyabinsk, Russia; 2020. P. 139–144. doi: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267873.
16. Toreifi H., Rostami H., Manshad A.K. New method for prediction and solving the problem of drilling fluid loss using modular neural network and particle swarm optimization algorithm. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2014;4:371–379. doi: 10.1007/s13202-014-0102-5.

17. Shukla A., Tiwari R., Kala R. Modular Neural Networks. In: Towards Hybrid and Adaptive Computing. Studies in Computational Intelligence, vol. 307. Springer, Berlin, Heidelberg; 2010. P. 307–335. doi: 10.1007/978-3-642-14344-1_14.
18. Kosheleva N.N. [Correlation analysis and its application for calculating Spearman's rank correlation]. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2012;(5):23–26. (In Russ.)
19. Francois Ch. *Deep Learning with Python*. Manning Publications; 2017. 386 p.
20. McMahan B., Rao D. *Natural Language Processing with PyTorch: Build Intelligent Language Applications Using Deep Learning*. O'Reilly Media, Inc.; 2020. 337 p.
21. Wani M.A., Bhat F.A., Afzal S., Khan A.I. Advances in Deep Learning. Studies in Big Data, vol. 57. Springer Singapore; 2020. 159 p. doi: 10.1007/978-981-13-6794-6.

Информация об авторах

Кодиров Шахбоз Шарифович, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, младший научный сотрудник международной лаборатории технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; shahboztjk@mail.ru.

Шестаков Александр Леонидович, д-р техн. наук, проф., ректор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; admin@susu.ac.ru.

Information about the authors

Shahboz Sh. Qodirov, postgraduate student of the Department of Information-Measurement Systems, Junior researcher of International Laboratory for self-validating sensors, systems, and advanced instrumentation, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shahboztjk@mail.ru.

Aleksandr L. Shestakov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; admin@susu.ac.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 07.12.2021; одобрена после рецензирования 21.12.2021; принята к публикации 28.12.2021.

The article was submitted 07.12.2021; approved after reviewing 21.12.2021; accepted for publication 28.12.2021.

Краткие сообщения Brief Reports

Brief report
doi: 10.14529/ctcr220112

DEVELOPMENT OF A MANAGEMENT AND MONITORING SYSTEM FOR A CITY FARM

Andrey V. Blinov¹, Aleksandr V. Hollay², Vadim V. Zakharov³

^{1, 2, 3} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ gigifk8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8300-5469>

² alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

³ metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

Abstract. For any manager of an agro-industrial enterprise, the use of resources is used for the efficient use of resources: labor, land, working capital and other. For this reason, the production processes of agriculture are already almost completely mechanized around the world, which is the productivity of an enterprise. The next logical step in increasing the productivity of agricultural enterprises is the automation and digitalization of agricultural production. Therefore, in order to remain competitive with the world leaders in agricultural production, it is necessary to integrate IoT technologies. It is predicted that the introduction of modern automation technologies in the agro-industrial complex will increase yields more than the inventions of the tractor, herbicides and GMOs. City farming is gradually becoming such a solution. In some megacities, urban farms are built on the rooftops of buildings, and in some places there are entire skyscrapers with vertical farms. Experts say that the quality and environmental friendliness of products grown in this way is much higher than that of counterparts grown in a traditional way. In this regard, the relevance in creating an application for a smart farm has been identified. Such an application will allow you to be more attentive to all parameters of plant growth thanks to sensors for humidity, light, temperature and other data that can be transmitted to a smartphone. **The purpose of the study** is to develop a management and monitoring system for a city farm. **Materials and methods.** The mobile application is implemented using the Xamarin framework in C# and JavaScript. The firmware for the microcontroller is written in C. **Results.** The paper provides an overview of management and monitoring systems for smart farms, a methodological comparison of advantages and disadvantages. The architecture of the control and monitoring system was also discovered. Implemented a mobile application and software. The functionality and design of the mobile application has been tested on various devices. **Conclusion.** The city farm management and monitoring system has been successfully developed. As further scientific work, it is planned to develop a mathematical model for more optimal farm management. This work can be useful in the field of decentralized agriculture.

Keywords: information systems, technologies, management, monitoring, IoT, city-farming

For citation: Blinov A.V., Hollay A.V., Zakharov V.V. Development of a management and monitoring system for a city farm. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(1):139–146. doi: 10.14529/ctcr220112.

Краткое сообщение
УДК 681.58
doi: 10.14529/ctcr220112

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА СИТИ-ФЕРМЫ

**Андрей Вячеславович Блинов¹, Александр Владимирович Голлай²,
Вадим Владимирович Захаров³**

^{1, 2, 3} Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

¹ gigifk8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8300-5469>

² alexander@hollay.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5070-6779>

³ metkol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3321-7156>

Аннотация. Для любого руководителя агропромышленного предприятия важной задачей является оптимизация производственных процессов для эффективного использования имеющихся ре-

сурсов: трудовых, земельных, оборотных средств и других. По этой причине производственные процессы сельского хозяйства уже почти полностью механизированы по всему миру, что значительно увеличивает производительность предприятия. Следующим закономерным шагом увеличения производительности сельхозпредприятий является автоматизация и цифровизация производственных процессов сельского хозяйства. Поэтому для того чтобы оставаться конкурентоспособным по отношению к мировым лидерам агропроизводства, необходимо интегрирование IoT технологий. Прогнозируется, что внедрение современных технологий автоматизации в АПК позволит увеличить урожайность сильнее, чем это сделали изобретения трактора, гербицидов и ГМО. Таким решением постепенно становится сити-фермерство. В некоторых мегаполисах городские фермы обустроены на крышах зданий, а кое-где существуют целые небоскрёбы с вертикальными фермами. Специалисты утверждают, что качество и экологичность продуктов, выращенных таким способом, значительно выше, чем у аналогов, выращенных традиционным образом. В связи с этим выявлена актуальность в создании приложения для умной фермы. Такое приложение позволит более внимательно относиться ко всем параметрам роста растений благодаря датчикам влажности, света, температуры и другим данным, которые можно передавать на смартфон. **Целью исследования** является разработка системы управления и мониторинга сити-фермы. **Материалы и методы.** Мобильное приложение реализовано с использованием фреймворка Xamarin на C# и JavaScript. Прошивка для микроконтроллера написана на C. **Результаты.** В работе представлен обзор систем управления и мониторинга для умных ферм, методологическое сравнение преимуществ и недостатков. Также была спроектирована архитектура системы контроля и мониторинга. Реализовано мобильное приложение и ПО. Функционал и дизайн мобильного приложения протестирован на различных устройствах. **Заключение.** Система управления и мониторинга сити-фермы успешно разработана. В качестве дальнейшей научной работы планируется разработать математическую модель для более оптимального управления фермой. Эта работа может быть полезна в сфере децентрализованного сельского хозяйства.

Ключевые слова: информационная система, технологии, управление, мониторинг, IoT, сити-фермерство

Для цитирования: Blinov A.V., Hollay A.V., Zakharov V.V. Development of a Management and Monitoring System for a City Farm // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 139–146. doi: 10.14529/ctcr220112.

Introduction

Today, the rapid growth of the Earth's population and the even more active urbanization of the population requires quick food decisions. City farming is gradually becoming such a solution. In some megacities, urban farms are built on the rooftops of buildings, and in some places, there are entire skyscrapers with vertical farms [1].

Experts say that the quality and environmental friendliness of products grown in this way is much higher than that of counterparts grown in a traditional way [2]. Some of this evidence is showing that the heavy metal concentrations in irrigation water and soils did not exceed the recommended maximum limits (RMLs). Moreover, Cd, Co, Cr, Cu, Ni and Zn concentrations in all analysed vegetables were lower than the RML standards. In contrast, Pb concentrations were 1.4–3.9 times higher. Results of two-way ANOVA test showed that variation in metals concentrations were significant ($p < 0.001$) across farming site, vegetable type and site x vegetable interaction [3].

In this regard, it is important to create a city farm management system. Such a system will make it possible to be more attentive to all parameters of plant growth using sensors for humidity, light, temperature and other data that can be transmitted to a smartphone.

The Internet of Things includes several concepts:

- the devices themselves, connected to the network;
- an autonomous way of connecting M2M, that is, a machine to a machine without the participation of a living being;
- Big Data, that is, big data that smart devices can generate and which then need to be analyzed and systematized [4].

When connected to the Internet of Things, each device must identify itself. For this, barcodes and QR codes (Matrix codes), RFID (radio frequency identification), RTLS (Coordinate determination method) are used. The identifier must be unique. At the moment, most often the MAC address of the network adapter is used for these purposes. This symbolic combination is assigned to the manufactured device at the factory [5].

City farming is one of the most promising areas of agriculture, which implies the organization of farms for growing crops and animals in an urban setting. For the convenience of urban farmers, it is necessary to implement automated farm operation. The installation should perform the following functions:

- 1) transfer data from environmental sensors to a smartphone to track the state of plants;
- 2) control several types of LED strips to simulate daylight hours;
- 3) turn on the pump at low soil moisture.

Air humidity plays an important role in the life of the plant world. Low air humidity accelerates the evaporation of water from the soil, which leads to drying out of plants; therefore, air humidity and air temperature sensors are needed [6]. Plants need carbon dioxide, so you need to monitor its concentration in the air with a carbon dioxide sensor.

The water level in the tank must not be below a certain value, otherwise the pump will fail, as it will capture air instead of water. The water level sensor solves this problem.

LED strips should be controlled throughout the day. Early in the morning, infrared bands should be activated, which are responsible for the growth of the tops. A little later, daylight bands turn on, thanks to which the fruits ripen. During the day, ultraviolet ribbons begin to shine. After lunch, the ribbons begin to decrease the light intensity in the reverse order.

The results presented here show that the use of IoT technology can lead to significant energy savings as well as increased yields.

Methods

The choice of a development board depends on the requirements for the functionality of the board. With the right board selection, development can be dramatically accelerated. Let's compare the three most famous boards: Particle Electron, Feather Huzzah, Arduino MKR1000 (Table 1).

Comparison of developer boards

Table 1

	Particle Electron	Adafruit Feather Huzzah	Arduino MKR1000
Clock frequency	120 MHz	80 MHz	48 MHz
Flash memory	1 MB	4 MB	256 KB
Digital lines	14	9	12
Analog lines	14	1	6
Antenna type	Printed and uFI	Printed	Printed
Support battery	Yes	Yes	Yes
Online service	Yes	Yes	No
Price	29 \$	16 \$	35 \$

Particle Electron is based on a 120MHz ARM Cortex M3 32-bit core and has a full complement of I/O pins. One of the benefits of Electron is its ability to automatically connect to the Particle web service. The firmware can be downloaded over the internet. In addition to the printed antenna, this module can be equipped with a uFI antenna to expand its wireless capabilities. Among the disadvantages of the module is a relatively high-power consumption [7].

The next stage in the development of a farm management system is the development of a mobile application. Mobile app development is the process by which apps are developed for small handheld devices such as smartphones or cell phones. These applications can be preinstalled on the device during production, downloaded by the user using various platforms to distribute software, or be web applications that are processed on the client (JavaScript) or server side [8].

The choice of technology is usually based on several factors, such as development time, product cost, and purpose. For example, for basic applications with fairly simple functionality and user interface, any solution will do. But if the product is complex, or it is expected to gradually acquire additional functions, the choice of technology must be made more carefully.

Xamarin is a cross-platform mobile application development framework based on the C# language. Leveraging the power of C# and native iOS and Android libraries allows Xamarin to make changes to the application and improve it fairly quickly throughout the project lifecycle. Most of the code is used simultaneously for several platforms, therefore, the main effort should be focused on creating the user

interface for different operating systems. Since all native functions are supported by Xamarin, the result is a completely native application [9].

Using PhoneGap for application development, you can create HTML, CSS and JavaScript files in your local directory. This is more like developing a static website. Getting the user interface to look the same in the browser as native apps is not an easy task, right? Native presentation and responsiveness of the user interface is not possible on most platforms and browsers these days, even with Sencha Touch. Among other things, PhoneGap's ability to interact with other applications and device capabilities is very limited. It, in any case, will not be a cross-platform tool, since it does not have HTML5 standards, with the exception of such as geolocation, camera and local databases (Table 2).

Table 2

Comparison of development platforms

Criterion	Phonegap	Xamarin
Performance	Less productive	Stable performance on iOS, Android and WinPhone
Interface	The user interface is common to all three platforms	It is possible to create your own interface for each platform
Start time	Slow start	Quick start
Data volume	Problems with displaying large amounts of data	No problem with displaying large amounts of data
Native functions	To use additional native functionality, you must have programming skills in Objective C or Java	Native functions can be implemented using Xamarin without using other programming languages

The next stage of development is the hardware architecture. The basic elements of the system hardware are divided into several types: sensors, actuators, and gates.

Sensors include devices that measure the physical characteristics of objects or the environment (for example, temperature, pressure, the presence of impurities in the air, position in space, etc.) and convert it into a form that is convenient for further processing.

Actuators are designed to affect the environment, or a specific object in it. A wide variety of devices can play this role, from servos and speakers to locks with lighting fixtures.

Gates are devices that are usually assigned the logic of superficial analysis of information coming from sensors connected to them. In certain situations, data analysis may require a small amount of computational resources, so that the gates are quite capable of making some decisions on their own. Making such decisions, they send certain control commands to the actuators, which, in turn, already perform their functions.

If the processing of information is costly, or this information is subject to collection, the gates send it to the servers, where further work is done with it. Most likely the use of microcomputers or microprocessors as gates [10].

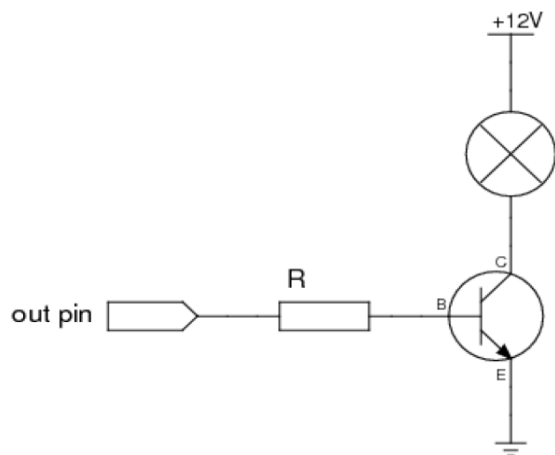


Fig. 1. Lighting control

The microcontroller controls the LED strips using a transistor. From the pin of the operating device, a voltage from 0 to 3.3V is applied to the control leg of the transistor. At a certain voltage, the transistor opens with a certain ratio. In this way, the intensity of the light can be controlled (Fig. 1).

A relay is used to control the pump. A voltage of 3.3 V is applied to the control leg of the relay, thereby opening the relay. For safety reasons, the relay is used in normally closed mode. That is, in the absence of a signal, the relay is closed.

The water level sensor is digital, so the microcontroller can get values 0 (no water) and 1 (there is water).

Soil moisture sensor, air humidity sensor, soil temperature sensor and air temperature sensor are analog, therefore fractional values from 0 to 3.3 V are possible.

The next stage of development is cloud configuration.

Particle cloud is an important element of the software part of the system. In addition to collecting and storing data, the cloud implements a software update function.

Firmware Updates (OTA) are a vital component of any IoT system [11]. Over-the-air firmware updates are the practice of remotely updating code on an embedded device. Particle's all-in-one IoT platform offers good OTA upgrade capabilities [12].

A hybrid approach was chosen for the development of a mobile application (Fig. 2). A hybrid app is a mobile app that contains a mobile platform WebView [13]. The main component over which the development is created with this approach is the WebView component. It can be used to embed web applications (sites).

In Android version 7.0 and higher, WebView uses the Chrome engine. If this cannot be done for any reason, then the System WebView is used, which appeared in Android version 5 and later. Earlier versions of Android use WebKit or Chromium for these tasks [14].



Fig. 2. Mobile app

Results

Once the smart farm management and monitoring system is developed, it needs to be tested. One of the main tasks of a smart farm is the constant processing of readings from environmental sensors.

The problem of incorrect reading of parameters may occur due to incorrect supply of voltage to the microcontroller input. This phenomenon can occur due to different physical phenomena. Therefore, in the firmware of the microcontroller, an additional check is made that the value belongs to a certain range. For example, the temperature cannot go below 0 degrees and rise above 50 degrees. There are ranges for each sensor according to the environment in which they are located. Also, there can be no abrupt change in any parameter. For this, the voltage value is read several times in a short period of time and compared with the previous value.

This problem cannot be determined by a one-time measurement; therefore, the developed solution requires testing for a long time. The ThingSpeak service was used to visualize the environmental parameters (Fig. 3).

These graphs show that there are no unreasonable jumps in readings. The increases and decreases are caused by external factors. For example, turning on the heating, starting watering, and the like.

Thus, smart farm monitoring functions correctly.

To test a mobile application, it is necessary to determine the criteria by which it will be possible to evaluate the mobile application and rank them in order of importance [15].

1. Ease of use of the mobile application.
2. Design of a mobile application.
3. Functioning.

The mobile application was tested on an emulator, on a smartphone and on a Smart TV. Testing consisted of viewing the start page and checking these three criteria.

Usability was verified as a result of initial testing.

The next stage of testing is to check compatibility. For this task, it was necessary to check the correct display of the application on different screens, that is, to investigate the design of the application for adaptability. On android 4.0 and higher, the application is displayed correctly (Fig. 4, 5).

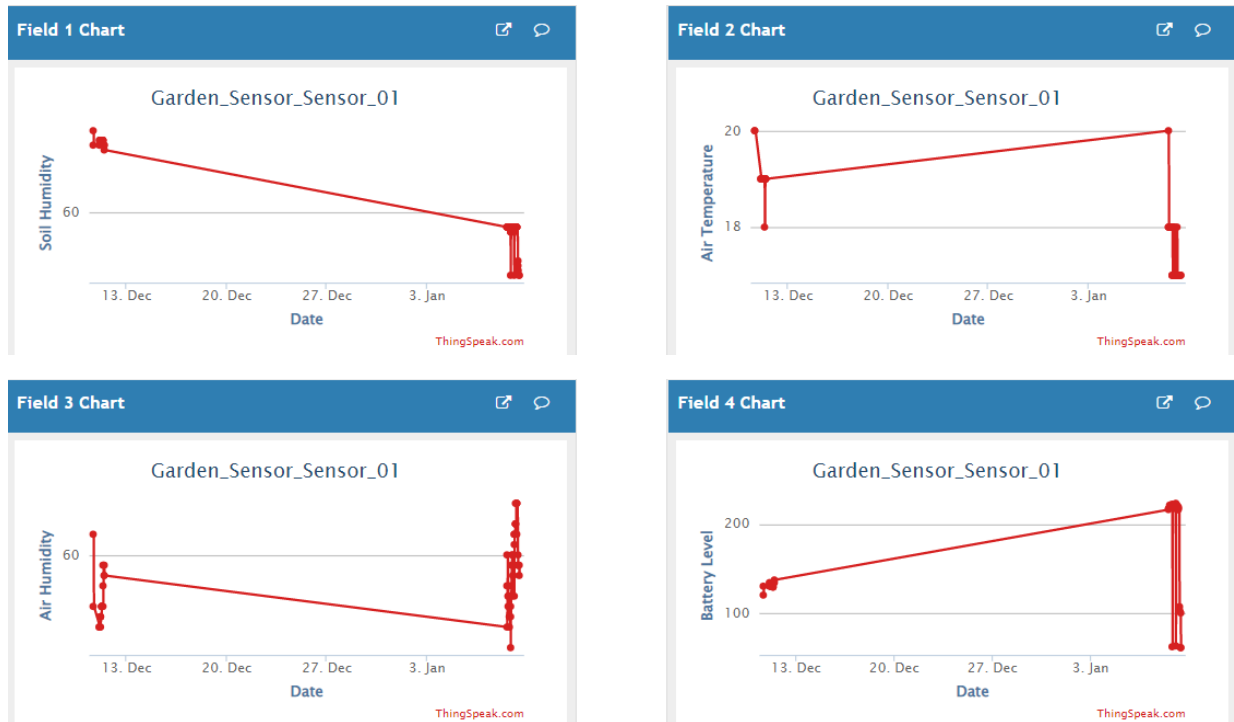


Fig. 3. ThingSpeak

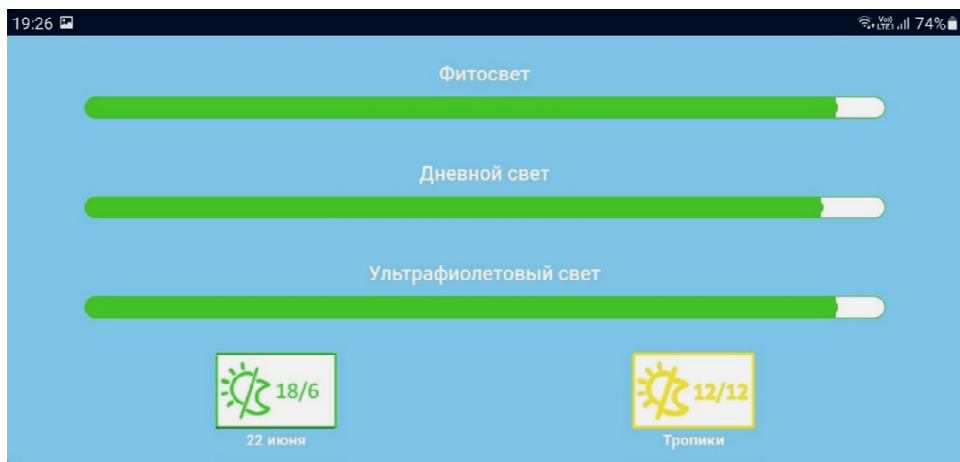


Fig. 4. Displaying an app in landscape orientation

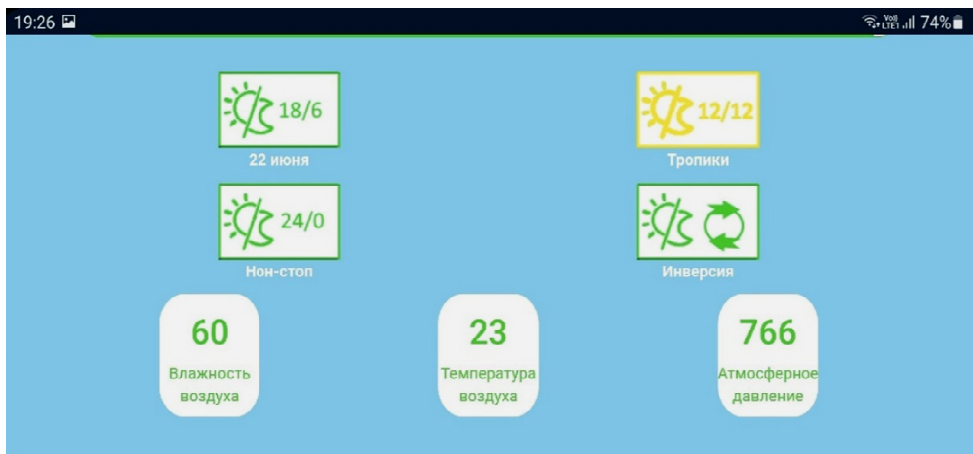


Fig. 5. Displaying an app in landscape orientation

Functional testing included checking links, animations, choosing a farm, displaying hints. As a result of this study, no problems were found.

Thus, the mobile application functions and is displayed correctly on various devices.

Discussions and Conclusions

The architecture of the software is designed in this article. The implementation of data exchange between the microcontroller and the Particle cloud is considered. Environmental monitoring is carried out correctly and stably. A mobile application for managing and monitoring a smart farm has been created. The functionality and design of the mobile application has been tested on various devices.

Thus, the city farm management and monitoring system has been successfully implemented.

As further scientific work, it is planned to develop a mathematical model for more optimal farm management.

References

1. Maciaszek L.A. *Practical software engineering: a case study approach*. Transl. from Engl. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy; 2013. 424 p. (In Russ.)
2. Yarochkin, V.I. *Informatsionnaya bezopasnost'* [Information Security]. 5th ed. Moscow: Akademicheskii proekt; 2016. 544 p. (In Russ.)
3. Ghezzi C., Jazayeri M., Mandrioli D. *Fundamentals of software engineering*. Transl. from Engl. Moscow: BHV-Petersburg; 2013. 832 p. (In Russ.)
4. Zasada I., Fertner C., Piorr A., Nielsen T.S. Peri-urbanisation and multifunctional adaptation of agriculture around Copenhagen. *Geografisk Tidsskrift*. 2011;111(1):59–72. <https://doi.org/10.1080/00167223.2011.10669522>.
5. Particle Documentation. Available at: <https://store.particle.io/collections/electron/>.
6. Agurov P. *C#. Sbornik retseptov* [C#. Collection of recipes]. Moscow: BHV-Petersburg; 2007. 432 p. (In Russ.)
7. Echmaeva, G. *Informatsionnaya kul'tura organizatora fermerskogo khozyaistva* [Information culture of the organizer of the farm]. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing; 2011. 260 p. (In Russ.)
8. Leventhal L. *Introduction to microprocessors: software, hardware, programming*. Transl. from Engl. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 464 p. (In Russ.)
9. Duvall P.M. *Continuous Integration: Improving Software Quality and Reducing Risk*. Transl. from Engl. Moscow: Vil'yams; 2017. 240 p. (In Russ.)
10. Shangin V.F. *Informatsionnaya bezopasnost' i zashchita informatsii* [Information security and information protection]. Moscow: DMK Press; 2014. 702 p. (In Russ.)
11. Richter J. *CLR via C #. Programming on Microsoft .NET Framework 4.0 in C#*. Transl. from Engl. St. Petersburg: Piter; 2013. 896 p. (In Russ.)
12. Bob F. *Microservices, IoT, and Azure*. Apress; 2015. P. 3–27.
13. Woldetsadik D., Drechsel P., Keraita B. et al. Heavy metal accumulation and health risk assessment in wastewater-irrigated urban vegetable farming sites of Addis Ababa, Ethiopia. *Food Contamination*. 2017;4, 9. <https://doi.org/10.1186/s40550-017-0053-y>.
14. Mohan S.V., Hemalatha M., Amulya K. et al. Decentralized Urban Farming Through Keyhole Garden: a Case Study with Circular Economy and Regenerative Perspective. *Mater Circ Econ*. 2020;2, 12. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00011-1>.
15. Babash A.V., Baranova E.K., Mel'nikov Yu.N. *Informatsionnaya bezopasnost'. Laboratornyi praktikum: ucheb. posobie* [Information Security. Laboratory practice: Textbook]. Moscow: KnoRus; 2016. 136 p. (In Russ.)

Список литературы

1. Мацяшек Л.А. *Практическая программная инженерия на основе учебного примера: пер. с англ. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 424 с.*
2. Ярочкин В.И. *Информационная безопасность. 5-е изд. М.: Академический проект, 2016. 544 с.*
3. Гецци К., Джазайери М., Мандриоли Д. *Основы инженерии программного обеспечения: пер. с англ. М.: БХВ-Петербург, 2013. 832 с.*
4. Zasada I., Fertner C., Piorr A., Nielsen T.S. *Peri-urbanisation and multifunctional adaptation of*

agriculture around Copenhagen // Geografisk Tidsskrift. 2011. Vol. 111(1). С. 59–72. <https://doi.org/10.1080/00167223.2011.10669522>.

5. Документация Particle. URL: <https://store.particle.io/collections/electron/>.

6. Агуров П. С#. Сборник рецептов. М.: БХВ-Петербург, 2007. 432 с.

7. Ечмаева Г. Информационная культура организатора фермерского хозяйства. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 260 с.

8. Левенталь Л. Введение в микропроцессоры: Программное обеспечение, аппаратные средства, программирование: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 464 с.

9. Дюваль М.П. Непрерывная интеграция: улучшение качества программного обеспечения и снижение риска: пер. с англ. М.: Вильямс, 2017. 240 с.

10. Шаньгин, В.Ф. Информационная безопасность и защита информации. М.: ДМК Пресс, 2014. 702 с.

11. Рихтер Дж. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C#: пер. с англ. 4-е изд. СПб.: Питер, 2013. 896 с.

12. Bob F. *Microservices, IoT, and Azure*. Apress, 2015. P. 3–27.

13. Woldetsadik, D., Drechsel, P., Keraita, B. et al. Heavy metal accumulation and health risk assessment in wastewater-irrigated urban vegetable farming sites of Addis Ababa, Ethiopia // *Food Contamination*. 2017. Vol. 4, article number: 9. <https://doi.org/10.1186/s40550-017-0053-y>.

14. Mohan S.V., Hemalatha M., Amulya K. et al. *Decentralized Urban Farming Through Keyhole Garden: a Case Study with Circular Economy and Regenerative Perspective // Mater Circ Econ*. 2020. Vol. 2, article number: 12. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00011-1>.

15. Бабаиш А.В., Баранова Е.К., Мельников Ю.Н. Информационная безопасность. Лабораторный практикум: учеб. пособие. 2-е изд. М.: КноРус, 2016. 136 с.

Information about the authors

Andrey V. Blinov, postgraduate student of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gigifk8@gmail.com.

Aleksandr V. Hollay, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk; Russia; alexander@hollay.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.

Информация об авторах

Блинов Андрей Вячеславович, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; gigifk8@gmail.com.

Голлай Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; alexander@hollay.ru.

Захаров Вадим Владимирович, младший научный сотрудник кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; metkol@yandex.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 26.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 17.12.2021.

Статья поступила в редакцию 26.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 17.12.2021.

О ПОДХОДЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ HEADLESS CMS ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОРПОРАТИВНЫХ ИНТЕРНЕТ-САЙТОВ

Максим Евгеньевич Коваль¹, kovalmax06@gmail.com,
Александр Андреевич Шинкарев², sania.kill@mail.ru,
Валерия Олеговна Логиновская^{1,3}, valeria.login@yandex.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

² ООО «Софтмаст-Информационные Технологии», г. Челябинск, Россия

³ Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, г. Москва, Россия

Аннотация. На сегодняшний день очень часто для управления содержимым корпоративного сайта организации применяются системы управления контентом (CMS). Можно выделить две большие группы CMS: традиционные и headless. Логика традиционных CMS объединяет бэкенд- и фронтенд-части одной системы. Контент в данном случае оказывается связан с конкретными технологиями, архитектурой и шаблонами клиент-серверного приложения. Headless CMS – принципиально иная система управления. Как правило, она отвечает только за универсальное содержимое, которое может использоваться на любых платформах. Обе группы имеют свои плюсы и минусы. В зависимости от сложности сайта следует использовать и разные виды CMS. Традиционные CMS в большинстве поддерживают собственные шаблоны графического оформления сайта и зачастую являются сложными для использования простыми пользователями. Ввиду этого в статье будет предложен подход, который хоть и несколько усложняет процесс разработки сайта, но обеспечивает легкость и гибкость в его дальнейшей поддержке. **Цель исследования.** Рассмотреть разновидности систем управления контентом. Описать преимущества и недостатки двух видов CMS. Рассмотреть случаи, в которых стоит использовать тот или иной вид системы при разработке корпоративных сайтов организации. Предложить компонентный подход для использования в headless CMS с целью облегчения разработки, поддержки и обновления корпоративного сайта. **Материалы и методы.** Рассматриваются два вида CMS-систем. Описываются достоинства и недостатки систем управления контентом разных видов. Проводится сравнительный анализ headless CMS. Формулируются требования к системе управления контентом. Выбирается наиболее подходящая headless CMS с возможностью применения компонентного подхода при разработке корпоративного сайта. **Результаты.** В статье описываются плюсы и минусы различных видов CMS. Дается описание случаев, в которых следует использовать тот или иной вид CMS. Описываются требования к CMS для применения компонентного подхода. **Заключение.** В результате проведенного исследования проведен сравнительный анализ headless CMS и разработан краткий пример использования компонентного подхода для конструирования страниц корпоративного сайта компании.

Ключевые слова: корпоративный веб-сайт, разработка веб-сайтов, headless CMS, традиционная CMS, компонент

Для цитирования: Коваль М.Е., Шинкарев А.А., Логиновская В.О. О подходе использования headless CMS при разработке корпоративных интернет-сайтов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 147–153. doi: 10.14529/ctcr220113.

ABOUT THE APPROACH TO USE HEADLESS CMS IN DEVELOPING CORPORATE INTERNET SITES

Maksim E. Koval¹, kovalmax06@gmail.com,
Aleksandr A. Shinkarev², sania.kill@mail.ru,
Valeriya O. Loginovskaya^{1, 3}, valeria.login@yandex.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² LLC "Softmast-Information Technologies", Chelyabinsk, Russia

³ Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation, Moscow, Russia

Abstract. Today, content management systems (CMS) are often used to manage the content of an organization's corporate website. There are two large groups of CMS: traditional and headless. Both groups have their pros and cons. Different types of CMS should be used depending on the complexity of the site. Most traditional CMS support their own templates for graphic design of the site and are often difficult for ordinary users to use. In view of this, the article will propose an approach that, although it somewhat complicates the process of developing a site, but provides ease and flexibility in its further support. **Aim.** Consider the varieties of content management systems. Describe the advantages and disadvantages of the two types of CMS. Consider the cases in which it is worth using this or that type of system when developing corporate sites for an organization. Propose a component-based approach for use in a headless CMS in order to facilitate the development, maintenance and updating of a corporate website. **Materials and methods.** Two types of CMS systems are considered. The advantages and disadvantages of different types of content management systems are described. A comparative analysis of headless CMS is carried out. Requirements for the content management system are formulated. The most suitable headless CMS is selected with the possibility of using the component approach when developing a corporate website. **Results.** This article describes the pros and cons of different types of CMS. A description of the cases in which one or another type of CMS should be used is given. Describes the requirements for a CMS to apply the component approach. **Conclusion.** As a result of the study, a comparative analysis of headless CMS was carried out and a brief example of using the component approach for designing the pages of a company's corporate website was developed.

Keywords: corporate website, website development, headless CMS, traditional CMS, component

For citation: Koval M.E., Shinkarev A.A., Loginovskaya V.O. About the approach to use headless CMS in developing corporate internet sites. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(1):147–153. (In Russ.) doi: 10.14529/ctcr220113.

Введение

В современном мире многие компании и организации создают свои корпоративные сайты в интернете. На таких сайтах обычно рассказывается о том, чем занимается компания, об услугах и товарах, контакты, а также адрес расположения. Корпоративный сайт – необходимый атрибут бизнеса компании. При просмотре различных корпоративных сайтов можно сделать вывод о том, что они похожи друг на друга по своей структуре. Находясь в постоянном развитии, технологии устаревают, а следовательно, устаревают системы и приложения, которые были созданы при помощи этих технологий.

На сегодняшний день большая часть корпоративных сайтов разработаны с помощью CMS [1]. CMS, или Content Management System – информационная система или компьютерная программа, используемая для обеспечения и организации совместного процесса создания, редактирования и управления содержимым сайта. В целом CMS можно разделить на два вида: традиционные и headless. Headless CMS как правило не предоставляет возможность управления дизайном сайта, а позволяет только редактировать контент, который отображается на сайте [2]. Для управления структурой страниц сайта можно использовать классическую CMS, но такой подход не всегда удобен ввиду того, что такие системы зачастую оказываются довольно сложными для простого пользователя и могут включать множество ненужных модулей. Для решения данной проблемы

далее рассмотрим компонентный подход, который объединяет преимущества классических и headless CMS в одной системе и позволяет добавлять новые компоненты на страницы сайта без участия разработчиков [3].

1. Отличия headless от традиционных CMS

Главное преимущество headless CMS заключается в том, что они обеспечивают большую гибкость в дизайне веб-сайта. Фронтенд-разработчики могут извлекать данные из CMS и представлять их любым способом, который они хотят, что открывает гораздо больше возможностей [4]. Вместо того чтобы придерживаться ограниченных функций и стандартных шаблонов традиционной CMS, компании с выделенной командой фронтенд-разработчиков могут использовать headless CMS для разработки крупномасштабных и уникальных веб-сайтов, которые могут выделиться среди конкурентов.

Разделение контента и пользовательского интерфейса также обеспечивает большую гибкость во время разработки. Традиционные инструменты CMS обычно требуют использования определенных фреймворков и языков, тогда как headless CMS позволяют разработчикам использовать все, что угодно. Они также позволяют создателям контента и разработчикам работать параллельно, что может повысить общую продуктивность. Разделение также упрощает изменение конструкции в будущем. В традиционных CMS контент глубоко привязан к макету, что затрудняет изменение аспектов дизайна; для серьезных изменений может даже потребоваться совершенно новая CMS [5].

Контент, управляемый headless CMS, может легко отображаться на нескольких платформах. С другой стороны, контент и макет переплетаются в традиционной CMS, поэтому она не может поддерживать платформы, для которых они не были изначально разработаны. Headless CMS является гибкой и ориентированной на будущее, что позволяет ей использовать другие платформы, даже если они не входят в ваш текущий план развития продукта [6].

Традиционные системы управления контентом также имеют свои преимущества, самым большим из которых является то, что традиционное программное обеспечение CMS намного проще в установке и использовании. Все, от управления контентом до дизайна и пользовательского интерфейса, собрано в одном месте, что упрощает быструю разработку и публикацию контента.

Традиционная CMS может быть лучшим вариантом для небольших организаций, не имеющих необходимых ресурсов для эффективного использования автономной CMS. Это также лучший вариант для простых веб-сайтов, у которых нет функций, которые может не иметь стандартный шаблон CMS. Но если вы не хотите использовать шаблон для своего веб-сайта или хотите добавить функциональность, которую традиционные инструменты CMS не могут предоставить, в таком случае стоит рассмотреть использование headless CMS [7].

2. Выбор headless CMS

Одним из главных требований к CMS была возможность редактирования макета сайта, возможность конструирования страниц из набора готовых компонентов. Это было нужно для того, чтобы в дальнейшем пользователи данной CMS могли самостоятельно добавлять новые страницы на свой сайт без привлечения сторонних разработчиков. Планировалось, что система будет поддерживать server-side rendering для обеспечения возможности построения дерева компонентов на основе информации, полученной от CMS, чтобы отобразить их на странице сайта. Также требовалось, чтобы CMS поддерживала возможность веб-хуки (webhooks) для вызова функции перезагрузки сайта и его обновления.

Были рассмотрены такие headless CMS, как Strapi, Orchard. Данные CMS очень просты для понимания и использования. Однако они предоставляют возможность только плоских моделей и не обеспечивают возможность создания вложенных моделей. Такой подход подходит для создания простых сайтов, в которых не требуется сложных программных и дизайнерских решений. Также был проведен анализ Directus CMS. Данная система предоставляет функционал редактирования контента посредством таблицы. Данный функционал оказался не очень удобным ввиду не очень понятного отображения данных [8–10].

Из всех рассмотренных CMS особое внимание обратили на систему с названием Storyblok. Эта система реализует компонентный подход к управлению контентом. Поддерживает функционал для предпросмотра вносимых на сайт изменений. Storyblok дает возможность настраивать контент для различных языков, что позволяет сделать сайт мультиязычным. Имеет встроенный механизм для пагинации данных в таблицах. Все эти функции позволяют сократить время на их реализацию с нуля, а следовательно, экономят средства заказчика и обеспечивают еще больше простоты для дальнейшей работы. Но самое главное то, что данная CMS поддерживает возможность формирования деревьев компонентов, которое отображается на сайте, а значит, удовлетворяет главному требованию, которое описано выше. Единственный минус, который стоит отметить, – данная CMS предоставляется как сервис, поэтому развернуть ее на собственных серверах не получится. Однако существующие тарифы на покупку данной системы довольно невысоки, а также имеется бесплатный тариф с ограниченным функционалом [11].

3. Пример использования компонентного подхода

В данной главе будет представлен пример, который демонстрирует возможности компонентного подхода и динамическое встраивание компонентов в разметку страницы сайта при использовании Storyblok. Для того чтобы использовать данный подход, требуется базовое понимание работы ReactJS и Next.js. Также предполагается, что уже имеется проект и подключены все необходимые библиотеки. Инструкции по установке и подключению можно изучить в документации к Storyblok. Далее будет описан предлагаемый подход [12].

При открытии главной страницы CMS выводится список страниц сайта (рис. 1). На этом этапе можно добавить нужные страницы.

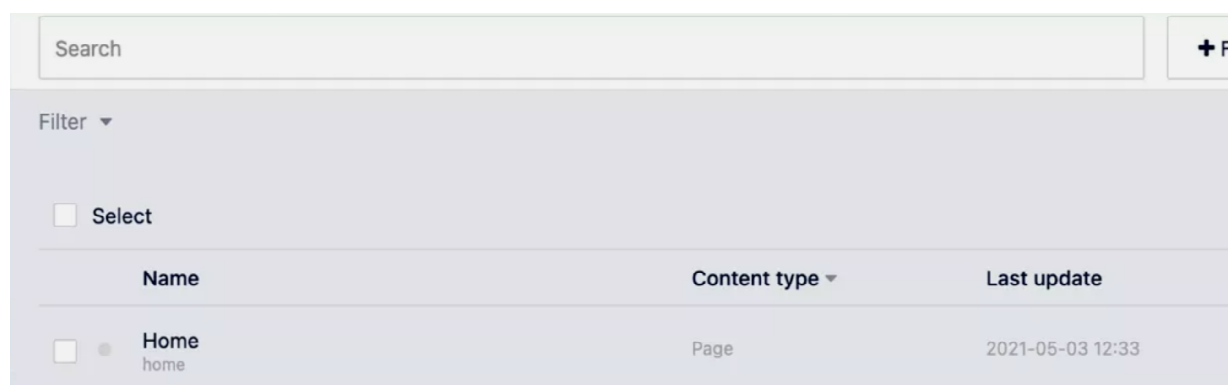


Рис. 1. Главная страница Storyblok
Fig. 1. Main page of Storyblok

После добавления необходимых страниц следует перейти к редактированию компонентов, которые можно применять для создания структуры страниц сайта. Storyblok по умолчанию предлагает компонент Grid. Наш подход заключается в том, что нужно изменить данный компонент и создать несколько своих, это позволит строить страницы из нескольких колонок и добавлять любое содержимое в эти колонки независимо друг от друга. Для этого нужно выбрать вкладку Components в меню Storyblok. Сначала требуется создать компонент Column. На рис. 2 изображена его структура.

После этого переходим в компонент Grid и изменяем его таким образом, чтобы он мог содержать в себе компонент column (рис. 3).

Данная структура компонентов позволяет в поле body компонента Column вставлять любой другой компонент, дерево которых затем будет отображаться на странице сайта. Далее можно использовать созданные компоненты и добавлять их на нужные страницы [13–15]. Пример использования изображен на рис. 4.

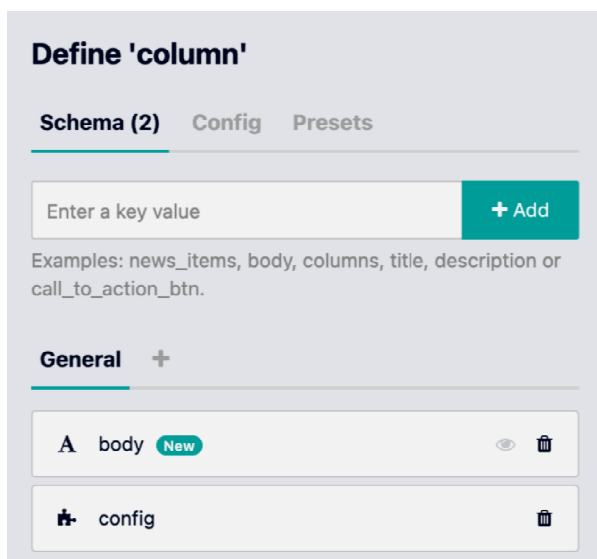


Рис. 2. Структура компонента Column
Fig. 2. Structure of Column component

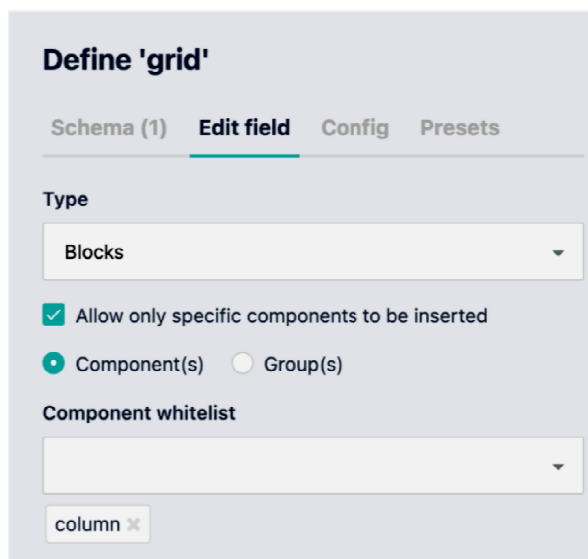


Рис. 3. Структура компонента Grid
Fig. 3. Structure of Grid component

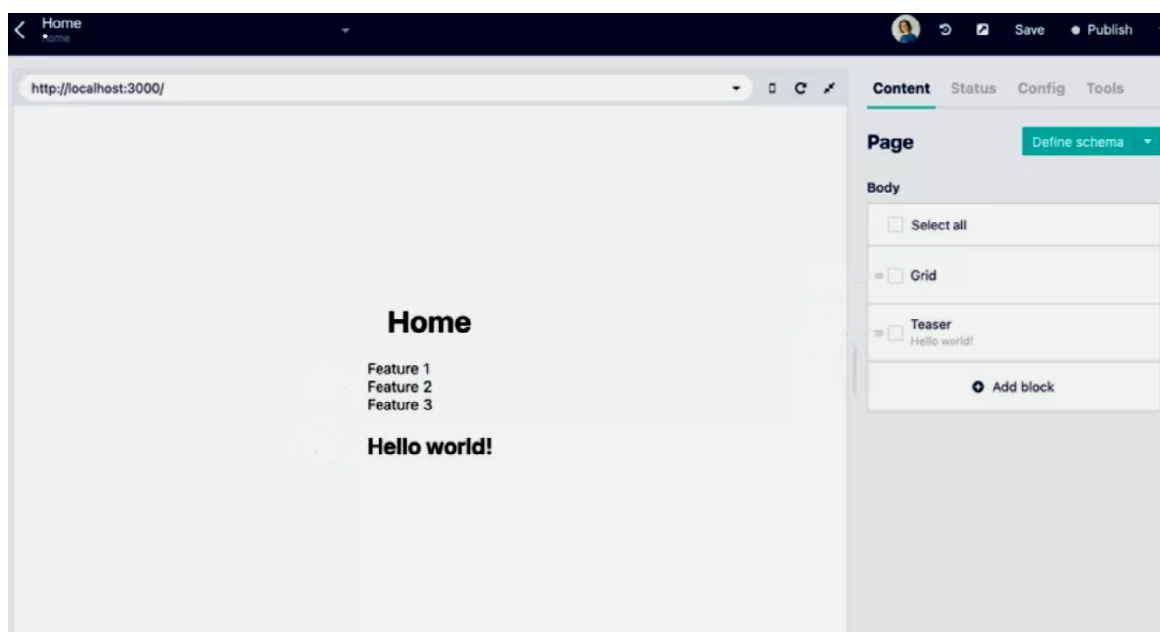


Рис. 4. Пример использования компонентов
Fig. 4. Example of component usage

Закключение

В свете изложенного в статье можно увидеть, что традиционные и headless CMS имеют свои достоинства и недостатки. Достоинства традиционных CMS состоят в том, что они довольно легко и быстро могут быть развернуты на серверах, однако они имеют и недостатки, такие как наличие множества зачастую ненужных модулей и сложности при редактировании страниц. Можно сказать, что если корпоративный сайт компании разработан с помощью традиционной CMS, то для его поддержки может понадобиться помощь сторонних разработчиков.

Однако существует такое решение, как headless CMS. Разрабатывая сайт с применением предложенного компонентного подхода, можно достичь того, что страницы сайта сможет редактировать пользователь, который далек от информационных технологий. Следовательно, подход позволяет избежать привлечения сторонних разработчиков для поддержки и обновления сайта, их участие требуется только при создании каркаса сайта и подключении CMS, что в свою очередь позволяет сократить затраты компании на поддержку корпоративного сайта.

Список литературы

1. Что такое CMS сайта? URL: <https://hostiq.ua/wiki/cms/>.
2. Горнаков С.Г. Осваиваем популярные системы управления сайтом. М.: ДМК-пресс, 2009. 327 с.
3. Palas P. *The Ultimate Guide to Headless CMS: Everything you need to know to choose the right CMS*. Traverse City: Independently published, 2017. 68 p.
4. Tissera E. How to choose a headless CMS // *Smashing magazine*. 2021. No. 15.
5. Колисниченко Д.С. Движок для вашего сайта. CMS Joomla!, Slaed, PHP-Nuke. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 213 с.
6. Garcia V., Writer S. Should your content management system go headless? // *The American Genius*. 2021. No. 9.
7. Mixon E. Headless CMS powers personalized, omnichannel e-commerce // *TechTarget*. 2020. No. 11.
8. Madalitso D. Creating a static blog with Sapper and Strapi // *Smashing magazine*. 2020. No. 13.
9. Zablocki J. *Orchard CMS: Up and Running: ASP.NET Website Development Made Easy*. Newton: O'Reilly Media, 2012. 132 p.
10. Directus CMS. URL: <https://docs.directus.io/>.
11. Storyblok CMS. URL: <https://www.storyblok.com/>.
12. Yin M. *The Definitive Guide to Next.js and Wagtail*. Saanich: Leanpub, 2021. 162 p.
13. Blokdyk G. *Component content management system Standard Requirements*. London: 5STARCOoks, 2021. 320 p.
14. Farrell B. *Web Components in Action*. New York: Manning, 2019. 432 p.
15. Tomlinson T. *Beginning Backdrop CMS*. New York: Apress, 2016. 288 p.

References

1. *Chto takoe CMS saita?* [What is a website CMS?]. Available at: <https://hostiq.ua/wiki/cms/>. (In Russ.)
2. Gornakov S.G. *Osvaivaem populyarnye sistemy upravleniya saitom* [Mastering popular content management systems]. Moscow: DMK-press; 2009. 327 p. (In Russ.)
3. Palas P. *The Ultimate Guide to Headless CMS: Everything you need to know to choose the right CMS*. Traverse City: Independently published; 2017. 68 p.
4. Tissera E. How to choose a headless CMS. *Smashing magazine*. 2021;(15).
5. Kolisnichenko D.S. *Dvizhok dlya vashego saita. CMS Joomla!, Slaed, PHP-Nuke* [The engine for your website. CMS Joomla, Slaed, PHP-Nuke]. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2008. 213 p. (In Russ.)
6. Garcia V., Writer S. Should your content management system go headless? *The American Genius*. 2021;(9).
7. Mixon E. Headless CMS powers personalized, omnichannel e-commerce. *TechTarget*. 2020;(11).
8. Madalitso D. Creating a static blog with Sapper and Strapi. *Smashing magazine*. 2020;(13).
9. Zablocki J. *Orchard CMS: Up and Running: ASP.NET Website Development Made Easy*. Newton: O'Reilly Media; 2012. 132 p.
10. Directus CMS. Available at: <https://docs.directus.io/>.
11. Storyblok CMS. Available at: <https://www.storyblok.com/>.
12. Yin M. *The Definitive Guide to Next.js and Wagtail*. Saanich: Leanpub; 2021. 162 p.
13. Blokdyk G. *Component content management system Standard Requirements*. London: 5STARCOoks; 2021. 320 p.
14. Farrell B. *Web Components in Action*. New York: Manning; 2019. 432 p.
15. Tomlinson T. *Beginning Backdrop CMS*. New York: Apress; 2016. 288 p.

Информация об авторах

Коваль Максим Евгеньевич, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах; Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия; kovalmax06@gmail.com.

Шинкарев Александр Андреевич, канд. техн. наук, инженер-программист, ООО «Софтмаст-Информационные Технологии», г. Челябинск, Россия; sania.kill@mail.ru.

Логиновская Валерия Олеговна, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; начальник отдела администрирования и координации Нацпрограммы Департамента координации программ и проектов, Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, г. Москва, Россия; valeria.login@yandex.ru.

Information about the authors

Maksim E. Koval, postgraduate student of the Department of Information and Analytical Support for Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kovalmax06@gmail.com.

Aleksandr A. Shinkarev, Cand. Sci. (Eng.), software engineer at LLC “Softmast-Information Technologies”, Chelyabinsk, Russia; sania.kill@mail.ru.

Shinkarev Aleksandr Andreevich

Valeriya O. Loginovskaya, postgraduate student of the Department of Information and Analytical Support of Management in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Head of the Department for Administration and Coordination of the National Program of the Department for the Coordination of Programs and Projects, Ministry of Digital Development, Telecommunications and Mass Media of the Russian Federation, Moscow, Russia; valeria.login@yandex.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 29.11.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 20.12.2021.

The article was submitted 29.11.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 20.12.2021.

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, № 1

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 28.01.2022. Дата выхода в свет 04.02.2022. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 18,13. Тираж 500 экз. Заказ 7/26. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.