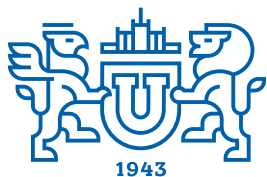


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2023
Т. 23, № 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:

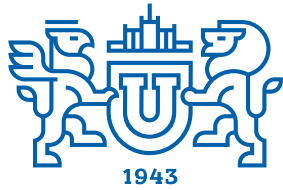
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного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

2023

Vol. 23, 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

АВЕРИНА Т.А., АВДЕЕВА Е.А., ЖЕРНОКЛЕЕВ А.С. Методологические аспекты управления цифровыми платформами 5

Управление в технических системах

НОСИКОВ М.В., ВОЙНОВ И.В., МОРОЗОВ Б.А. Математическая модель, алгоритм формирования вектора состояния и техническая реализация многокоординатного задающего органа внутрикамерных манипуляторов 19

БАРКАЛОВ С.А., КУРОЧКА П.Н., СЕРЕБРЯКОВА Е.А. Построение рейтинговой оценки на основе потоковой модели 31

ЗАТОНСКИЙ А.В., ФЕДОСЕЕВА К.А., НЕКРАСОВ Д.И. Разработка и настройка алгоритма программной идентификации отклонений в пенном слое калийной флотомашин 42

Управление в социально-экономических системах

КУТЫШКИН А.В., ШУЛЬГИН О.В. Использование непараметрического анализа данных для оценки эффективности муниципальных медицинских учреждений региона 57

ВОЛОДИНА Ю.И., СТАРИКОВА К.А. Разработка алгоритма адаптивной оценки продолжительности выполнения проектных задач 67

ГИЛЁВ Д.В., ЛОГИНОВСКИЙ О.В. Один из подходов решения противоречивых задач «мягкого моделирования» управления медицинским учреждением 82

БАРКАЛОВ С.А., МОИСЕЕВ С.И., СЕРЕБРЯКОВА Е.А. Математическая модель оптимального распределения ресурсов в строительной сфере в условиях их дефицита 89

ЛАРИОНОВА Р.А., КРИВОГИНА Д.Н., ХАРИТОНОВ В.А. Механизм управления структурой медицинского учреждения как организационной системой массового обслуживания в условиях нестационарного потока 100

CONTENTS

Informatics and computer engineering

AVERINA T.A., AVDEEVA E.A., GHERNOKLEEV A.S. Methodological aspects of digital platform management	5
--	---

Control in technical systems

NOSIKOV M.V., VOINOV I.V. MOROZOV B.A. Mathematical model, state vector calculation algorithm and realization of multi-axes control stick for intrachamber manipulators	19
BARKALOV S.A., KUROCHKA P.N., SEREBRYAKOVA E.A. Determining a rating score based on a streaming model	31
ZATONSKIY A.V., FEDOSEEVA K.A., NEKRASOV D.I. Development and tuning of algorithm for software identification of deviations in the potash flotation machine froth layer	42

Control in social and economic systems

KUTYSHKIN A.V., SHULGIN O.V. Use of nonparametric data analysis for assessing the efficiency of municipal medical institutions of the region	57
VOLODINA Yu.I., STARIKOVA K.A. Adaptive algorithm of estimating project task duration	67
GILEV D.V., LOGINOVSKIY O.V. One of the approaches to solving the contradictory problems of “soft modeling” of the management of a medical institution	82
BARKALOV S.A., MOISEEV S.I., SEREBRYAKOVA E.A. Mathematical model of the optimal resources distribution in the construction sphere under conditions of their deficiency	89
LARIONOVA R.A., KRIVOGINA D.N., KHARITONOV V.A. Methodology for managing the structure of a medical institution as an organizational system of queue service under conditions of non-stationary flow	100

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 658

DOI: 10.14529/ctcr230101

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМИ ПЛАТФОРМАМИ

Т.А. Аверина, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

Е.А. Авдеева, avdeeva_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5736-6175>

А.С. Жерноклеев, zhernokleev1999@mail.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Цифровые платформы являются крупнейшими агрегаторами данных и бенефициарами в условиях цифровой экономики. Цифровые платформы работают на микро-, мезо-, макро- и мегауровнях в различных форматах и практически во всех сферах человеческой деятельности. Компании-платформы обладают рядом уникальных конкурентных преимуществ по сравнению с традиционными компаниями и требуют специфических методов, моделей и инструментов управления. **Цель.** Целью исследования является определение особенностей функционирования цифровых платформ и разработка методологических основ для формирования моделей управления цифровыми платформами. **Теоретико-методологической основой исследования** являются труды отечественных и зарубежных ученых по проблемам управления цифровыми платформами и цифровой трансформацией. **Результаты.** В ходе исследования была обобщена и систематизирована классификация цифровых платформ на основе анализа отечественного и зарубежного опыта по 10 классификационным признакам. Организации и метаорганизации могут иметь несколько типов границ, соответственно, есть преимущества в разработке целостного представления, которое может выявить взаимодополняемость и взаимодействие между ними. Заметив, что существует взаимодействие между различными типами границ, можно определить границы цифровой платформы как комбинацию сферы деятельности, конфигурации и цифрового интерфейса платформы. Кроме того, необходимо отметить, что в силу специфики цифровых платформ считаем целесообразным выделение цифровой среды наряду с внешней и внутренней, часть факторов цифровой среды могут быть отнесены к внешней среде, а часть – к внутренней, при этом границы цифровой среды открыты. Анализ поэлементной модели цифровой платформы позволил выделить ее отличительные черты. Основная ценность платформенной компании – это не классическая физическая единица стоимости, а инфраструктура, обеспечивающая взаимодействие между производителями и потребителями. **Заключение.** Таким образом, дизайн ключевого взаимодействия является ядром каждой цифровой платформы. Ключевое взаимодействие является причиной, по которой участники используют цифровые платформы. Анатомия ключевого взаимодействия состоит из четырех характеристик: создание ценности, связь, потребление, компенсация. Различные участники могут быть отнесены к категории ядра платформы, участников платформы и среды платформы.

Ключевые слова: методология, управление, цифровизация, цифровая платформа

Для цитирования: Аверина Т.А., Авдеева Е.А., Жерноклеев А.С. Методологические аспекты управления цифровыми платформами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 5–18. DOI: 10.14529/ctcr230101

METHODOLOGICAL ASPECTS OF DIGITAL PLATFORM MANAGEMENT

T.A. Averina, ta_averina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9150-9018>

E.A. Avdeeva, avdeeva_ea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5736-6175>

A.S. Ghernokleev, zhernokleev1999@mail.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Digital platforms are the largest data aggregators and beneficiaries in the digital economy. Digital platforms operate at micro, meso, macro and mega levels in various formats and in almost all areas of human activity. Platform companies have a number of unique competitive advantages compared to traditional companies and require specific methods, models and management tools. **The research objective** is to determine the features of the functioning of digital platforms and develop methodological foundations for the formation of models for managing digital platforms. **The theoretical and methodological basis of the study** are the works of domestic and foreign scientists on the problems of managing digital platforms and digital transformation. **Results.** In the course of the research, the classification of digital platforms was generalized and systematized, based on the analysis of domestic and foreign experience in 10 classification criteria. Organizations and meta-organizations can have multiple types of boundaries, so there are advantages to developing a holistic view that can reveal complementarity and interaction between them. Noting that there is an interaction between different types of boundaries, the boundaries of a digital platform can be defined as a combination of the scope, configuration, and digital interface of the platform. In addition, it should be noted that due to the specifics of digital platforms, we consider it appropriate to single out the digital environment along with the external and internal, some of the digital environment factors can be attributed to the external environment, and some to the internal, while the boundaries of the digital environment are open. Analysis of the element-by-element model of the digital platform made it possible to highlight its distinctive features. The core value of a platform company is not a classic physical unit of value, but an infrastructure that enables interaction between producers and consumers. **Conclusion.** Thus, key interaction design is the core of every digital platform. Key interaction is the reason why participants use digital platforms. The anatomy of a key interaction consists of four characteristics: value creation, connection, consumption, compensation. Various participants can be categorized as platform core, platform participants, and platform environment.

Keywords: methodology, management, digitalization, digital platform

For citation: Averina T.A., Avdeeva E.A., Ghernokleev A.S. Methodological aspects of digital platform management. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):5–18. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230101

Информационная (цифровая) экономика переходит в последние годы на новый этап развития. Цифровые платформы являются крупнейшими агрегаторами данных и бенефициарами в условиях цифровой экономики. Цифровые платформы работают на микро-, мезо-, макро- и мегауровнях в различных форматах и практически во всех сферах человеческой деятельности. Компании-платформы обладают рядом уникальных конкурентных преимуществ по сравнению с традиционными компаниями, а следовательно, необходимы новые модели, методы и инструменты управления объектами подобного рода.

Целью данного исследования является определение особенностей функционирования цифровых платформ и разработка методологических основ для формирования моделей управлений цифровыми платформами.

Мы живем в мире, который сочетает в себе реальное и виртуальное. В настоящее время мы больше не думаем о создании предприятий, которыми невозможно управлять в этих двух средах.

Создание организациями цифровых платформ происходит для того, чтобы клиент, получив доступ к платформе по определенной инструкции, смог удовлетворить свои потребности в дистанционном автоматизированном формате при минимальном вовлечении сотрудников в выпол-

нение операций. Возникновение цифровой платформы в любой области является катализатором ее развития [1–4].

Государство также создает цифровые платформы, чтобы каждый человек смог в границах предоставленных ему возможностей и установленных обязанностей решить задачи в дистанционном режиме. Отметим, что цифровые платформы рассматриваются как технологическая инфраструктура, бизнес-модель, экосистема.

В подобных условиях практически каждый объект, участвующий в системе, получает цифровой аналог (рис. 1).



Рис. 1. Направления цифровой трансформации различных объектов
Fig. 1. Digital transformation directions of various objects

По оценкам Международной организации труда, число цифровых платформ в мире за последние десять лет увеличилось в пять раз, в начале 2021 года их было около 800. По прогнозам международной McKinsey, к 2025 году на цифровые экосистемы придется до 30 % глобального ВВП (\$60 трлн). Мировое лидерство принадлежит США и Китаю. На несколько глобальных фирм, учрежденных в этих странах, по данным ЮНКТАД приходится 90 % рыночной капитализации 70 крупнейших мировых цифровых платформ. Только на Microsoft, Apple, Amazon, Alphabet, Facebook, Tencent Holdings и Alibaba приходится две трети общей рыночной стоимости.

Что касается развития цифровых платформ в России, по данным Ассоциации компаний интернет-торговли (АКИТ), объем рынка интернет-торговли по итогам 2021 года составил 3,6 млрд рублей. В январе–апреле текущего года объем интернет-торговли в России вырос на 50 % относительно прошлогодних показателей и составил 1,5 трлн руб. Доля интернет-покупок в общем обороте розничной торговли в России достигла 11,8 %, что стало рекордным показателем за все время существования отрасли, рассказали в АКИТ [5].

Согласно глобальному исследованию цифровых платформ [6] изучение мирового опыта развития цифровых платформ может быть разделено на три связанных блока: структуры и этапы формирования цифровых платформ, аспекты бизнеса платформ, проблемы и возможности интегрирования в экосистему (рис. 2). Исследуем ряд из вышеуказанных направлений подробнее.

Цифровая платформа – это система алгоритмизированных взаимовыгодных взаимоотношений значимого количества независимых участников отрасли экономики (или сферы деятельности), осуществляемых в единой информационной среде, приводящая к снижению транзакционных издержек за счёт применения пакета цифровых технологий работы с данными и изменения системы разделения труда. Данное определение позволяет на абстрактном уровне выделить критерии отнесения той или иной сущности к категории «цифровая платформа» (рис. 3).



Рис. 2. Основные направления изучения мирового опыта развития цифровых платформ
Fig. 2. The main directions of studying the world experience in the development of digital platforms

1. Алгоритмизация взаимодействия участников платформы: процедуры взаимодействия участников детерминированы и реализуются в рамках установленного алгоритма

2. Взаимовыгодность отношений участников платформы (принцип win-win)

3. Значимость количества участников деятельности (масштаб), использующих платформу для взаимодействия (в отношении всего множества потенциальных участников платформы)

4. Наличие единой информационной среды, в которой осуществляются взаимодействия участников, и соответствующей информационно-технологической инфраструктуры

5. Наличие эффекта в виде снижения транзакционных издержек при взаимодействии различных участников платформы – по сравнению с тем же взаимодействием без платформы (за счёт применения определённых технологий работы с данными и/или за счёт реорганизации бизнес-процессов)

Рис. 3. Характеристики цифровых платформ
Fig. 3. Characteristics of digital platforms

В результате существует множество различных типов цифровых платформ, каждая из которых отвечает различным потребностям своих пользователей в различных контекстах [4, 7, 8]. Это позволяет сделать продукты и услуги доступными в цифровом виде.

Систематизируем основные виды цифровых платформ [9–16] (рис. 4).



Рис. 4. Классификация цифровых платформ
Fig. 4. Classification of digital platforms

Модель границ цифровой платформы

Организации и метаорганизации могут иметь несколько типов границ, и существует предположение, что есть преимущества в разработке целостного представления, которое может выявить взаимодополняемость и взаимодействие между ними [9, 13, 14]. Заметив, что существует взаимодействие между различными типами границ, можно определить границы цифровой платформы как соответствующую комбинацию (рис. 5).



Рис. 5. Границы цифровых платформ
Fig. 5. Borders of digital platforms

Сфера деятельности платформы характеризует, какие активы принадлежат, какая рабочая сила используется и какие действия выполняются внутри компании.

Конфигурация и состав сторон платформы ограничивает, какие отдельные группы клиентов имеют доступ к платформе.

Цифровые интерфейсы определяют степень открытости и баланс направленности двустороннего обмена данными между платформой и каждой из ее сторон.

Эти три границы представляют собой структурный выбор, который фирма-платформа делает в отношении распределения активов, ресурсов и деятельности в различные режимы управления в поддержку стратегической цели оптимальной организации ресурсов и управления ими [14].

Преимущества, получаемые от внедрения цифровых платформ, многочисленны и приводят к интенсивной трансформации бизнеса в течение самых первых месяцев. В онлайн-мире реакция происходит быстро, поэтому корпоративная реакция тоже должна быть быстрой.

Первое преимущество напрямую связано с требованиями рынка. Сегодня потребители перешли на цифровые технологии, и количество онлайн-покупок продолжает расти.

Таким образом, цифровая платформа – пропуск в эту страну возможностей (и прибыли).

Цифровые платформы позволяют:

- завоевать новых клиентов и / или пользователей, инвестируя в узнаваемость бренда и таким образом охватывая более широкую аудиторию, которая потенциально более заинтересована в том, что компания может предложить;
- сократить затраты, имея инструменты, которые автоматизируют процесс и позволяют ускорить выполнение процедур;
- оптимизировать ресурсы, обеспечивая более эффективное управление с помощью полных и безопасных платформ;
- увеличить доходы, учитывая, что онлайн-расширение бизнеса максимизирует охват предложения и обеспечивает доступ к нему большего числа людей, увеличивая объем продаж и получаемую прибыль.

Сама цифровая трансформация должна быть хорошо продумана.

Определяющие факторы цифровой трансформации могут быть сгруппированы как внутренние и внешние. Тремя внешними факторами, вызывающими необходимость цифровой трансформации, являются:

- доступность цифровых технологий;
- конкуренция;
- поведение потребителей.

Р. Эллер и др. [11] говорят о трех основных ресурсах в продвижении цифровизации бизнеса:

- информационные технологии;
- навыки сотрудников;
- цифровая стратегия.

Эти ресурсы могут быть определены как внутренние факторы.

Финансовый аспект также важен, поскольку он касается корпоративной способности финансировать усилия по цифровому преобразованию, которые служат стимулом или ограничителем возможностей цифрового преобразования.

Нгуен с соавт. [14] сгруппировали пять важнейших влияющих факторов успешного и неудачного внедрения ИТ:

- организация;
- внутренний ИТ-ресурс;
- внешний ИТ-консультант;
- отношения с поставщиками;
- отношения с клиентами.

Эти факторы обязательно должны учитываться менеджерами или владельцами бизнеса, чтобы свести к минимуму риски при его внедрении.

Внешние ИТ-консультанты, поставщики и отношения с клиентами могут быть отнесены к категории внешних факторов, в то время как организация и внутренние ИТ-ресурсы могут быть

отнесены к категории внутренних факторов. Выявлено, что фактор клиента является основным двигателем внедрения ИТ на малых предприятиях.

На основе обзоров литературы разделяют влиятельные факторы цифровой трансформации на две части: внутренние и внешние факторы.

Они выявляют три внутренних фактора, влияющих на цифровую трансформацию:

- совместимость внутренних возможностей;
- совместимость внутренних ресурсов;
- изменения бизнес-модели.

С другой стороны, существенно влияют на цифровую трансформацию четыре потенциальных внешних фактора:

- совместимость внешних возможностей;
- совместимость внешних ресурсов;
- государственное регулирование;
- промышленные факторы.

Возможности внешних и внутренних факторов для стимулирования цифровой трансформации можно рассматривать как с точки зрения экосистемы, так и с точки зрения возможностей.

Перспектива возможностей фокусируется на динамических управленческих способностях, делая упор на три основных ядра: управленческое познание, управленческий социальный капитал и управленческий человеческий капитал.

Таким образом, на основании вышеизложенного целесообразно дополнить классическую модель внешней и внутренней среды организации, представленной на рис. 6 специфическими факторами, которые присущи именно цифровым платформам. При этом стоит обратить отдельное внимание на границы сред (рис. 6–8).

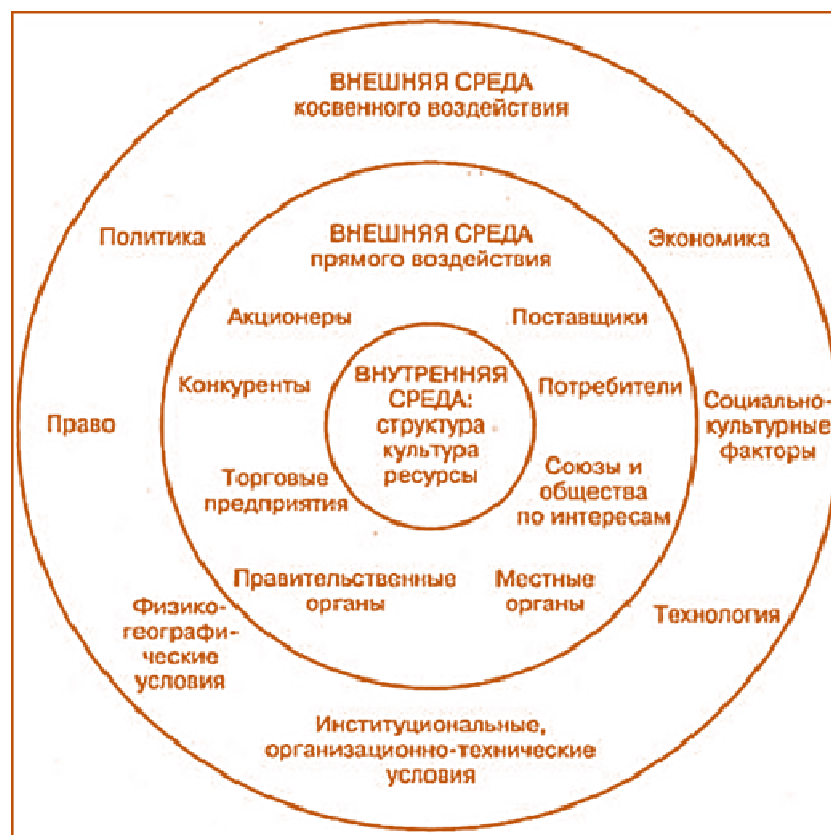


Рис. 6. Факторы внешней и внутренней среды организации
Fig. 6. Factors of the external and internal organization environment

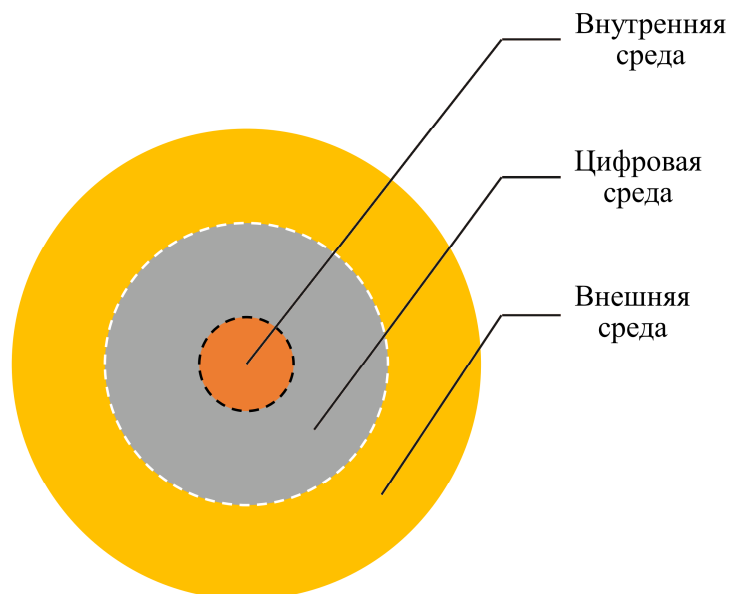


Рис. 7. Совокупность организационных сред цифровых платформ
Fig. 7. Organizational environments of digital platforms



Рис. 8. Модель факторов организационных сред цифровых платформ
Fig. 8. Model of organizational environments factors of digital platforms

Поэлементная модель цифровой платформы

В понятие цифровой платформы входит как сама технологическая конструкция, так и платформенные бизнес-модель и экосистема (рис. 9).

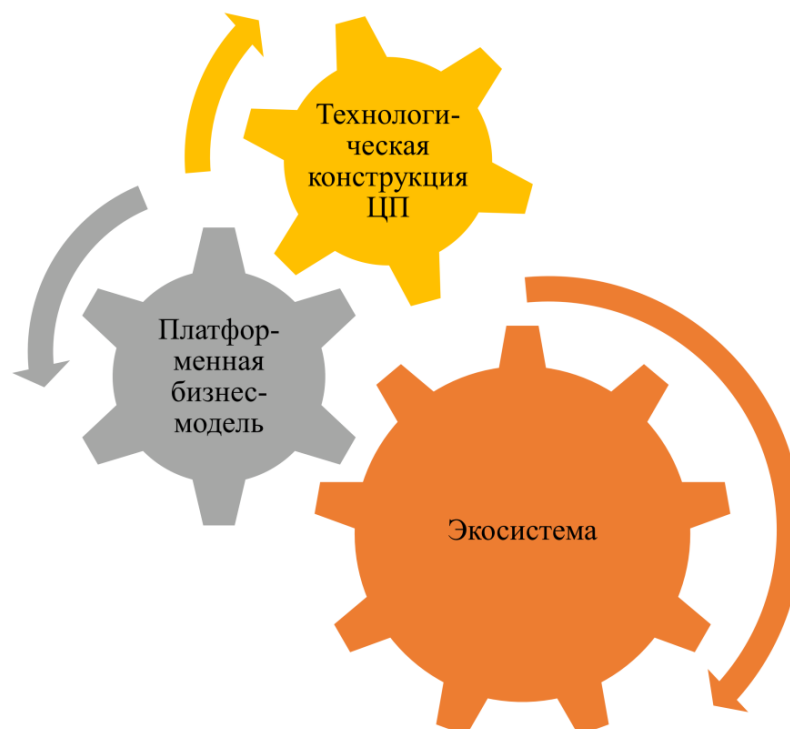


Рис. 9. Аспекты цифровой платформы
Fig. 9. Aspects of the digital platform

Платформа как бизнес-модель представляет собой модель обеспечения посредством технологической площадки прямого взаимодействия и осуществления транзакций между субъектами с использованием новых способов и форм взаимодействия, создания ценности и ценообразования. Это отличает платформы от торговцев и классических посредников, где отсутствует прямое взаимодействие заинтересованных друг в друге сторон, а также от вертикально интегрированных компаний, которые объединяют одну сторону рынка в рамках единой структуры собственности. К таким бизнес-моделям можно отнести, например, платформенные модели совместного пользования различными активами, в том числе шеринговые (sharing) или пиринговые (peer-to-peer) платформы.

Совокупность сообществ различных участников ЦП, создающих ценность путем взаимодействия и конкуренции в рамках ЦП, а также система отношений между ними составляют платформенную экосистему. Для поддержания полноты и безопасности платформенной экосистемы владельцами и менеджерами ЦП используются наряду с механизмами самоуправления также и иные механизмы управления, ориентированные на обеспечение необходимого уровня контроля и мотивации участников экосистемы.

Выделяют четыре основных типа платформенных участников: владельцев (собственников) платформы, менеджеров (провайдеров), комплементоров (разработчиков ядра и периферийных элементов ЦП) и конечных независимых пользователей (потребителей, поставщиков и др.). С точки зрения архитектуры ЦП имеют многоуровневую модульную структуру и состоят из постоянных («ядерных») и переменных («периферийных») компонентов. ЦП могут функционировать на микро-, макро-, мезо- и глобальном уровнях. Они могут использоваться в рамках отдельных компаний (внутренние платформы), различных цепочек создания стоимости, а также как отраслевые (внешние) платформы, формируя на базе платформы-лидера отраслевые экосистемы. Внешние платформы при этом являются зачастую более конкурентоспособными за счет использования сетевых эффектов и большей открытости к инновациям [17].

Рассмотрим подробнее, как работают цифровые платформы.

Для каждой развитой цифровой платформы можно выделить пять групп пользователей (рис. 10).

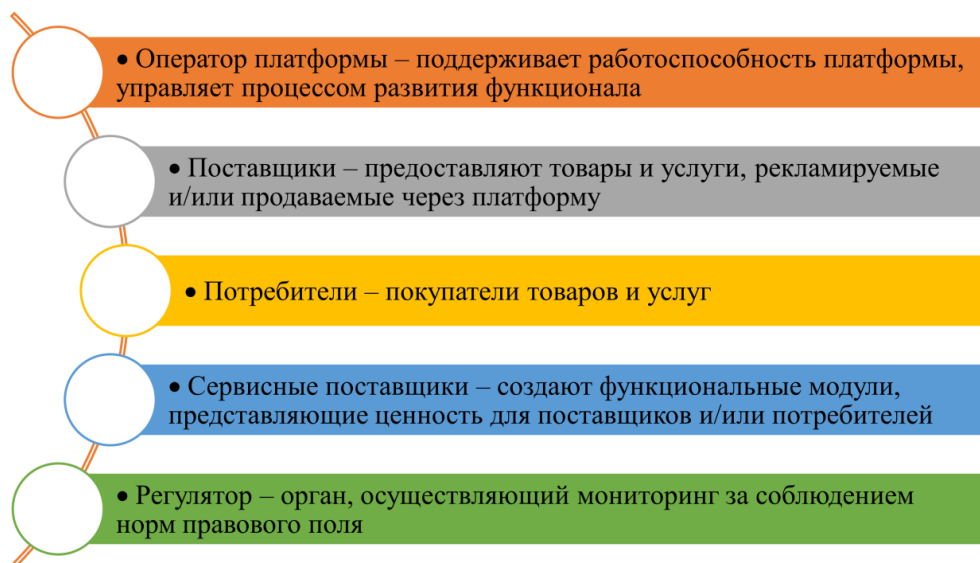


Рис. 10. Группы пользователей (участники) развитой цифровой платформы
Fig. 10. User groups (participants) of a developed digital platform

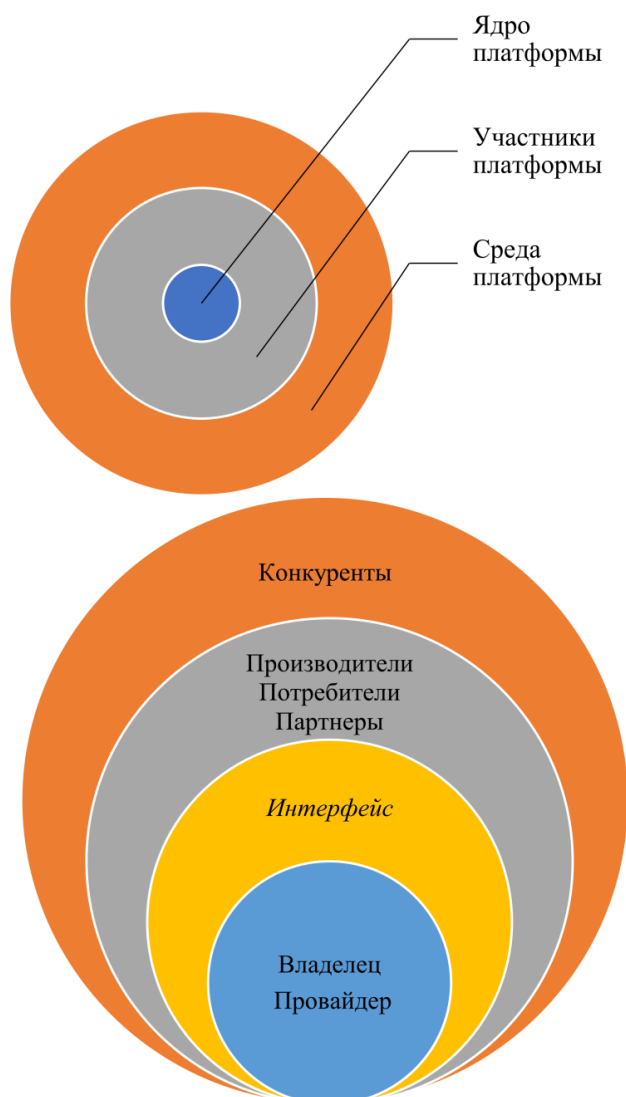


Рис. 11. Участники цифровой платформы
Fig. 11. Participants of the digital platform

Успех цифровой платформы основан не на внутренних ресурсах, а на экосистеме, в которую встроена платформа. Acatech – Национальная академия наук и инженерии использует концепцию экосистемы платформы и заявляет, что экосистема платформы описывает экономические механизмы, лежащие в основе цифровых платформ, а также вовлеченные заинтересованные стороны и их отношения [12]. По словам Эванса и Шмалензее [13], к этим заинтересованным сторонам относятся все лица, компании, учреждения и другие факторы среды, влияющие на ценность, создаваемую платформой. Эта ценность создается платформами, использующими данные заинтересованных сторон для управления физическими и цифровыми ресурсами в экосистеме [9]. Таким образом, цифровую платформу следует рассматривать как двусторонний или многосторонний рынок, на котором различные участники объединяются посредником и предполагается распределение ролей в рамках цифровой платформы, как показано на рис. 11. Различные участники относятся к категории ядра платформы, участники платформы и среда платформы [15].

Основная ценность платформенной компании – это не классическая физическая единица стоимости, а инфраструктура, обеспечивающая взаимодействие между производителями и потребителями. Таким образом, дизайн ключевого взаимодействия является ядром каждой цифровой платформы.

С точки зрения Паркера [15], ключевое взаимодействие является причиной, по которой участники используют цифровые платформы. По мнению Чоудари [9], анатомия ключевого взаимодействия состоит из четырех характеристик.

1. Создание ценности: в каждом ключевом взаимодействии участвует как минимум один производитель, создающий единицу ценности. Производство единиц стоимости производителем знаменует собой отправную точку взаимодействия на платформе.

2. Связь: связь производителей и потребителей обеспечивается за счет фильтрации и индивидуализации контента платформы. Фильтрация гарантирует, что предлагаются только высококачественные единицы стоимости. С помощью фильтров конкретный потребитель получает доступ к актуальному для него контенту. Цифровые платформы, способные предоставлять своим потребителям индивидуальный контент, побуждают их продолжать участие.

3. Потребление: в каждом ключевом взаимодействии участвует как минимум один участник платформы, который потребляет единицу ценности, которая имеет для него значение.

4. Компенсация: ключевое взаимодействие завершается компенсацией. В ключевом взаимодействии происходит обмен информацией, единицами стоимости и платежами между участниками платформы. Сначала производитель и потребитель обмениваются информацией. Затем производитель передает единицу стоимости потребителю и получает взамен плату. Оплата не всегда должна быть денежной, но может также принимать форму данных, оценок и т. д. Количество ключевых взаимодействий увеличивается с увеличением объема предлагаемых услуг/продуктов и количества участников экосистемы платформы.

Цикл продолжительности жизни цифровых платформ можно разделить на три этапа (рис. 12).



Рис. 12. Фазы жизненного цикла цифровой платформы
Fig. 12. Phases of the life cycle of a digital platform

Существует несколько условий развития цифровых платформ:

1. Высокий процент технологии в составе стоимости продукта по отношению к другим составляющим.
2. Главной целью цифровых платформ является распространение технологий.
3. Высокий уровень развития инфраструктуры, которая позволяет сделать платформу повсеместной.
4. Высокая конкуренция на рынке, заставляющая организации произвести обеспечение снижения уровня показателя времени вывода нового продукта.
5. Высокая стоимость такого ресурса, как время.

Средняя продолжительность существования цифровой платформы – 4–5 лет. Многие компании с системой привлечения независимых подрядчиков и фрилансеров для работы на неполный рабочий день разорились в течение 2–3 лет из-за нехватки финансов и малого числа пользовате-

лей. Независимым проектам также удавалось продержаться на рынке примерно 3 года. А приобретенные компании с высоким балансом существовали дольше, в среднем 7,5 года.

Таким образом, можно сделать вывод, что каждая цифровая платформа проходит схожий жизненный цикл, состоящий из трех фаз, и может развиваться только при наличии определенных условий.

Цифровые платформы открывают возможности для бизнеса и позволяют создавать бизнес-экосистемы, в которых происходит создание ценности. Это может быть торговая площадка, где взаимодействуют покупатели и продавцы, или более сложные экосистемы, в которых разработчики создают приложения и инструменты для других пользователей [16].

Основная цель цифровых платформ – улучшить сотрудничество между конечными пользователями и производителями для совершения сделок друг с другом. Эти платформы позволяют пользователям обмениваться различной информацией, такой как новые продукты и услуги, и подключать экосистему платформы.

Стратегия цифровой трансформации – это внедрение цифровых технологий во все отрасли, изменение того, как вы используете их и передаете потребителям.

Стратегия цифровой платформы направлена на проникновение на онлайн-рынок, на акцентирование внимания на том, чтобы позволить одному сегменту участников извлекать выгоду из присутствия или взаимодействия других.

Целью данного исследования являлось определение особенностей функционирования цифровых платформ и разработка методологических основ для формирования моделей управлений цифровыми платформами.

Наиболее существенными научными результатами, полученными в ходе исследования, являются:

- систематизация и обобщение классификации цифровых платформ по различным признакам на основе анализа отечественных и зарубежных исследований в данной области;
- уточнение модели внутренней и внешней среды организации с учетом специфики цифровых платформ.

Список литературы

1. Авдеева Е.А., Аверина Т.А., Балашова Н.А. Технологические прорывы как основополагающий фактор глобальной конкурентоспособности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 2. С. 141–147. DOI: 10.14529/ctcr220213
2. Баркалов С.А., Авдеева Е.А., Аверина Т.А. Инновационное управление социальной системой // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2020). XIV Всероссийская с международным участием школа-симпозиум: сборник научных трудов. Симферополь, 2020. С. 31–36.
3. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Калинина Н.Ю. Динамическая модель процесса принятия решений // Междисциплинарные исследования экономических систем: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / под ред. А.Н. Бородулина. Тверь, 2022. С. 21–29.
4. Avdeeva E., Averina T., Barkalov S. Innovative Models and Strategies for Digital Transformation of Companies for Sustainable Development // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2021. P. 340–343. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632222
5. Сапожников А. АКИТ: объем интернет-торговли в России в 2022 году вырос на 50 %. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5392197>.
6. Глобальное исследование цифровых платформ. URL: <http://www.fidp.ru/research/global>.
7. Еремин В.В., Бауэр В.П., Райков А.Н. Управление конкурентоспособностью в системе цифровых платформ // Проблемы управления. 2020. № 4. С. 27–40. DOI: 10.25728/pu.2020.4.3
8. Development of a stimulating mechanism for the coordinated management of agents' resources in the implementations of joint projects / Yu.V. Bondarenko, A.E. Azeez, T.V. Azarnova, S.A. Barkalov // Journal of Physics: Conference Series. International Conference “Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems” (AMCSM 2020). 2021. Vol. 1902 (1). P. 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012032

9. Choudary S.P. Platform Scale: How an Emerging Business Model Helps Startups Build Large Empires with Minimum Investment. Boston: Platform Thinking Labs Pte. Ltd, 2015.
10. Eisenmann T., Parker G.G., van Alstyne M.W. Strategies for Two-Sided Markets // Harvard Business Review. 2006. Vol. 84, no. 10. P. 92–101.
11. Antecedents, Consequences, and Challenges of Small and Medium-sized Enterprise Digitalization / R. Eller, P. Alford, A. Kallmunzer, M. Peters // Journal of Business Research. 2020. Vol. 112. P. 119–127. DOI: 10.1016/j.jbusres.2020.03.004
12. IT-Plattformen für die Smart Service Welt (acatech DISKUSSION) / G. Engels, C. Plass, F.J. Rammig (Hrsg.). München: Herbert Utz Verlag, 2017.
13. Evans D.S., Schmalensee R. Matchmakers: The New Economies of Multisided platforms. Boston: Harvard Business Review Press, 2016.
14. Nguyen T.H., Newby M., Macaulay M.J. Information Technology Adoption in Small Business: Confirmation of a Proposed Framework // Journal of Small Business Management, 2015. Vol. 53. P. 207–227. DOI: 10.1111/jsbm.12058
15. Parker G., Van Alstyne M. Innovation, Openness, and Platform Control // Management Science. 2017. Vol. 64 (7). P. 1–18. DOI: 10.1287/mnsc.2017.2757
16. The Evolution of Digital Platforms / A. Zutshi, T. Nodehi, A. Grilo, B. Rizvanović // Advances in Management Research. 2019. P. 41–50. DOI: 10.1201/9780429280818-3
17. Гелисханов И.З., Юдина Т.Н., Бабкин А.В. Цифровые платформы в экономике: сущность, модели, тенденции развития // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2018. Т. 11, № 6. С. 22–36. DOI: 10.18721/JE.11602

References

1. Avdeeva E.A., Averina T.A., Balashova N.A. Technological breakthroughs as a fundamental factor in global competitiveness. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(2):141–147. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220213
2. Barkalov S.A., Avdeeva E.A., Averina T.A. [Innovative Management of the Social System]. In: *Analysis, modeling, management, development of socio-economic systems (AMUR-2020). XIV All-Russian school-symposium with international participation: collection of scientific papers*. Simferopol; 2020. P. 31–36. (In Russ.)
3. Barkalov S.A., Moiseyev S.I., Kalinina N.Yu. [Dynamic model of the decision-making process]. In: *Interdisciplinary studies of economic systems. Materials of the All-Russian scientific-practical conference*. Tver, 2022. P. 21–29. (In Russ.)
4. Avdeeva E., Averina T., Barkalov S. Innovative Models and Strategies for Digital Transformation of Companies for Sustainable Development. In: *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. 2021. P. 340–343. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632222
5. Sapozhnikov A. Sapozhnikov A. *AKIT: ob'yem internet-torgovli v Rossii v 2022 godu vyros na 50 %* [AKIT: e-commerce volume in Russia grew by 50% in 2022]. (In Russ.) Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/5392197>.
6. *Global'noye issledovaniye tsifrovyykh platform* [Global research of Digital Platforms]. (In Russ.) Available at: <http://www.fidp.ru/research/global>.
7. Eremin V.V., Bauer V.P., Raikov A.N. Competitiveness management in the digital platform system. *Problemy upravleniya*. 2020;4:27–40. (In Russ.) DOI: 10.25728/pu.2020.4.3
8. Bondarenko Yu.V., Azeez A.E., Azarnova T.V., Barkalov S.A. Development of a stimulating mechanism for the coordinated management of agents' resources in the implementations of joint projects. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference "Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems" (AMCSM 2020)*. 2021. 1902(1):012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012032
9. Choudary S.P. *Platform Scale: How an Emerging Business Model Helps Startups Build Large Empires with Minimum Investment*. Boston: Platform Thinking Labs Pte. Ltd; 2015.
10. Eisenmann T., Parker G.G., van Alstyne M.W. Strategies for Two-Sided Markets. *Harvard Business Review*. 2006;84(10):92–101.

11. Eller R., Alford P., Kallmunzer A., Peters M. Antecedents, Consequences, and Challenges of Small and Medium-sized Enterprise Digitalization. *Journal of Business Research*. 2020;112:119–127. DOI: 10.1016/j.jbusres.2020.03.004
12. Engels G., Plass C., Rammig F.J. (Hrsg.). IT-Plattformen für die Smart Service Welt (acatech DISKUSSION). München: Herbert Utz Verlag; 2017.
13. Evans D.S., Schmalensee R. Matchmakers: The New Economies of Multisided platforms. Boston: Harvard Business Review Press; 2016.
14. Nguyen T.H., Newby M., Macaulay M.J. Information Technology Adoption in Small Business: Confirmation of a Proposed Framework. *Journal of Small Business Management*. 2015;53:207–227. DOI: 10.1111/jsbm.12058
15. Parker G., Van Alstyne M. Innovation, Openness, and Platform Control. *Management Science*. 2017;64(7):1–18. DOI: 10.1287/mnsc.2017.2757
16. Zutshi A., Nodehi T., Grilo A., Rizvanović B. The Evolution of Digital Platforms. In: *Advances in Management Research*; 2019. P. 41–50. DOI: 10.1201/9780429280818-3
17. Geliskhanov I.Z., Yudina T.N., Babkin A.V. Digital platforms in economics: essence, models, development trends. *St. Petersburg state polytechnical university journal. Economics*. 2018;11(6):22–36. (In Russ.) DOI: 10.18721/JE.11602

Информация об авторах

Аверина Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; ta_averina@mail.ru.

Авдеева Елена Александровна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; avdeeva_ea@mail.ru.

Жерноклеев Артем Сергеевич, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; zhernokleev1999@mail.ru.

Information about the authors

Tatiana A. Averina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; ta_averina@mail.ru.

Elena A. Avdeeva, Cand. Sci. (Econ), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; avdeeva_ea@mail.ru.

Artem S. Ghernokleev, Master's Student of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; zhernokleev1999@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.10.2022

The article was submitted 20.10.2022

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья

УДК 007.51:007.52:681.516:681.518

DOI: 10.14529/ctcr230102

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОКООРДИНАТНОГО ЗАДАЮЩЕГО ОРГАНА ВНУТРИКАМЕРНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

М.В. Носиков, nosikovmv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9361-2900>

И.В. Войнов, voinoviv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7926-8610>

Б.А. Морозов, morozovba@susu.ru

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

Аннотация. Цель исследования: разработка математической модели и алгоритма формирования вектора состояния многокоординатного задающего органа дельта-типа для осуществления управления манипуляторами с человеком-оператором в контуре управления. **Методы исследования.** В работе рассмотрены существующие методы дистанционного управления многостепенными манипуляторами (специального назначения) с человеком-оператором в контуре управления, выявлены достоинства и недостатки существующих решений. При этом поставлена задача синтеза задающего органа для обеспечения управления манипулятором в пространстве одной рукой. На сегодняшний день на предприятиях атомной промышленности широко применяются герметичные камеры, в которых устанавливаются электромеханические манипуляторы копирующего типа. В состав таких манипуляторов входят исполнительные органы, устанавливаемые непосредственно в герметичной камере, и их кинематически подобные задающие органы. Оператор вручную перемещает задающий орган, траектория движения звеньев которого повторяется внутри камеры исполнительным органом манипулятора. С учетом физического и морального устаревания данного оборудования требуется введение современных подходов к построению человеко-машинных интерфейсов. В работе предложена математическая модель вычисления вектора состояния (линейных и угловых координат) задающего органа дельта-типа по измеряемой информации об относительном угловом положении в его вращательных кинематических парах. **Результаты исследования.** Синтезирован алгоритм вычисления координат рукоятки задающего органа на основе априорной информации о взаимном расположении элементов дельта-механизма. С учетом расположенных на рукоятке задающего органа дополнительных дискретных и пропорциональных каналов управления предложенные алгоритм и его практическая реализация позволяют вводить дополнительные режимы управления манипулятором. **Заключение.** К основным результатам работы относится математическая модель и алгоритм формирования вектора состояния задающего органа дельта-типа, позволяющего оператору осуществлять формирование векторов линейной и угловой скорости движения схвата многостепенного манипулятора одной рукой. Техническая реализация задающего органа и алгоритма, а также опытная эксплуатация задающего органа в составе манипуляционной системы показали высокую эффективность предложенных решений.

Ключевые слова: многостепенный манипулятор, герметичная камера, задающий орган, джойстик

Для цитирования: Носиков М.В., Войнов И.В., Морозов Б.А. Математическая модель, алгоритм формирования вектора состояния и техническая реализация многокоординатного задающего органа внутрикамерных манипуляторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 19–30. DOI: 10.14529/ctcr230102

MATHEMATICAL MODEL, STATE VECTOR CALCULATION ALGORITHM AND REALIZATION OF MULTI-AXES CONTROL STICK FOR INTRACHAMBER MANIPULATORS

M.V. Nosikov, nosikovmv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9361-2900>

I.V. Voinov, voinoviv@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7926-8610>

B.A. Morozov, morozovba@susu.ru

South Ural State University, Miass, Russia

Abstract. The purpose of the study is a development of a mathematical model and an algorithm for the calculation of the state vector of a multi-axes delta-type control joystick for moving special purposes arm manipulators by a human operator in the loop. **Research methods.** The paper considers the existing methods of remote control of intrachambers special purpose arm manipulators with a human operator in the control loop, identifies the advantages and disadvantages of existing solutions. The task of synthesizing the optimal control stick to ensure driving of the manipulator in 3D-space was set. Today, nuclear industry enterprises widely use hermetic chambers in which copy-type electromechanical manipulators are installed. The manipulation system includes an arm manipulator installed directly in a sealed chamber, and its kinematically similar control arm. The operator manually moves the control arm, the trajectory of which is repeated inside the chamber by the arm manipulator. Taking into account moral and physical obsolescence, the introduction of modern approaches to the human-machine interaction is required. The paper proposes a mathematical model for calculation the state vector (linear and angular coordinates) of a delta-type control stick from measured information about the relative angular position in its rotational kinematic pairs. **Results of the study.** An algorithm for calculating the coordinates of the handle of the control stick is synthesized based on a priori information about the relative position of the elements in the delta-mechanism. Taking into account the additional discrete and proportional controls located on the handle of the control stick, the proposed algorithm and its practical implementation make it possible to introduce effective manipulator control modes. **Conclusion.** The main results of the work include a mathematical model and an algorithm for generating the state vector of the delta-type control stick, which allows the operator to form the linear and angular velocity vectors of the arm manipulator and its gripper movement by one hand. The technical implementation of the control stick and algorithm, as well as its test operation with a dual arm manipulator system, showed the high efficiency of the proposed solutions.

Keywords: arm manipulator, sealed chamber, delta-mechanism, control stick

For citation: Nosikov M.V., Voinov I.V. Morozov B.A. Mathematical model, state vector calculation algorithm and realization of multi-axes control stick for intrachamber manipulators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):19–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230102

Введение

В технологических процессах переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и в аналитических лабораториях соответствующих производств используются герметичные камеры, внутри которых исполнительными органами различных манипуляторов перемещается специальная технологическая тара с жидкими, сыпучими или твердыми радиоактивными материалами. Управление движением манипулятора осуществляется человеком-оператором дистанционно: посредством кинематически подобных задающих органов (ЗО) и системы управления манипулятором, соединенной с исполнительным органом (ИО) механической или электрической связью [1, 2].

В настоящее время наиболее широкое применение для решения поставленных задач на предприятиях атомной промышленности нашли электромеханические манипуляторы МЭМ-10 [3]. Исполнительный орган манипулятора содержит 6 степеней подвижности и размещается внутри герметичной камеры, а кинематически подобный задающий орган с системой управления – в ра-

бочей зоне оператора. К недостаткам данного манипулятора относятся значительные люфты в зубчатых передачах манипуляторов, что снижает точность операций взятия-перемещения объектов манипулирования, необходимость определенных физических усилий человека-оператора при перемещении задающего органа, а также использование устаревшей и давно не выпускаемой системы типа «сельсин-датчик – сельсин-приемник». Серийно выпускаемые промышленные роботы-манипуляторы (KUKA и аналогичные) фактически неприменимы к выполнению задач внутри герметичных камер, в первую очередь из-за низкой радиационной стойкости и их массогабаритных характеристик.

На рис. 1 представлена типовая схема работы с радиоактивными материалами с использованием электромеханического копирующего манипулятора с кинематически подобным задающим органом и оператором в контуре управления.

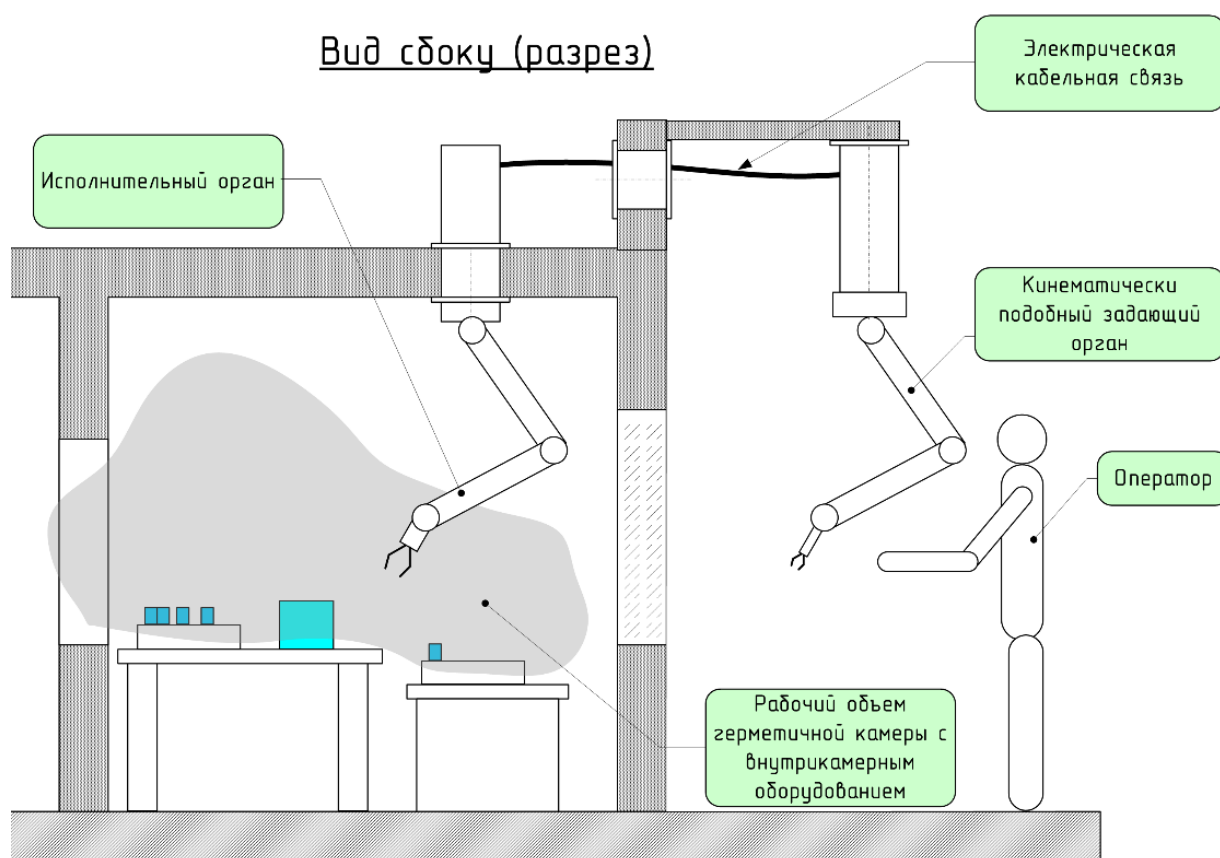


Рис. 1. Копирующий манипулятор в герметичной камере
Fig. 1. Copying manipulator in a hotcell

Кроме очевидных достоинств 3О копирующего типа обладают и рядом недостатков:

- 1) конструктивная сложность как самого 3О, так и передач 3О–ИО;
- 2) необходимость механической фиксации промежуточных степеней подвижности 3О при выполнении ряда операций;
- 3) значительные линейные перемещения 3О, что в условиях ограниченных по площади рабочих мест операторов может быть помехой.

В связи с этим для построения современных систем управления многостепенными манипуляторами необходимо применять новые подходы и возможности современной элементной базы, при этом исходить:

- 1) из двигательных возможностей оператора (его кинематических и силомоментных ограничений) и возможностей расположения пульта управления относительно герметичной камеры;

2) числа степеней подвижности объекта управления – исполнительного органа манипулятора;

3) режимов управления объектом управления, способов переключения между режимами;

4) необходимости и технической возможности реализации дополнительных каналов человеко-машинного интерфейса (дополнительные задающие органы, средства индикации и т. п.).

В ряде отраслей промышленности, а также в медицине нашли применение задающие органы типа «джойстик» [4–7]. Специфические условия эксплуатации манипуляторов в атомной промышленности не позволяют использовать данные наработки непосредственно при работе с радиоактивными материалами.

В общем случае при использовании ЗО типа «джойстик» существуют три основных метода управления манипулятором: управление по вектору скорости (УВСК), управление по вектору силы (УВС), управление по положению (УП) [8, 9].

Необходимо принять во внимание, что в связи с ограниченным диапазоном перемещений ЗО управление внутрикамерным манипулятором обычно выполняется по вектору скорости (УВСК), а управление по вектору положения при необходимости осуществляется в ограниченных пространственных зонах.

Для работы по методу УВС в состав ЗО должны входить силовые и/или моментные исполнительные приводы, прикладываемые соответствующие силовые воздействия к рукоятке ЗО, в составе манипулятора – датчики моментных усилий в сочленениях манипулятора или датчики линейных сил, возникающих в схвате манипулятора под действием нагрузки или перемещений. Техническая реализация ЗО для данного метода достаточно трудоемка, и в практических конструкциях манипуляторов применяют методы УВСК и УП.

Применение метода УП для ЗО типа «джойстик» в прямом виде также имеет ограничение на применение в связи с небольшим угловым перемещением рукоятки джойстика, связанным с кинематикой человеческой руки и вопросами эргономики, при существенно большем требуемом диапазоне перемещений манипулятора. В связи с этим данный режим допустим при работе в ограниченных зонах пространства путем перехода из режима УВСК в режим УП и по окончании выполнения операций – обратно.

Для обеспечения решения полного комплекса транспортных задач (выход рабочего инструмента в заданную точку зоны обслуживания манипулятора под заданным углом) исполнительный орган манипулятора должен иметь 6 степеней подвижности [3] (кинематических сочленений вращательного или поступательного типа). Соответственно, система управления манипулятора должна обеспечивать управление этими сочленениями через соответствующие приводы и управление рабочим инструментом, в частности схватом манипулятора [10–12].

Учитывая эргономику рабочего места оператора герметичных камер и возможности человека оперировать двумя руками, был разработан манипулятор модели МР-48 [13], система управления которого реализована на двух джойстиках с тремя и четырьмя степенями подвижности соответственно. Манипулятор успешно прошел испытания в реальных условиях эксплуатации.

В процессе опытной эксплуатации МР-48 был сформулирован круг задач, для решения которых требуется обеспечить управление всеми степенями подвижности и рабочим инструментом манипулятора одной рукой человека-оператора. Таковой, в частности, является задача управления внутрикамерным манипулятором, размещенным на подвижном основании (рис. 2).

Таким образом, в ряде применений многостепенных манипуляторов оптимальным (необходимым) является формирование оператором управляющих воздействий одной рукой. При этом необходимо обеспечение всех требуемых режимов управления (индивидуальное и групповое управление приводами степеней подвижности манипулятора, управление схватом манипулятора в декартовой системе координат и т. д.).

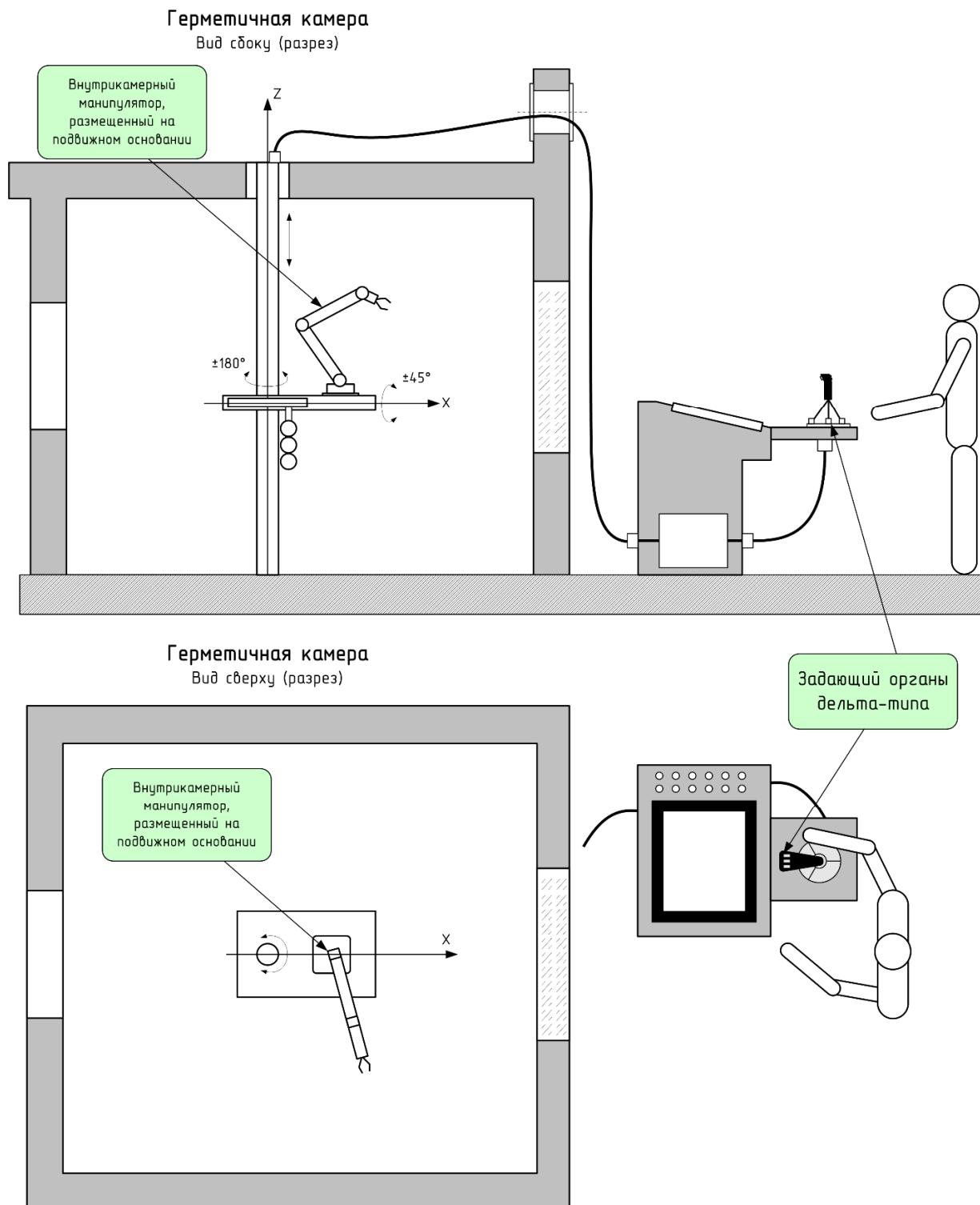


Рис. 2. Внутрикамерный манипулятор на подвижном основании
с дистанционным управлением от джойстиков
Fig. 2. Hotcell manipulator on movable base with joysticks distance control

Предлагается решение указанной задачи с помощью задающего органа, выполненного по кинематической схеме дельта-типа, внешний вид которого приведен на рис. 3.

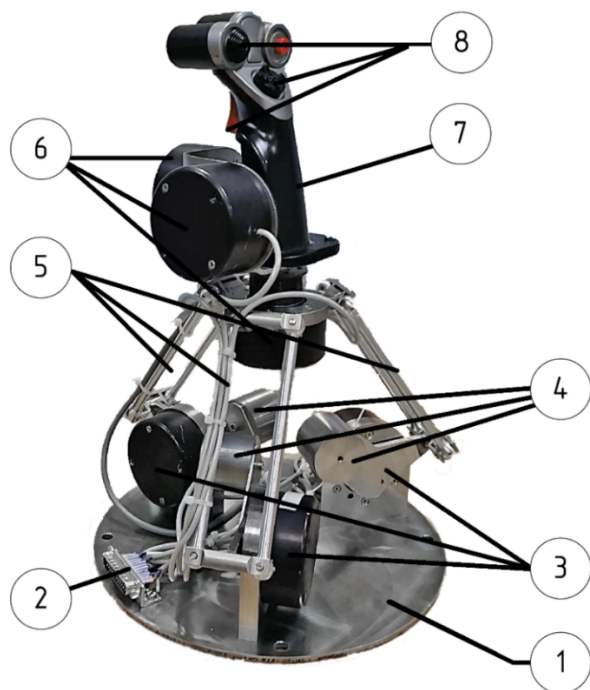


Рис. 3. Внешний вид многостепенного джойстика дельта-типа
Fig. 3. Structure and parts of delta-type joystick

На рис. 3 обозначены:
1 – неподвижное основание;
2 – выходной информационный разъем;
3 – шарнирные подвесы и датчики углового положения промежуточных тяг (рычагов);
4 – противовесы;
5 – основные тяги к верхней подвижной платформе;
6 – датчики углового положения рукоятки (ориентации рукоятки);
7 – управляющая рукоятка;
8 – дополнительные дискретные и пропорциональные каналы управления.

В предложенной кинематической схеме оператор имеет возможность независимого линейного перемещения рукоятки вдоль осей связанной с основанием декартовой системы координат $OXYZ$ и, независимо от линейного положения, ее ориентирования в полулирном подвесе на углы α, β, γ . Диапазоны линейного перемещения определяются конструкцией шарнирных подвесов и длинами тяг (поз. 3, 5, рис. 3), аналогичным образом конструкцией полулирного подвеса определяются диапазоны углов ориентации рукоятки.

Оператор пальцами кисти имеет возможность воздействия на дополнительные пропорциональные и дискретные каналы управления, размещенные непосредственно на рукоятке.

Выходной вектор состояния данного ЗО можно представить следующим образом:

$$\mathbf{O}_{\text{OUT}}(t) = \begin{pmatrix} (\alpha, \beta, \gamma)^T \\ (x, y, z)^T \\ \mathbf{O}_{\text{PC}} \\ \mathbf{O}_{\text{DC}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(q_\alpha, q_\beta, q_\gamma) \\ F_2(q_{j1}, q_{j2}, q_{j3}) \\ \mathbf{O}_{\text{PC}} \\ \mathbf{O}_{\text{DC}} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{O}_{\text{OUT}}(t)$ – выходной вектор состояния задающего органа;

\mathbf{O}_{PC} – вектор состояния дополнительных пропорциональных каналов управления, размещенных на рукоятке;

\mathbf{O}_{DC} – вектор состояния дополнительных дискретных каналов управления, размещенных на рукоятке;

α, β, γ – углы ориентации рукоятки;

x, y, z – координаты линейного положения рукоятки относительно основания;

$q_\alpha, q_\beta, q_\gamma$ – сигналы (информация) от датчиков углового положения рукоятки (поз. 6, рис. 3);

q_{j1}, q_{j2}, q_{j3} – сигналы (информация) от датчиков углового положения, расположенных на основании ЗО (поз. 3, рис. 3);

F_1, F_2 – отображения множеств информационных сигналов датчиков углового положения в векторы выходных координат ЗО.

Введем следующие обозначения элементов дельта-механизма (рис. 4):

$$L_1 = OA_1 = OA_2 = OA_3; L_2 = A_1B_1 = A_2B_2 = A_3B_3; L_3 = B_1D = B_2D = B_3D.$$

Задача определения линейного положения рукоятки джойстика в пространстве сводится к нахождению координаты точки D при заданных длинах звеньев L_1, L_2, L_3 и углах поворотов шарниров q_{j1}, q_{j2}, q_{j3} .

Используя метод трилатерации, сформируем алгоритм вычисления координаты точки D . Трехмерная проблема трилатерации представляет собой нахождение координат точки пересечения трех сфер. Пусть $B_1(x_1, y_1, z_1), B_2(x_2, y_2, z_2), B_3(x_3, y_3, z_3)$ – центры исходных сфер; $L_3 = B_1D = B_2D = B_3D$ – радиусы сфер; $D(x, y, z)$ – искомая точка. По известным длинам звеньев L_1, L_2, L_3 , измеренным углам шарниров q_{j1}, q_{j2}, q_{j3} и начальному условию, что основание $A_1A_2A_3$ является равносторонним треугольником, определим координаты центров сфер B_1, B_2, B_3 (формула (2), рис. 4, 5).

$$\begin{cases} x_1 = L_1 + L_2 \cos(q_{j1}); & y_1 = 0; & z_1 = L_2 \sin(q_{j1}); \\ x_2 = -(L_1 + L_2 \cos(q_{j2})) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right); & y_2 = (L_1 + L_2 \cos(q_{j2})) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right); & z_2 = L_2 \sin(q_{j2}); \\ x_3 = -(L_1 + L_2 \cos(q_{j3})) \sin\left(\frac{\pi}{6}\right); & y_3 = -(L_1 + L_2 \cos(q_{j3})) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right); & z_3 = L_2 \sin(q_{j3}). \end{cases} \quad (2)$$

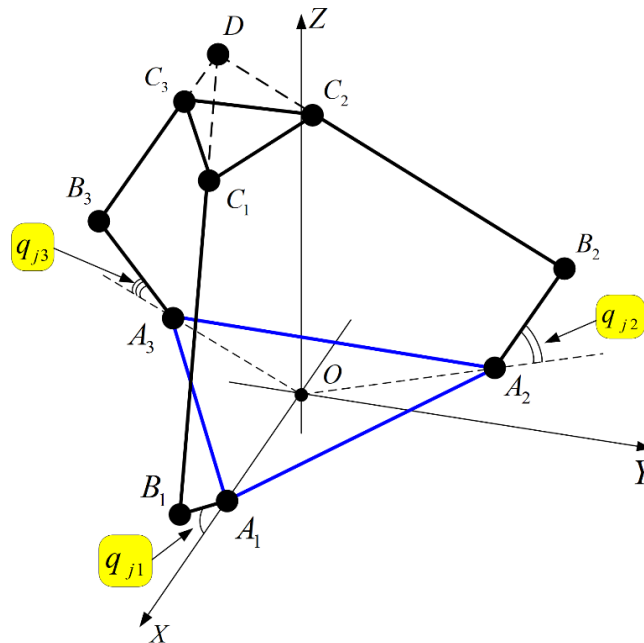


Рис. 4. Геометрическая модель многостепенного джойстика дельта-типа
Fig. 4. Geometric model of delta-type joystick

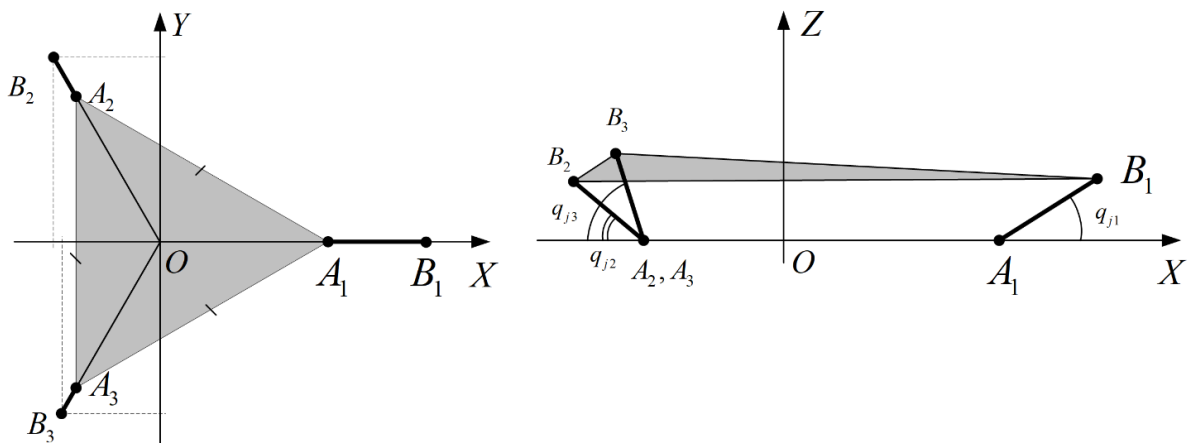


Рис. 5. Проекция точек A_i, B_i на плоскости XY, XZ
Fig. 5. Projections of points A_i, B_i to planes XY, XZ

Пользуясь тем, что каждая пара сфер пересекается по окружности, центр которой лежит на прямой, соединяющей центры сфер, и тем, что данная окружность лежит в плоскости, перпендикулярной данной прямой, можно решить задачу через линейную систему уравнений.

Найдём точку B_{12} – центр окружности, по которой пересекаются первые две сферы. Поскольку радиусы сфер равны, то точка $B_{12}\left(\frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2}, \frac{z_1+z_2}{2}\right)$ является серединой отрезка B_1B_2 .

Искомая точка D лежит в плоскости, проходящей через B_{12} и перпендикулярной $\overline{B_1B_2}$. Для неё выполняется уравнение данной плоскости

$$\left(x - \frac{x_1+x_2}{2}\right)(x_2-x_1) + \left(y - \frac{y_1+y_2}{2}\right)(y_2-y_1) + \left(z - \frac{z_1+z_2}{2}\right)(z_2-z_1) = 0 \quad (3)$$

или иначе

$$x(x_2-x_1) + y(y_2-y_1) + z(z_2-z_1) = \frac{1}{2}(x_2^2-x_1^2 + y_2^2-y_1^2 + z_2^2-z_1^2). \quad (4)$$

Аналогичное уравнение выводится для координат точки B_{13} – центра окружности и середины отрезка B_1B_3 :

$$x(x_3-x_1) + y(y_3-y_1) + z(z_3-z_1) = \frac{1}{2}(x_3^2-x_1^2 + y_3^2-y_1^2 + z_3^2-z_1^2). \quad (5)$$

Пересечение двух полученных плоскостей даёт прямую, перпендикулярную плоскости треугольника $B_1B_2B_3$. Пересечение данной прямой с плоскостью треугольника даёт точку P – основание перпендикуляра из точки D на плоскость треугольника. Дополнив систему уравнением плоскости треугольника, получим линейную систему уравнений для координат точки P .

Уравнение плоскости треугольника:

$$\begin{aligned} & [(y_3-y_1)(z_2-z_1) - (y_2-y_1)(z_3-z_1)](x-x_1) + \\ & + [(z_3-z_1)(x_2-x_1) - (z_2-z_1)(x_3-x_1)](y-y_1) + \\ & + [(x_3-x_1)(y_2-y_1) - (x_2-x_1)(y_3-y_1)](z-z_1) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Преобразуем уравнение (6):

$$\begin{aligned} & [(y_3-y_1)(z_2-z_1) - (y_2-y_1)(z_3-z_1)]x + [(z_3-z_1)(x_2-x_1) - (z_2-z_1)(x_3-x_1)]y + \\ & + [(x_3-x_1)(y_2-y_1) - (x_2-x_1)(y_3-y_1)]z = [(y_3-y_1)(z_2-z_1) - (y_2-y_1)(z_3-z_1)]x_1 + \\ & + [(z_3-z_1)(x_2-x_1) - (z_2-z_1)(x_3-x_1)]y_1 + [(x_3-x_1)(y_2-y_1) - (x_2-x_1)(y_3-y_1)]z_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Координаты точки P находятся как решение системы трех линейных уравнений (4), (5), (7) с тремя неизвестными x, y, z . Данную систему можно представить в матричном виде $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$.

Введем обозначение:

$$\Delta a_{i1} = a_i - a_1, \quad a \in \{x, y, z\}, \quad i \in \{2, 3\}.$$

Тогда:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \Delta x_{21} & \Delta y_{21} & \Delta z_{21} \\ \Delta x_{31} & \Delta y_{31} & \Delta z_{31} \\ \Delta y_{31}\Delta z_{21} - \Delta y_{21}\Delta z_{31} & \Delta z_{31}\Delta x_{21} - \Delta z_{21}\Delta x_{31} & \Delta x_{31}\Delta y_{21} - \Delta x_{21}\Delta y_{31} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{X} = (x \ y \ z)^T;$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(x_2^2-x_1^2 + y_2^2-y_1^2 + z_2^2-z_1^2) \\ \frac{1}{2}(x_3^2-x_1^2 + y_3^2-y_1^2 + z_3^2-z_1^2) \\ (\Delta y_{31}\Delta z_{21} - \Delta y_{21}\Delta z_{31}) + (\Delta z_{31}\Delta x_{21} - \Delta z_{21}\Delta x_{31}) + (\Delta x_{31}\Delta y_{21} - \Delta x_{21}\Delta y_{31}) \end{pmatrix}.$$

Обозначим найденные координаты точки P как x_0, y_0, z_0 . Тогда координаты точек пересечения трех сфер:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + k((y_3 - y_1)(z_2 - z_1) - (y_2 - y_1)(z_3 - z_1)); \\ y &= y_0 + k((z_3 - z_1)(x_2 - x_1) - (z_2 - z_1)(x_3 - x_1)); \\ z &= z_0 + k((x_3 - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1)). \end{aligned} \quad (8)$$

$$k = \pm \frac{\sqrt{L_3^2 - |PB_1|^2}}{2S_{B_1B_2B_3}}, \quad (9)$$

где $S_{B_1B_2B_3}$ – площадь треугольника $B_1B_2B_3$.

Одна из точек может быть отброшена, так как она имеет отрицательную координату по оси аппликат. Точка с положительной координатой z будет являться искомой точкой D .

Полученные координаты дают составляющую $(x, y, z)^T$ в векторе состояния ЗО (1). Ориентация рукоятки в пространстве (углы α, β, γ) вычисляется методом прямого измерения и преобразования сигналов $q_\alpha, q_\beta, q_\gamma$ датчиков углового положения, установленных в полулирином подвесе. В результате вычисленный полный вектор состояния ЗО (1) позволяет реализовать метод управления манипулятором (схватом манипулятора либо отдельными его степенями подвижности) по вектору скорости либо в позиционном режиме, оператор при этом осуществляет управление одной рукой. Дополнительные каналы управления (пропорциональные или дискретные), размещенные на рукоятке задающего органа, могут быть использованы для задания (переключения) специальных режимов движения манипулятора, управления положением и ориентацией подвижного основания, управления внутрикамерным технологическим оборудованием.

Заключение

Предложенный в статье способ управления манипулятором от задающего органа дельта-типа с результирующими тремя линейными и тремя угловыми выходными координатами в векторе состояния, а также дополнительными пропорциональными и дискретными каналами позволяют человеку-оператору осуществлять выполнение внутрикамерных транспортных и технологических операций более естественным для человека образом, что в целом приводит к снижению издержек времени, утомляемости, повышению точности управления.

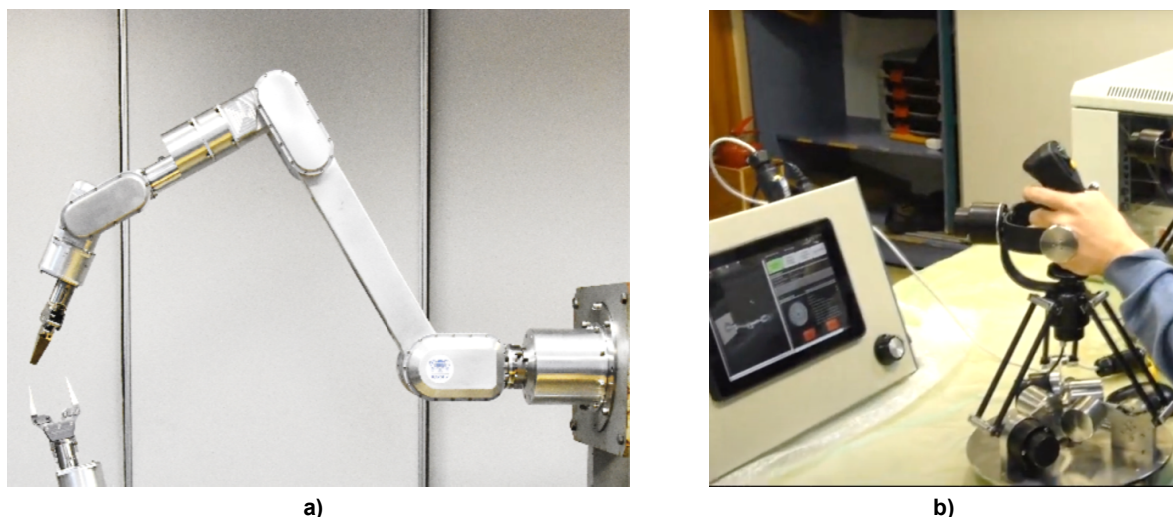


Рис. 6. Манипуляционная система MR-64 (a) и ее задающий орган (b)
Fig. 6 Manipulator system MR-64 (a) and its control delta-joystick (b)

Алгоритм реализован в составе опытного образца манипуляционной системы MR-64 (рис. 6а) [14]. В состав манипуляционной системы входит исполнительный орган, пульт управления с сен-

сорным экраном, задающий орган дельта-типа. В ходе отладки, испытаний и опытной эксплуатации манипуляционной системы подтверждены предложенные алгоритмические решения и возможность эффективного (с точки зрения затрат времени и точности) выполнения операций одной рукой (рис. 6b).

С целью анализа эффективности действий оператора при выполнении технологических операций, соответствия характера движений манипулятора оптимальным траекториям, а также дальнейшей настройки и адаптации системы человеко-машинного интерфейса и системы управления в целом данные о векторах состояния манипуляторов сдвоенной манипуляционной системы, векторах состояния задающих органов передаются в базу данных системы тренажерного обучения и анализа действий операторов, реализованной на основе фреймворка ROS [15], структура которой описана в [16, 17].

Список литературы

1. Sturges R.H. Practical field robotics: A systems approach. Wiley, 2015. 479 p. DOI: 10.1002/9781118941171, ISBN 978-1-118-94114-0.
2. Field and Service Robotics: Results of the 8th International Conference / K. Yoshida, S. Tadokoro (Eds.). Springer, 2014. (Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol. 92). DOI: 10.1007/978-3-642-40686-7, ISBN 978-3-642-40685-0.
3. Юревич Е.И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 416 с. ISBN 5-941574-73-8.
4. Dynamic and interactive generation of object handling behaviors by a small humanoid robot using a dynamic neural network model / M. Ito, K. Noda, Y. Hoshino, J. Tani // Neural Networks. 2006. Vol. 19 (3). P. 323–337. DOI: 10.1016/j.neunet.2006.02.007
5. Human-Robot Interaction / N. Sarkar (Ed.). Vienna, Austria: I-Tech Education and Publishing, 2007. DOI: 10.5772/51, ISBN 978-3-902613-13-4.
6. Brain-controlled interfaces: Movement restoration with neural prosthetics / A.B. Schwartz, X.T. Cui, D.J. Weber, D.W. Moran // Neuron. 2006. Vol. 52, iss. 1. P. 205–220. DOI: 10.1016/j.neuron.2006.09.019
7. Nagata F., Watanabe K. Controller design for industrial robots and machine tools: Applications to manufacturing processes. Woodhead Publishing Limited, 2013. 357 p. ISBN 978-0-85709-462-9.
8. Montesano L., Minguez J., Montano L. Modeling dynamic scenarios for local sensor-based motion planning // Autonomous Robots. 2008. Vol. 25, no. 3. P. 231–251. DOI: 10.1007/s10514-008-9092-9
9. Springer Handbook of Robotics / B. Siciliano, O. Khatib (Eds.). Springer, 2016. 2155 p. ISBN 978-3319325507.
10. Marghitu D.B. Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB. Springer, 2009. 479 p. DOI: 10.1007/978-1-84800-391-0, ISBN 978-1-84800-390-3.
11. New advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics. Proceedings of The Joint International Conference of the XII International Conference on Mechanisms and Mechanical Transmissions (MTM) and the XXIII International Conference on Robotics (Robotics '16). Springer International Publishing, 2016. 472 p. DOI: 10.1007/978-3-319-45450-4, ISBN 978-3-319-45449-8.
12. MT 200 TAO Electrically Assisted, Computer-Aided Master-Slave Manipulator. URL: <https://www.lacalhe.com/int/applications-products/remote-manipulation/mt200-tao/> (дата обращения: 30.06.2022).
13. Патент RU 172431 U1, МПК B25J 1/00, B25J 9/18, B25J 13/02. Манипулятор МР-48 для атомной промышленности / И.В. Войнов, И.Ф. Круглов, Б.А. Морозов и др. 2016.
14. Патент RU 209596 U1, МПК B25J 21/00. Манипуляционная система для герметичных камер / И.В. Войнов, И.Ф. Круглов, Б.А. Морозов, М.В. Носиков. 2021.
15. Newman W.S. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. CRC Press, 2018. 531 p. ISBN 978-1498777827.
16. Nosikov M.V. Architecture of Human-controlled Arm Manipulator Operator Training System // Proceedings of the Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570118

17. Носиков М.В. Архитектура тренажерной системы подготовки операторов радиационно-стойких манипуляторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 2. С. 38–54. DOI: 10.14529/ctcr190204

References

1. Sturges R.H. *Practical field robotics: A systems approach*. Wiley; 2015. 479 p. ISBN 978-1-118-94114-0. DOI: 10.1002/9781118941171
2. Yoshida K., Tadokoro S. (Eds.). *Field and Service Robotics: Results of the 8th International Conference* (Springer Tracts in Advanced Robotics. Vol. 92). Springer; 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-40686-7, ISBN: 978-3-642-40685-0.
3. Yurevich E.I. *Osnovy robototekhniki* [Robotics basics]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2005. 368 p. (In Russ.). ISBN 5-941574-73-8.
4. Ito M., Noda K., Hoshino Y., Tani J. Dynamic and interactive generation of object handling behaviors by a small humanoid robot using a dynamic neural network model. *Neural Networks*. 2006;19(3):323–337. DOI: 10.1016/j.neunet.2006.02.007
5. Sarkar N. *Human-Robot Interaction*. Vienna, Austria: I-Tech Education and Publishing, 2007. DOI: 10.5772/51, ISBN 978-3-902613-13-4.
6. Schwartz A.B., Cui X.T., Weber D.J., Moran D.W. Brain-controlled interfaces: Movement restoration with neural prosthetics. *Neuron*. 2006;52(1):205–220. DOI: 10.1016/j.neuron.2006.09.019
7. Nagata F., Watanabe K. *Controller design for industrial robots and machine tools: Applications to manufacturing processes*. Woodhead Publishing Limited, 2013. 357 p. ISBN 978-0-85709-462-9.
8. Montesano L., Minguez J., Montano L. Modeling dynamic scenarios for local sensor-based motion planning. *Autonomous Robots*. 2008;25(3):231–251. DOI: 10.1007/s10514-008-9092-9
9. Siciliano B., Khatib O. (Eds.). *Springer Handbook of Robotics*. Springer; 2016. 2155 p. ISBN 978-3319325507.
10. Marghitu D.B. *Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB*. Springer; 2009. 479 p. DOI: 10.1007/978-1-84800-391-0, ISBN 978-1-84800-390-3.
11. New advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics. Proceedings of The Joint International Conference of the XII International Conference on Mechanisms and Mechanical Transmissions (MTM) and the XXIII International Conference on Robotics (Robotics '16). Springer International Publishing; 2016. 472 p. DOI: 10.1007/978-3-319-45450-4, ISBN 978-3-319-45449-8.
12. MT 200 TAO Electrically Assisted, Computer-Aided Master-Slave Manipulator. Available at: <https://www.lacalhe.com/int/applications-products/remote-manipulation/mt200-tao/> (accessed 30.06.2022).
13. Voynov I.V., Kruglov I.F., Morozov B.A., Kazantsev A.M., Nosikov M.V. *Manipulyator MR-48 dlya atomnoy promyshlennosti* [Manipulator MR-48 for nuclear industry]. Patent RU 172431 U1, 2016. (In Russ.)
14. Voynov I.V., Kruglov I.F., Morozov B.A., Nosikov M.V. *Manipulyatsionnaya sistema dlya germetichnykh kamer* [Manipulator system for sealed chambers]. Patent RU 209596 U1, 2021. (In Russ.)
15. Newman W.S. *A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS*. CRC Press; 2018. 531 p. ISBN 978-1498777827.
16. Nosikov M.V. Architecture of Human-controlled Arm Manipulator Operator Training System. In: Proceedings of the Global Smart Industry Conference (GloSIC). Chelyabinsk; 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570118
17. Nosikov M.V. The Architecture of Human-Controlled Arm Manipulator Operator Training System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2019;19(2):38–53. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190204

Информация об авторах

Носиков Максим Владимирович, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматике, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; nosikovmv@susu.ru.

Войнов Игорь Вячеславович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматике, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; voinoviv@susu.ru.

Морозов Борис Александрович, заведующий лабораторией робототехники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; morozovba@susu.ru.

Information about the authors

Maxim V. Nosikov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Automation Department, South Ural State University, Miass, Russia; nosikovmv@susu.ru.

Igor V. Voinov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Automation Department, South Ural State University, Miass, Russia; voinoviv@susu.ru.

Boris A. Morozov, Head of Robotics Laboratory, South Ural State University, Miass, Russia; morozovba@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 12.04.2022

The article was submitted 12.04.2022

ПОСТРОЕНИЕ РЕЙТИНГОВОЙ ОЦЕНКИ НА ОСНОВЕ ПОТОКОВОЙ МОДЕЛИ

С.А. Баркалов, sbarkalov@nm.ru

П.Н. Курочка, kpn55@rambler.ru

Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Цель исследования. Рассматривается задача определения рейтинговой оценки эксперта. При этом рейтинг будет определяться по результатам прошедшего обсуждения, то есть оценка i -го эксперта будет зависеть от той оценки, которую он получил по результатам данного обсуждения. Взаимоотношения в таком сообществе предлагается описывать с помощью графа взаимодействия. Показывается, что этот граф взаимодействия будет описываться матрицей Кирхгофа, имеющей определитель, равный нулю, и ранг на единицу меньше, чем размерность матрицы Кирхгофа. **Материалы и методы.** Таким образом, для решения поставленной задачи требуется найти решение однородной системы уравнений, матрица которой является матрицей Кирхгофа. Предлагается использовать алгоритм, который можно применить без многочисленных промежуточных преобразований, но при этом требуется провести операцию обращения исходной матрицы достаточно большой размерности. Это представляется достаточно трудоемкой операцией. Именно поэтому предлагается воспользоваться методом регуляризации Тихонова, позволяющим заменить решение исходной задачи на задачу минимизации функционала Тихонова. Такая замена приводит к задаче, трудоемкость решения которой также является значительной. Поэтому, учитывая свойство решаемой задачи, когда необходимо получить не абсолютное значение рейтинга, а систему рейтингов, отражающих относительную важность каждого эксперта по отношению к друг другу, предлагается приближенный алгоритм решения задачи, когда значение регуляризирующего параметра подбирается в ходе итераций. **Результаты.** Рассмотрен пример для случая пяти экспертов, матрица взаимодействия участников этого экспертного сообщества задана в форме таблицы. Приведенный алгоритм позволяет оценить компетентность экспертов достаточно точно, причем именно для конкретной ситуации с учетом мнения всего экспертного сообщества. Далее рассмотрен случай, когда имеются сведения о начальном рейтинге каждого из экспертов. Ориентируясь на тот факт, что для решения задачи необходимо найти не абсолютное значение рейтинга каждого эксперта, а только соотношение между рейтингами, приходим к алгоритму, позволяющему перейти от однородной системы уравнений к неоднородной, минуя тем самым необходимость обращения матрицы большой размерности. **Заключение.** Рассмотрен алгоритм решения задачи построения рейтинговой оценки для двух случаев: начальные оценки компетенции специалистов отсутствуют и случай, когда имеются сведения о начальном рейтинге каждого из экспертов.

Ключевые слова: граф взаимодействия, матрица Кирхгофа, потенциал вершины, потоковая модель, уравнение баланса потока, метод регуляризации Тихонова, параметр регуляризации

Для цитирования: Баркалов С.А., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Построение рейтинговой оценки на основе потоковой модели // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 31–41. DOI: 10.14529/ctcr230103

DETERMINING A RATING SCORE BASED ON A STREAMING MODEL

S.A. Barkalov, sbarkalov@nm.ru
P.N. Kurochka, kpn55@rambler.ru
E.A. Serebryakova, sea-parish@mail.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Purpose of the study. The problem of determining the rating of an expert is considered. In this case, the rating will be determined by the results of the last discussion, that is, the assessment of the i -th expert will depend on the assessment that he received as a result of this discussion. Relationships in such a community are proposed to be described using an interaction graph. It is shown that this interaction graph will be described by the Kirchhoff matrix, which has a determinant equal to zero and a rank one less than the dimension of the Kirchhoff matrix. **Materials and methods.** Thus, to solve the problem posed, it is required to find a solution to a homogeneous system of equations whose matrix is the Kirchhoff matrix. It is proposed to use an algorithm that can be applied without numerous intermediate transformations, but it is required to carry out the operation of inverting the original matrix of a sufficiently large dimension. This appears to be a rather labor intensive operation. That is why it is proposed to use the Tikhonov regularization method, which allows replacing the solution of the original problem with the problem of minimizing the Tikhonov functional. Such a replacement leads to the problem of the complexity of the solution of which is also significant. Therefore, taking into account the property of the problem being solved, when it is necessary to obtain not the absolute value of the rating, but a system of ratings that reflect the relative importance of each expert in relation to each other, an approximate algorithm for solving the problem is proposed when the value of the regularizing parameter is selected during iterations. **Results.** An example is considered for the case of five experts, the matrix of interaction between the participants of this expert community is given in the form of a table. The above algorithm makes it possible to assess the competence of experts quite accurately and precisely for a specific situation, taking into account the opinion of the entire expert community. Next, we consider the case when there is information about the initial rating of each of the experts. Focusing on the fact that in order to solve the problem it is necessary to find not the absolute value of the rating of each expert, but only the ratio between the ratings, we arrive at an algorithm that allows us to move from a homogeneous system of equations to a heterogeneous one, thereby bypassing the need to invert a large-dimensional matrix. **Conclusion.** An algorithm for solving the problem of constructing a rating estimate for two cases is considered: there are no initial estimates of the competence of specialists and the case when there is information about the initial rating of each of the experts.

Keywords: interaction graph, Kirchhoff matrix, vertex potential, flow model, flow balance equation, Tikhonov regularization method, regularization parameter

For citation: Barkalov S.A., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Determining a rating score based on a streaming model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1): 31–41. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230103

В ходе моделирования социально-экономических явлений достаточно часто встает необходимость использования трудноформализуемых задач, происхождение которых объясняется наличием в структуре задач информации качественного характера. Самым простым способом формализации таких задач является оцифровка качественной информации, то есть привязка к цифровой шкале. Для этой цели используется, как правило, метод экспертного опроса, который имеет высокую степень субъективности.

Повышение объективности экспертных методов может быть осуществлено при помощи формирования рейтинга привлекаемых экспертов. Но данный подход наталкивается на серьезную трудность, заключающуюся в оценке компетентности каждого эксперта. Вполне понятно, что привлекаемые специалисты должны иметь достаточно высокую компетентность, но возникает естественный вопрос об оценке этой компетентности. Как правило, в этом случае учитывают качество экспертиз, проведенных каждым конкретным экспертом. Но это означает, что должна вестись соответствующая база данных о проведенных экспертизах, в которой учитываются экс-

пертизы и в которых участвовал конкретный эксперт. Вот на основе этих результатов и можно формировать рейтинг каждого эксперта. Это достаточно трудоемкое и затратное мероприятие. Причем в этом случае очень тяжело обеспечить сопоставимость экспертиз, в которых участвовали эксперты. Действительно, есть экспертизы достаточно простые, а есть очень сложные. При этом возникает уже проблема оценки такой сложности и формирования базы данных, которая содержала бы сопоставимые данные. Ко всему этому добавляется еще и то обстоятельство, что на сегодняшний день отсутствуют приемлемые алгоритмы, позволяющие построить адекватную оценку эксперта при таком подходе, хотя и имеются случаи удачно реализованных баз данных. В качестве примера можно привести рейтинг спортсменов-теннисистов и шахматистов. В то же время данный пример дает представление о сложности такой задачи и ее затратности.

Более приемлемым, на наш взгляд, является применение методов, основанных на мнении всего экспертного сообщества, привлекаемого для решения поставленной задачи, то есть необходимо учесть мнение каждого члена экспертного сообщества о других участниках. В основу таких методов должен быть положен простейший принцип: оценка, даваемая более авторитетным экспертом, должна быть более значима при всех прочих равных условиях. Теперь возникает вопрос о том, как определить авторитетность каждого участника экспертного опроса.

Здесь возникает две возможности. Первая – экспертное сообщество имеет устойчивый состав в течение достаточно длительного времени и репутация каждого из его членов складывается на основе всей предыстории взаимодействия всех экспертов. Примером может являться научно-технический или диссертационный совет. И второе – экспертное сообщество непостоянно и каждое совещание может иметь совершенно иной состав. Репутация экспертов формируется только в ходе этого собрания и на все остальные не распространяется, хотя возможны варианты и накопления сведений по каждому из участников таких временных сообществ. Примером могут служить различного рода сетевые сообщества [1–3].

В данном случае будем рассматривать устойчивое сообщество, то есть экспертное сообщество будет иметь устойчивый состав и рейтинг каждого участника будет изменяться от собрания к собранию. Ярким примером такого сообщества может выступать научно-технический совет предприятия. В ходе функционирования такого образования у его участников формируется мнение о каждом из членов. Это мнение, выраженное в цифровой форме, и может быть принято за уровень компетентности каждого из участников данного совета.

Это дает возможность представить схему взаимодействия членов экспертной группы в виде связного графа, в котором любая произвольная вершина графа связана с любой другой вершиной этого же графа хотя бы одним путем [4–6]. Дальнейшее функционирование всей системы может быть представлено как функционирование электрической цепи. В этом случае оценки, которыми будут обмениваться члены экспертного сообщества, можно представить, как силу тока по соответствующей дуге, а каждая вершина графа будет иметь определенный потенциал. Именно величину этого потенциала и можно принять за значимость эксперта, соответствующую этой вершине графа. Если перейти от электрической аналогии к более привычным терминам теории графов, то получаем потоковую модель. В этом случае каждый эксперт представляет собой вершину графа, а дуги показывают связь между экспертами. Так, дуга (i, j) показывает, что i -й эксперт поставил оценку j -му, а вес дуги a_{ij} – величину этой оценки. Причем величина этой оценки будет зависеть от рейтинга эксперта, ее поставившего с учетом текущего опроса.

Таким образом, система взаимодействия участников экспертного сообщества моделируется матрицей смежности графа [5, 7, 8]. По логике построения исходный граф не будет иметь петель: действительно, ведь не может же эксперт оценивать сам себя, выставляя себе оценки. Хотя, строго говоря, вариант учета самооценки эксперта также может рассматриваться, но это уже выходит за рамки рассматриваемой задачи. В отсутствие самооценки экспертов матрица смежности будет содержать на главной диагонали только нули, то есть $a_{ii} = 0$.

Для решения поставленной задачи необходимо определить потенциалы каждой вершины графа взаимодействия членов экспертной группы. Для дальнейшего решения введем следующие обозначения: q_i – потенциал i -й вершины графа; φ_{ij} – поток по дуге (i, j) . Тогда уравнение сохранения потока в графе будет иметь следующий вид:

$$\sum \varphi_{ij} - \sum \varphi_{ji} = \Delta \varphi_i, \quad (1)$$

где $\Delta \varphi_i$ – величина начального потока в вершине i .

Как и в электрических цепях, величина потока по дуге будет зависеть от величины потенциала узлов, соединенных дугой (i, j) , значения которых пока остаются неизвестными.

Для того чтобы ввести в уравнение баланса потока в качестве неизвестных потенциалы вершин, необходимо использовать дополнительное соотношение между рассматриваемыми величинами, то есть величиной потока φ_{ij} , потенциалом вершины q_i и пропускной способностью дуги c_{ij} . Принимая во внимание закон Ома для электрических цепей, для этой цели вводят соотношение вида

$$\varphi_{ij} = c_{ij} \cdot q_j. \quad (2)$$

В этом случае соотношение (1) будет представлено в виде

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} q_j - \sum_{j=1}^n c_{ji} q_i = \Delta\varphi_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

В качестве величин $\Delta\varphi_i$ скорее всего в данной задаче будет вполне логичным принимать начальный рейтинг участников сообщества, если, конечно же, он имеется. В том случае, когда сообщество только организуется и никаких сведений о рейтинге участников не имеется, полагают, что $\Delta\varphi_i = 0$, то есть имеет место следующая однородная система уравнений:

$$\sum_{j=1}^n c_{ij} q_j - \sum_{j=1}^n c_{ji} q_i = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Если расписать систему уравнений (4) в развернутом виде, то становится ясным, что матрица этой системы состоит из матрицы смежности исходного графа взаимодействия участников сообщества, все компоненты которой взяты с обратным знаком, на главной диагонали которой будут стоять степени вершин. Отсюда будет справедливым следующее утверждение [9–11]:

Утверждение 1. Матрица балансового уравнения потока при описании взаимодействия участников экспертной системы является лапласианом, а следовательно, имеет определитель, равный нулю. Ранг r такой матрицы будет равен $r = n - 1$.

Доказательство этого утверждения следует из построения самой матрицы: первое слагаемое в выражении (4) дает степень произвольной вершины i , а второе определяет, с какими вершинами связана вершина i , то есть представляет компоненты матрицы смежности.

Утверждение 2. Задача, в которой отсутствуют сведения о начальном рейтинге участников экспертной системы, сводится к решению однородной алгебраической системы линейных уравнений.

Доказательство этого утверждения следует из следующих соображений. Действительно, возможный вектор правых частей $\Delta\varphi_i = 0$, и мы приходим к выражению (4), матрица левых частей которого согласно утверждению 1 будет иметь определитель, равный нулю. Таким образом, в этом случае выражение (4), позволяющее определить потенциалы каждой вершины графа взаимодействия членов экспертной группы, будет иметь решение.

При этом будет справедливо следующее следствие.

Следствие. Так как матрица, описывающая взаимодействие участников экспертного сообщества, представляет собой лапласиан с рангом, равным $r = n - 1$, то решение соответствующей однородной системы уравнений (4) будет определяться с точностью до одной постоянной.

Данное следствие полностью согласуется с теорией электростатического поля, когда потенциалы зарядов определяются с точностью до постоянной, за которую обычно принимается потенциал бесконечно удаленной точки. Совершенно аналогично потенциалы вершин графа, описывающего взаимодействие между участниками экспертного сообщества, будут выражаться через потенциал одной из вершин, величина которого принимается равной произвольному числу, например, единице. Выбор такой вершины и величины ее потенциала осуществляется произвольно. Это означает, что решение задачи заключается в нахождении не абсолютных значений искомого параметра, а только соотношений между этими величинами.

И здесь возникает проблема решения однородной системы уравнений большой размерности. К сожалению, имеющиеся алгоритмы предполагают большой объем аналитических преобразований, которые вполне являются терпимыми при решении систем небольшой размерности. Но вот решение систем размерностью в несколько десятков уравнений вызывает некоторые затруднения вычислительного характера.

Для решения поставленной задачи в [5, 12–14] был предложен следующий алгоритм.

Предварительный шаг. В матрице (4), описывающей взаимодействие участников экспертного сообщества, заменяем первую строку строкой вида: $(1, 0, \dots, 0)$. Эту операцию можно провести не обязательно с первой строкой, а с любой другой, например, с k -й. В этом случае в k -й строке будут везде стоять нули и только в k -м столбце будет стоять произвольное число, которое может равняться и единице.

Шаг 1. Для сформированной матрицы находим обратную.

Шаг 2. Вычисляем определитель полученной обратной матрицы C^{-1} для матрицы Кирхгофа. В данном случае для проверки можно использовать свойство определителей прямой и обратной матриц.

Шаг 3. Необходимо разделить значения обратной матрицы, находящиеся в первой колонке на определитель обратной матрицы. Компоненты полученного вектора и будут составлять потенциалы вершин графа. То есть

$$q_i = \frac{c_{i1}}{\det(C^{-1})},$$

где c_{i1} – значения первого столбца обратной матрицы.

Окончательный итог может быть записан в следующем виде: потенциал каждой из вершин будет определяться значениями, представленными во второй колонке.

Рассмотрим пример для случая пяти экспертов, матрица взаимодействия участников экспертного сообщества задана в табл. 1. Сведения о начальном рейтинге экспертов отсутствуют. Необходимо определить рейтинг каждого эксперта, используя сведения об оценке экспертов друг другом.

Таблица 1
Матрица взаимодействия экспертов
Table 1
Expert Interaction Matrix

	I	II	III	IV	V
I	0	2	1	4	2
II	1	0	2	4	3
III	2	1	0	1	2
IV	4	2	3	0	1
V	3	1	4	3	0

Из матрицы взаимодействия достаточно просто получить матрицу Кирхгофа: для этого необходимо построить матрицу степеней вершин и воспользоваться соотношением

$$K = D - C. \tag{5}$$

где K – матрица Кирхгофа; D – матрица степеней вершин; C – матрица смежности.

Получаем в окончательном виде табл. 2.

Таблица 2
Матрица Кирхгофа
Table 2
Kirchhoff Matrix

	I	II	III	IV	V
I	10	-2	-1	-4	-2
II	-1	6	-2	-4	-3
III	-2	-1	10	-1	-2
IV	-4	-2	-3	12	-1
V	-3	-1	-4	-3	8

Расчет показывает, что матрица Кирхгофа будет приблизительно равна нулю: $\det(K) = 7 \cdot 10^{-12}$.

Преобразуем матрицу Кирхгофа согласно приведенному алгоритму, заменив первую строку (строка может быть в принципе любой, просто замена первой строки удобнее) на строку $\{1; 0; 0; 0; 0\}$. Определитель преобразованной матрицы Киргофа K^* будет равен $\det(K^*) = 2958$.

Нахождение обратной матрицы от K^* приводит к следующей матрице (табл. 3).

Обратная матрица

Таблица 3

Inverse matrix

Table 3

	I	II	III	IV	V
I	1	-3,469E-18	-3,1225E-17	-6,938E-18	-2,7756E-17
II	1,620351589	0,266396214	0,158553076	0,141311697	0,157200811
III	0,70250169	0,049357674	0,14739689	0,043948614	0,060851927
IV	0,884043272	0,063556457	0,073360379	0,125084517	0,057809331
V	1,260311021	0,081812035	0,121027721	0,086544963	0,196754564

Определитель обратной матрицы будет равен $\det(K^{*-1}) = 0,000338$.

Разделив первый столбец обратной матрицы на величину определителя, получим следующие значения рейтинга экспертов:

I эксперт – 2958; II эксперт – 4793; III эксперт – 2078; IV эксперт – 2615; V эксперт – 3728.

Но учитывая, что полученные значения потенциалов достаточно значительные, то можно упростить данные выражения, приведя их к одному основанию. В качестве такого основания выбирается самый маленький потенциал, и все остальные значения делятся на эту величину. При этом получим

I эксперт – 1,423; II эксперт – 2,307; III эксперт – 1; IV эксперт – 1,258; V эксперт – 1,794.

Такая операция вполне правомерна, так как нам не надо знать точное абсолютное значение оценки, полученной экспертом. Важно, чтобы при преобразованиях сохранилась пропорция между оценками экспертов, то есть чтобы мнение второго эксперта было в 2,307 раза значимее третьего и т. д.

Таким образом, по значению потенциала, который в данном случае будет характеризовать значимость каждого эксперта, можно сказать, что в порядке убывания авторитетности экспертов можно расположить следующим образом:

II(4793 / 2,307) → V(3728 / 1,794) → I(2958 / 1,423) → IV(2615 / 1,258) → III(2078 / 1).

Таким образом, компетентность экспертов можно оценить достаточно точно, причем именно для конкретной ситуации с учетом мнения всего экспертного сообщества.

Теперь рассмотрим случай, когда имеются сведения о начальном рейтинге каждого из экспертов. Первым побуждением будет являться переход от однородной системы уравнений (4) к неоднородной системе уравнений вида (3), где в качестве правых частей уравнения берется первоначальная рейтинговая оценка экспертов. Казалось бы, это позволяет перейти к неоднородной системе уравнений с вырожденной матрицей. Но если вспомнить основные свойства линейной системы уравнений, то можно сформулировать следующее утверждение.

Утверждение 3. Использование неоднородной системы уравнений вида (3), где в качестве правых частей уравнения принимается первоначальный рейтинг каждого эксперта, не изменяет пропорций между рейтинговыми оценками экспертов.

Справедливость утверждения следует из свойств линейных систем уравнений, согласно которым изменение вектора правых частей системы осуществляет только параллельный перенос в заданной системе координат. Это означает, что соотношения между оценками экспертов не изменяется, а варьироваться будут только их абсолютные значения.

Это утверждение свидетельствует о том, что наличие правых частей в уравнении, описывающем взаимодействие экспертов, не будет влиять на место эксперта в списке компетентности экспертов, то есть если мнение i -го эксперта было важнее j -го в три раза, то и при любых значениях правых частей это соотношение сохранится.

Это позволяет нам сформулировать следующее утверждение.

Утверждение 4. При решении задачи определения рейтинговой оценки экспертов можно использовать неоднородную систему уравнений, приняв в качестве правых частей системы уравнений произвольные значения.

Справедливость данного утверждения вытекает из того факта, что для решения задачи необходимо найти не абсолютное значение рейтинга каждого эксперта, а только соотношение между рейтингами.

Возникает закономерный вопрос о том, что, собственно говоря, нам это дает? А дает это возможность перехода от однородной системы уравнений к неоднородной. Как видно из сказанного выше, для решения однородной задачи необходимо осуществлять весьма трудоемкую задачу обращения матрицы большой размерности. Этого можно избежать, используя утверждение 4.

В этом случае получаем вырожденную неоднородную систему алгебраических уравнений, так как определитель матрицы будет равен нулю. Для решения таких систем уравнений предлагается использовать метод регуляризации Тихонова [8, 15]. Согласно этому методу осуществляем замену исходной вырожденной неоднородной системы уравнений на регуляризованную систему уравнений. Представим систему (3) в матричном виде

$$KQ = \Phi, \quad (6)$$

где Q – вектор, характеризующий компетентность экспертов; Φ – вектор правых частей системы уравнений (3), задается произвольно.

Данная система уравнений является вырожденной, так как имеет определитель, равный нулю. Для решения такой задачи используется метод регуляризации Тихонова, согласно которому исходная задача заменяется на выражение, в которое входит неизвестный пока параметр регуляризации. В этом случае система уравнений преобразуется к виду

$$(K + \lambda I)Q = \Phi, \quad (7)$$

где I – единичная матрица; λ – параметр регуляризации.

Для использования этого подхода необходимо только определиться со способами построения матрицы Кирхгофа K , вектора правых частей Φ и выборе параметра регуляризации λ .

Построение матрицы Кирхгофа для случая, когда начальные значения рейтингов экспертов отсутствуют, осуществляется на основе формулы (5). А в том случае, когда известны начальные рейтинги экспертов, построение осуществляется путем учета начального рейтинга при составлении матрицы смежности, то есть к текущей матрице смежности, сложившейся в данной задаче, прибавляются значения, характеризующие первоначальный рейтинг экспертов, полученный ранее, на предыдущих этапах решения. Таким образом, формирование матрицы Кирхгофа будет осуществляться по следующей формуле:

$$K = D - (C + Q^*), \quad (8)$$

где Q^* – вектор значений начального рейтинга экспертов.

Как уже выше упоминалось, значения свободных членов можно принимать произвольными, так как при решении важно сохранить не абсолютные значения рейтингов, а только соотношения между ними. А это будет обеспечено при любых значениях правых частей системы уравнений.

Согласно теореме Тихонова [15, 16], решение системы (7) эквивалентно минимизации функционала Тихонова, который можно записать в следующем виде:

$$F(Q, C, \Phi) = \|CQ - \Phi\|^2 + \lambda \|Q\|^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Классический метод решения данной задачи сводится к задаче безусловной оптимизации относительно неизвестных $Q^T = \{q_1, q_2, \dots, q_k, \dots, q_n\}$ и λ . Как мы видим, минимизация функционала (9) дает возможность определить и минимально возможное значение возмущающего параметра λ . Но данный способ достаточно трудоемкий, так как связан с необходимостью нахождения первых производных и решением системы алгебраических уравнений большой размерности. Поэтому предлагается алгоритм решения исходной задачи, основанный на идее последовательных приближений.

Предварительный шаг. Задаем значение регуляризирующего параметра λ и вектор правых частей $\Phi^T = \{\lambda, 0, \dots, 0\}$. Для удобства эти значения могут совпадать, но это не обязательно. Осуществляем численное решение задачи (7) при выбранных значениях регуляризирующего па-

параметра λ и находим соотношение между рейтингами экспертов. Для этого достаточно все рейтинги разделить или на минимальное значение рейтинга, или на максимальное.

Шаг 1. Изменяем значение регуляризирующего параметра λ и повторяем решение задачи (7). Находим соотношение между рейтингами экспертов.

Шаг 2. Осуществляем сравнение полученного решения с решением, полученным на предыдущем шаге. Но сравниваем не абсолютные значения рейтингов, а их соотношение друг с другом, то есть сравниваем, изменились ли пропорции между отдельными решениями. Если имеет место изменение, которое не может быть принято по условиям задачи, то возвращаются к шагу 1. Если же изменение будет являться приемлемым или же отсутствовать вообще, то алгоритм завершается.

Рассмотрим пример применения данного алгоритма. Необходимо определить рейтинговую оценку пяти экспертов, для которых с учетом их прошлых рейтингов матрица Кирхгофа, построенная по формуле (8), будет иметь следующий вид (табл. 4).

Таблица 4
Матрица Кирхгофа с учетом
первоначального рейтинга экспертов
Table 4
Kirchhoff matrix with initial expert ratings

	I	II	III	IV	V
I	13	-5	-7	-2	-3
II	-6	14	-1	-8	-4
III	-2	-3	12	-5	-2
IV	-1	-4	-3	20	-2
V	-4	-2	-1	-5	11

Зададимся значением регуляризирующего параметра $\lambda = 10$ и выполним решение исходной задачи. При этом матрица регуляризированной задачи будет отличаться от исходной только диагональными элементами, которые будут принимать значение $c_{ii}^p = c_{ii} + \lambda$, где $i = 1, 2, \dots, n$. Решения, полученные на каждом из шагов, будем заносить в табл. 5.

Анализируя табл. 5, можно прийти к заключению, что в данной задаче параметр регуляризации $\lambda = 0,01$ обеспечивает вполне приемлемую точность и максимальная ошибка в определении параметров составляет 2,13 %, что является вполне приемлемой точностью.

Таблица 5
Решения исходной задачи при различных значениях параметра регуляризации λ
Table 5
Solutions of the original problem for different values of the regularization parameter λ

Эксперты	Параметр λ									
	$\lambda = 10$		$\lambda = 1$		$\lambda = 0,1$		$\lambda = 0,01$		$\lambda = 0,001$	
	рейтинг	ошибка	рейтинг	ошибка	рейтинг	ошибка	рейтинг	ошибка	рейтинг	ошибка
I эксперт	8,74	–	2,91	200,34 %	2,4	21,25 %	2,35	2,13 %	2,34	1,00 %
II эксперт	2,96	–	2,32	27,59 %	2,24	3,57 %	2,23	0,45 %	2,23	0,00 %
III эксперт	1,63	–	1,66	1,81 %	1,67	0,60 %	1,67	0,00 %	1,67	0,00 %
IV эксперт	1	–	1	0,00 %	1	0,00 %	1	0,00 %	1	0,00 %
V эксперт	2,26	–	1,91	18,32 %	1,87	2,14 %	1,87	0,00 %	1,86	1,00 %

Надо сказать, что в задаче данного типа требования к точности решения достаточно щадящие. Объясняется это тем, что очень сложно сказать, чем же будет отличаться специалист, имеющий рейтинг 2,35 от специалиста, чья компетентность оценивается рейтингом 2,23. Скорее всего, это почти идентичные с точки зрения компетентности специалисты.

Таким образом, рассмотрена задача построения оценки компетенции специалистов на основе взаимного обсуждения некоторой актуальной проблемы. Оценка строится на основе результатов

текущего обсуждения: чем выше оценка эксперта, полученная в ходе этого обсуждения, тем более значимы его оценки, выставляемые им в ходе этой дискуссии.

Рассмотрен алгоритм решения данной задачи для двух случаев: начальные оценки компетенции специалистов отсутствуют и случай, когда имеются сведения о начальном рейтинге каждого из экспертов. Предлагается правило построения исходной матрицы взаимодействия для второго случая. Предложены два алгоритма для решения этих задач, один из которых основан на методе регуляризации Тихонова. Но вместо того, чтобы определять значение параметра регуляризации по результатам решения задачи безусловной оптимизации большой размерности, предлагается осуществить подбор такого значения, основанный на свойствах искомого решения. Это свойство заключается в том, что в результате решения важно получить не абсолютное значение рейтинга каждого специалиста, а систему оценок, в которой сохраняются пропорции между найденными оценками.

Аналогичная задача возникает и при изучении поведения человека в социальных сетях, когда интернет-сообщество формирует коллективное мнение участников некоего форума. В данном случае имеются алгоритмы, предложенные в [1, 4, 13, 17–21], но в этих алгоритмах, как правило, степень влияния каждого участника принимается достаточно произвольно, считается заданной.

Список литературы

1. Бреер В.В., Новиков Д.А., Рогаткин А.Д. Управление толпой: математические модели порогового коллективного поведения. М.: Ленанд, 2016. 168 с.
2. Бреер В.В. Теоретико-игровая модель неанонимного порогового конформного поведения // Управление большими системами. 2010. № 31. С. 162–176.
3. Курочка П.Н., Тельных В.Г. Оценка надежности организационных структур произвольного вида, задающихся планарным графом // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 3 (23). С. 134–141.
4. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети: Модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит, 2010. 228 с.
5. Ловас Л., Пламмер М. Прикладные задачи теории графов. Теория паросочетаний в математике, физике, химии: пер. с англ. М.: Мир, 1998. 653 с.
6. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Kalinina N.Yu., Polovinkina A.I. A model for forming the degree of influence of the counterparty when making managerial decisions in mechanical engineering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. P. 42045.
7. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. М.: Физматлит, 2004. 280 с.
8. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Потоки в сетях: пер. с англ. М.: Мир, 1966. 276 с.
9. Баркалов С.А., Курочка П.Н. Построение интегральной оценки организационно-технологических решений на основе сингулярных разложений // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 2 (64). С. 39–46.
10. Баркалов С.А., Курочка П.Н., Золотарев Д.Н. Формирование производственной программы строительного предприятия // Экономика и менеджмент систем управления. 2016. № 1.1 (19). С. 110–119.
11. Баркалов С.А., Курочка П.Н. Формирование управленческого решения на основе построения комплексных оценок // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2017. № 9. С. 67–76.
12. Вержбицкий В.М. Вычислительная линейная алгебра. М.: Высшая школа, 2009. 351 с.
13. Жилиякова Л.Ю., Кузнецов О.П. Теория ресурсных сетей. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2017. 283 с.
14. Model for designing ranked incentive systems in the implementation of projects in mechanical engineering / T.A. Averina, S.A. Barkalov, P.N. Kurochka et al. // Aip Conference Proceedings. Vol. 2402. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. P. 40016.
15. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 283 с.
16. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях: пер. с англ. М.: Мир, 1974. 520 с.

17. Герасименко Е.М. Метод потенциалов для определения заданного потока минимальной стоимости в нечетком динамическом графе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 4 (153). С. 83–89.
18. Механизмы управления / под ред. Д.А. Новикова. М.: URSS, 2010. 192 с. (Умное управление).
19. Новиков Д.А. Методология управления. М.: URSS, 2011. 128 с. (Умное управление).
20. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. 584 с.
21. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 446 с.

References

1. Breer V.V., Novikov D.A., Rogatkin A.D. *Upravleniye tolпой: matematicheskiye modeli porogovogo kollektivnogo povedeniya* [Crowd control: mathematical models of threshold collective behavior]. Moscow: Lenand; 2016. 168 p. (In Russ.)
2. Breer V.V. Game-theoretical model of non-anonymous threshold conformity behavior. *Management of large systems*. 2010;31:162–176. (In Russ.)
3. Kurochka P.N., Telnykh V.G. Evaluation of reliability of the organizational structures defined by planar graph. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arxitektura*. 2011;3(23):134–141. (In Russ.)
4. Gubanov D.A., Novikov D.A., Chkhartishvili A.G. *Sotsial'nyye seti: Modeli informatsionnogo vliyaniya, upravleniya i protivoborstva* [Social net-works: Models of information influence, management and confrontation]. Moscow: Fizmatlit; 2010. 228 p. (In Russ.)
5. Lovas L., Plummer M. *Prikladnyye zadachi teorii grafov. Teoriya parosochetaniy v matematike, fizike, khimii* [Applied problems of graph theory. Theory of matchings in mathematics, physics, chemistry]. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1998. 653 p. (In Russ.)
6. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Kalinina N.Yu., Polovinkina A.I. A model for forming the degree of influence of the counterparty when making managerial decisions in mechanical engineering. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*; 2020. P. 42045.
7. Il'in V.A., Poznyak E.G. *Lineynaya algebra* [Linear Algebra]. Moscow: Fizmatlit; 2004. 280 p. (In Russ.)
8. Ford L.R., Fulkerson D.R. *Potoki v setyakh* [Streams in networks]. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1966. 276 p. (In Russ.)
9. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Building integrated assessment organizational and technological solutions on the basis singular value decomposition. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2016;2(64):39–46. (In Russ.)
10. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Zolotarev D.N. Formation of the production program of construction enterprise. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2016;1.1(19):110–119. (In Russ.)
11. Barkalov S.A., Kurochka P.N. [Formation of a management decision based on the construction of complex assessments]. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2017;9:67–76. (In Russ.)
12. Verzhbitskiy V.M. *Vychislitel'naya lineynaya algebra* [Computational linear algebra]. Moscow: Vysshaya shkola; 2009. 351 p. (In Russ.)
13. Zhilyakova L.Yu., Kuznetsov O.P. *Teoriya resursnykh setey* [Theory of resource net-works]. Moscow: RIOR: INFRA-M; 2017. 283 p. (In Russ.)
14. Averina T.A., Barkalov S.A., Kurochka P.N., Kalinina N.Yu., Gorlitsyna O.A. Model for designing ranked incentive systems in the implementation of projects in mechanical engineering. In: *AIP Conference Proceedings. Vol. 2402. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. Melville, New York, United States of America: AIP Publishing; 2021. P. 40016.
15. Tikhonov A.H., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow: Nauka; 1974. 283 p. (In Russ.)
16. Hu T. *Tselochislennoye programmirovaniye i potoki v setyakh* [Integer programming and flows in networks]. Moscow: Mir; 1974. 520 p. (In Russ.)
17. Gerasimenko E.M. Potentials method for minimum cost flow defining in fuzzy dynamic graph. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2014;4(153):83–89. (In Russ.)

18. Novikov D.A. (Ed.). *Mekhanizmy upravleniya* [Control Mechanisms]. Moscow: URSS; 2010. 192 p. (Ser. "Smart Control"). (In Russ.)
19. Novikov D.A. *Metodologiya upravleniya* [Management methodology]. Moscow: URSS; 2011. 128 p. (Ser. "Smart Control"). (In Russ.)
20. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: MPSI; 2005. 584 p. (In Russ.)
21. Karpenko A.P. *Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2017. 446 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Баркалов Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой управления, декан факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sbarkalov@nm.ru.

Курочка Павел Николаевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; kpn55@rambler.ru.

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Information about the authors

Sergey A. Barkalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Management, Dean of the Faculty of Economics, Management and Information Technologies, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sbarkalov@nm.ru.

Pavel N. Kurochka, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; kpn55@rambler.ru.

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 10.12.2022

The article was submitted 10.12.2022

РАЗРАБОТКА И НАСТРОЙКА АЛГОРИТМА ПРОГРАММНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ В ПЕННОМ СЛОЕ КАЛИЙНОЙ ФЛОТОМАШИНЫ

А.В. Затонский¹, zxeon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

К.А. Федосеева², kristya_0103@mail.ru

Д.И. Некрасов¹, otaky1996@yandex.ru

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

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы, возникающие при практическом применении метода блокового распознавания параметров пенного слоя флотомашин калийной руды. К ним относятся выбор наилучшей статистической характеристики, настроек фильтрации и усреднения, проверка возможности учета антиблоков и необходимость адаптивного перенормирования сигнала. **Цель исследования** заключается в разработке алгоритма идентификации ячейки флотомашин как объекта автоматического регулирования, что возможно только после решения указанных проблем. **Материалы и методы.** Исследование проведено на материалах экспериментальной съемки калийной флотомашин. В ходе съемки на ячейку машин был подан стандартный ступенчатый сигнал, вызвавший изменение состава амино-масляной смеси, что вызвало переходный процесс. Для разных статистических характеристик (количество пузырей, количество красной компоненты в кадре, среднее и среднемедианные расстояния между центрами пузырей) опробованы различные способы фильтрации и усреднения данных. Одновременно решалась задача идентификации коэффициента усиления и постоянной времени объекта. Наилучшая характеристика и способы её обработки выбирались на основании среднеквадратичного отклонения расчетного переходного процесса от натуральных данных, полученных путем блокового распознавания поверхности пенного слоя. **Результаты.** Обработка нескольких кадров подряд, снятых при одном и том же положении пеногона, незначительно улучшает результат, но значительно загружает вычислительные мощности. Слепая фильтрация по десяти точкам практически не влияет на время обработки данных. Для улучшения идентификации применялось перенормирование данных, заключающееся в адаптивном подборе нулевого и единичного сигнала в условиях зашумленности данных. Методом локализации произведено определение оптимального с точки зрения квадратичного отклонения запаздывания до начала переходного процесса. **Заключение.** В результате получены наилучшие настройки фильтрации и усреднения данных, обеспечивающие наименьшую погрешность идентификации. Постоянная времени ячейки оказалась близка к результатам предшествующих авторов, полученным в том числе путем визуального наблюдения за флотомашин. Учет антиблоков несущественно влияет на параметры объекта. Важным выводом является то, что одна статистическая характеристика хорошо описывает начало переходного процесса, а другая – его окончание. Это необходимо учитывать при построении системы сигнализации отклонений.

Ключевые слова: калийная промышленность, флотация, пенный слой, распознавание, блоковый метод, сигнализация, управление

Для цитирования: Затонский А.В., Федосеева К.А., Некрасов Д.И. Разработка и настройка алгоритма программной идентификации отклонений в пенном слое калийной флотомашин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 42–56. DOI: 10.14529/ctcr230104

DEVELOPMENT AND TUNING OF ALGORITHM FOR SOFTWARE IDENTIFICATION OF DEVIATIONS IN THE POTASH FLOTATION MACHINE FROTH LAYER

A.V. Zatonkiy¹, z xenon@narod.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

K.A. Fedoseeva², kristya_0103@mail.ru

D.I. Nekrasov¹, otaky1996@yandex.ru

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

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The article deals with the problems that arise in the practical application of the method of glare recognition of the parameters of the froth layer of a potash ore flotation machine. These include choosing the best statistical characteristic, filtering and averaging settings, checking the possibility of taking into account anti-glare, and the need for adaptive signal renormalization. **Objective of the study** is to develop an algorithm for identifying a flotation cell as an object of automatic control, which is possible only after solving these problems. **Materials and methods of research.** The study was carried out on the materials of an experimental survey of a potash flotation machine. During the shooting, a standard step signal was applied to the machine cell, which was expressed in a change in the composition of the amino-oil mixture, which caused a transient process. For different statistical characteristics (the number of bubbles, the number of red components in the frame, the average and median distances between the centers of the bubbles), various methods of filtering and averaging the data were tested. At the same time, the problem of identifying the gain and the time constant of the object was solved. The best characteristic and methods of its processing were chosen on the basis of the root-mean-square deviation of the calculated transient process from field data obtained by glare recognition of the foam layer surface. **Results.** Processing several frames in a row, taken at the same position of the foam, slightly improves the result, but significantly loads computing power. Blind filtering by ten points has practically no effect on the data processing time. To improve the identification, data renormalization was used, which consists in the adaptive selection of the zero and single signals in the conditions of noisy data. The localization method was used to determine the optimal delay from the point of view of the quadratic deviation before the start of the transient process. **Conclusion.** As a result, the best filtering and data averaging settings were obtained, providing the smallest identification error. The time constant of the cell turned out to be close to the results of previous authors, obtained, among other things, by visual observation of the flotation machine. Accounting for antiglare does not significantly affect the parameters of the object. An important conclusion is that one statistical characteristic describes well the beginning of the transient process, and the other describes its end. This must be taken into account when building a deviation signaling system.

Keywords: potash industry, flotation, foam layer, recognition, glare method, signaling, control

For citation: Barkalov S.A., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Determining a rating score based on a streaming model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):42–56. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230104

Введение

«Уралкалий» – российская компания, один из крупнейших в мире производителей калийных удобрений. Производственные мощности компании находятся в городах Березники и Соликамске Пермского края. «Уралкалий» разрабатывает Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей. Природные калийные руды перерабатывают в технический продукт – хлористый калий, который используется как удобрение, вносимое либо напрямую в почву, либо в составе сложных, комплексных, удобрений. А также хлористый калий используется и в других отраслях промышленности: химической, нефтехимической, пищевой, фармацевтической [1].

Для обогащения калийных руд на верхнекамских калийных комбинатах применяют пенную флотацию [2], в том числе используются шламовая флотация (отделение хлористых солей от нерастворимого остатка) и сильвиновая флотация (разделение хлорида калия и хлорида натрия) (рис. 1).

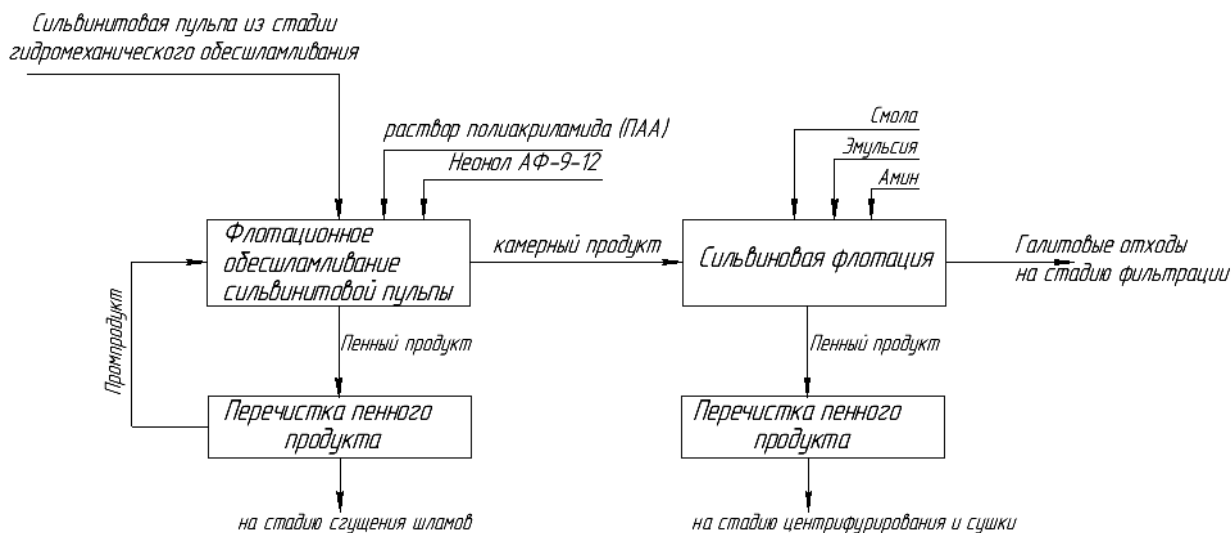


Рис. 1. Краткая схема стадий флотационного процесса
Fig. 1. Brief flotation technological scheme

При сильвиновой флотации через пульпу обогащаемой руды пропускают пузырьки воздуха. Частицы не смачиваемого amino-масляной смесью хлорида калия прилипают к пузырькам воздуха и всплывают на поверхность в виде минерализованной пены, а смачиваемые частицы (хлорид натрия) тонут и удаляются с камерным продуктом машины. Пена в обоих случаях смахивается в лоток-приемник вращающимся пеногоном.

Технолог (флотатор) контролирует процесс, наблюдая за изменениями пенного слоя. Для их описания используются сленговые термины «пена лысая» (снизилось количество частиц хлорида калия), «пена неровная» (проблемы с подачей воздуха), «пена не красная» и т. д. Важно, что технолог может наблюдать одновременно только одну флотационную машину (ФМ), тогда как в отделении флотации их десятки. Проблему можно было бы решить в том числе с применением компьютерного зрения. Существуют системы, успешно распознающие пузырьки в полиметаллических [3, 4] или угольных [5–7] ФМ. Однако неконтрастная пена калийной ФМ может быть распознана только путем анализа бликов с поверхности пузырьков, формируемых точечным источником света [8]. При практической реализации подобного подхода возникают две самостоятельные задачи, продвижение к решению которых посвящена эта статья:

- 1) осуществить сигнализацию начала переходного процесса (изменений в ФМ) для привлечения внимания флотатора;
- 2) подключить систему видеораспознавания на вход обычного ПИ- или ПИД-регулятора по каналу «статистическая характеристика пенного слоя» с выходом на регулирование состава amino-масляной смеси.

Постановка задачи

В обоих случаях требуется идентификация канала как объекта регулирования. Предположим в соответствии с [9], что ячейка ФМ по свойствам близка к звену идеального смешения (первого порядка) с запаздыванием, что соответствует техническому устройству ячейки. В неё подается воздух, поток которого разбивается на пузырьки импеллером, одновременно перемешивающим пульпу в ячейке. Передаточная функция такого звена имеет вид

$$W(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1} \exp(\tau s), \quad (1)$$

где T – постоянная времени; k – коэффициент усиления; τ – транспортное запаздывание, вызванное дотеканием старого состава смеси от смесителя до ячейки. Первая из перечисленных задач это, по сути, определение запаздывания τ , ответ на вопрос – как давно начался переходный процесс. Вторая – идентификация T и k . Если обрабатываются нормированные тренды, то определению подлежат всего два параметра: T и τ . Традиционно же τ определяется «на глаз», визуально: как только начал изменяться тренд на выходе, значит, это и есть запаздывание.

Однако этому мешает большой разброс значений характеристики. Кадры для компьютерной обработки вынужденно выбираются один (или несколько подряд) за полуоборот пеногона, и к следующей выборке кадров поверхность слоя может сильно измениться. Например, количество пузырьков в кадре (в некоторых относительных единицах) при стабильной работе ФМ, в отсутствие переходных процессов, меняется так, как показано на рис. 2.

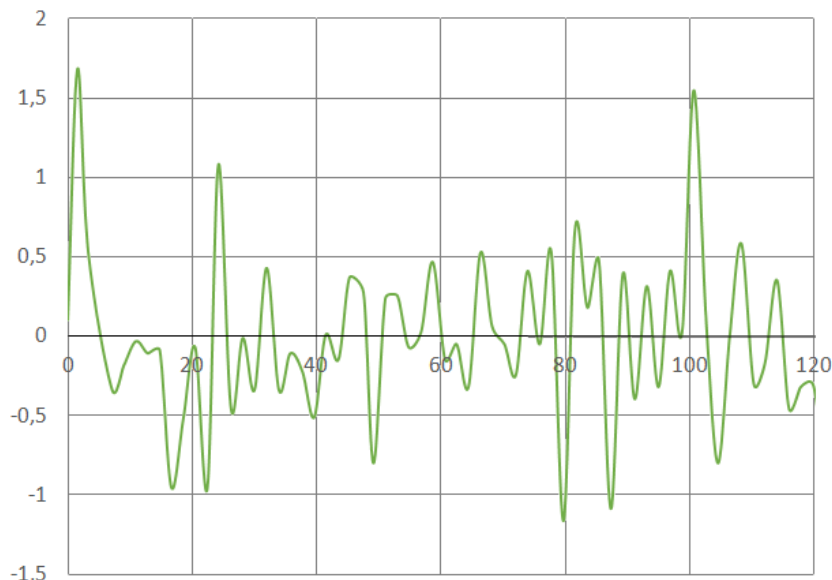


Рис. 2. Относительное количество пузырьков в последовательности обработанных кадров
Fig. 2. Relative number of bubbles in the sequence of processed frames

Целью данной работы является разработка алгоритма идентификации ячейки флотомашины как объекта автоматического регулирования. Однако цель недостижима без решения проблемы высокой погрешности сигнала, мешающей как идентифицировать объект регулирования, так и управлять им или сигнализировать изменения в нем. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- выбор наилучшей статистической характеристики;
- выбор вида и настройки фильтрации сигнала;
- определение возможности использовать усреднение кадров подряд;
- модификация нормировки сигнала при определении запаздывания;
- определение возможности учитывать антиблики [10];
- собственно построение алгоритма идентификации, включая алгоритм определения начала переходного процесса, и определение их настроек;
- идентификация объекта и сравнение результатов с данными других авторов.

Все перечисленные выборы производились по критерию наименьшего отклонения переходного процесса в ФМ от расчетного значения, полученного в соответствии с (1). Если на объект 1-го порядка (1) подать ступенчатое стандартное воздействие $1(t)$, в нем начнется переходный процесс, в реальных единицах измерения соответствующий уравнению

$$Y_i^* = k \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t_i^*}{T}\right) \right), \quad (2)$$

где t_i^* – время с учетом запаздывания; k и T – как указано выше, это параметры звена. Идентификация производится решением задачи

$$S \rightarrow \min,$$

где $S = \sum_i (Y_i - Y_i^*)^2$; Y_i – значение исходного нормированного ряда данных; Y_i^* – значение расчетного нормированного ряда данных.

Решение задачи перенормирования

Описанная выше высокая погрешность исходных данных приводит к тому, что если при нормализации за нижний предел значений Y_0 принимать минимальное значение из всего тренда, то получим результат идентификации, подобный представленному на рис. 3.

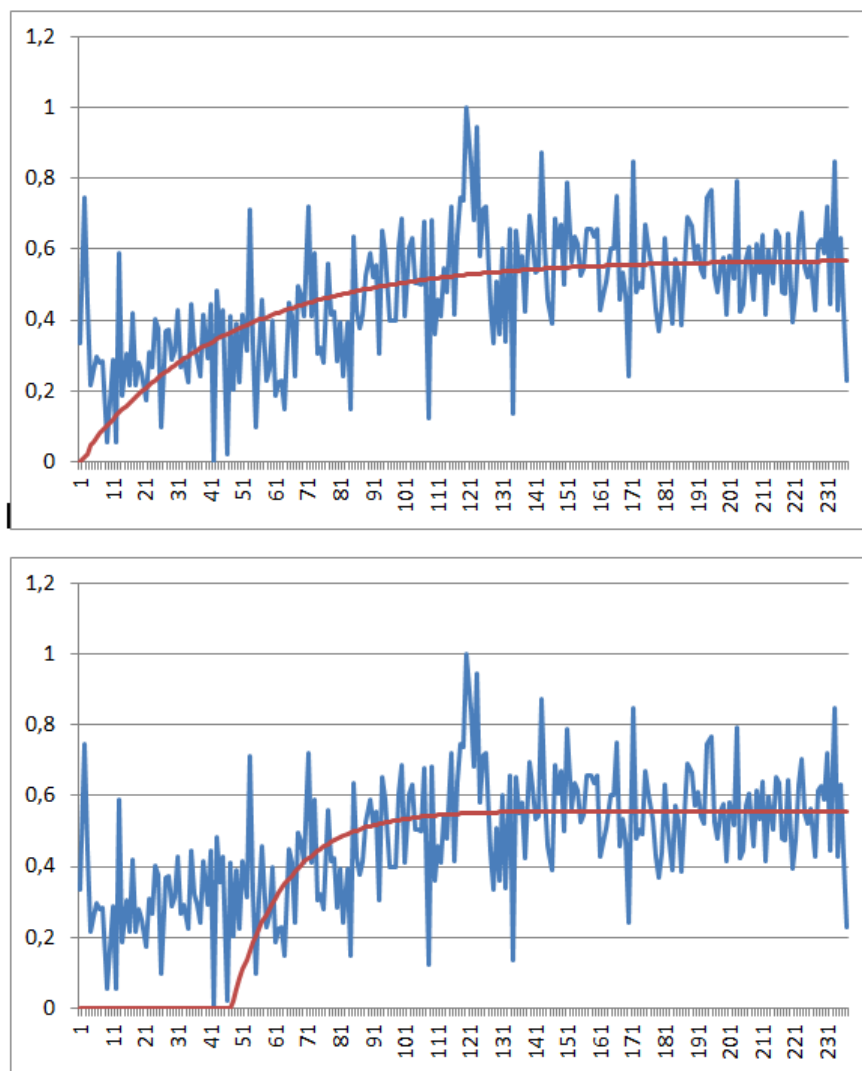


Рис. 3. Идентификация при неверно выбранном минимальном значении, нулевом и ненулевом запаздывании
Fig. 3. Identification with an incorrectly chosen minimum value, with an zero and non-zero delay

От запаздывания эффект «неправильного нуля» не зависит – даже при его отсутствии очевидно, что начало расчетного тренда находится очень далеко от усредненного значения. А поскольку какое-то количество исходных точек получено до изменения подачи флокулянта, все колебания здесь обусловлены только погрешностью распознавания и стохастическим характером возникновения пузырьков. Следовательно, разумно было бы усреднить какое-то значительное количество (ниже оно обозначено OTS) исходных точек перед той точкой, где предполагается запаздывание, и получить их среднее, а не минимальное, значение o_null . Аналогично получить среднее значение в конце тренда o_end , где переходный процесс уже закончился и колебания тренда обусловлены только погрешностью. Функции реализуют усреднение на отрезках OTS с учетом разных возможных ситуаций, например, если точка запаздывания находится от начала тренда менее чем в OTS позициях.

Использование данного метода позволяет привести расчетные тренды к адекватным начальному и конечным значениям, как показано на рис. 4.

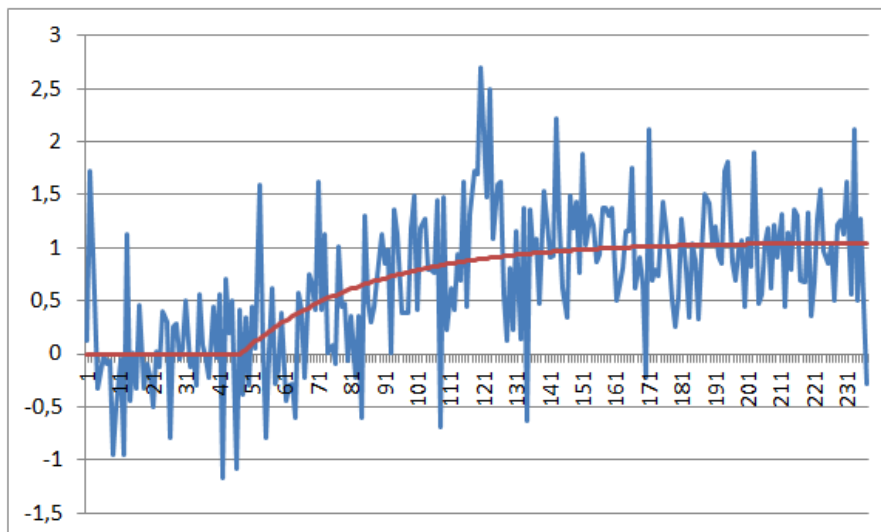


Рис. 4. Результат идентификации с усреднением по OTS точек
в начале и конце тренда
Fig. 4. The result of identification with averaging over OTS points
at the beginning and end of the trend

Перед поиском параметров объекта производится заполнение массива «нормированные данные с учетом запаздывания». До точки запаздывания в него записывается 0, далее – исходные значения. В массив «время с учетом запаздывания» t_i^* до точки запаздывания записывается 0, далее – натурное время минус запаздывание. Этим достигается значение времени 0 в момент начала расчетного переходного процесса.

Решение задачи идентификации

Алгоритм определения k и T по обработанному ряду данных приведен на рис. 5.

Если в распоряжении исследователя есть уже весь тренд, визуально можно определить, что когда-то давно переходный процесс уже начался. Однако при контроле технологического процесса в режиме реального времени «правая», будущая часть тренда отсутствует. Есть только его начало до текущего момента. И как можно быстрее после начала переходного процесса надо, как минимум, сигнализировать флотатору об изменении состояния ФМ. Как максимум – предпринять компенсирующие действия, например, при помощи ПИД-регулятора. Вопросу программной идентификации начала переходного процесса предшествующие авторы уделяли недостаточно внимания. Мы предлагаем следующий алгоритм, работоспособность которого нами проверена и подтверждена на описанных исходных данных.

Пусть нам откуда-то известна постоянная времени T^* ячейки ФМ. Выберем некоторый размер скользящего окна (например, 20–40 отсчетов) и будем в его пределах идентифицировать постоянную времени так, как если бы на вход объекта поступил стандартный ступенчатый сигнал. В левой части графика мы будем получать значения T , очень далекие от T^* , скорее всего, близкие к бесконечности, ведь тренд почти горизонтальный. В правой части графика будет аналогичный эффект и отрицательные значения T (между 130 и 160 отсчетами). И только если расчетная T близка к T^* , мы можем более-менее уверенно идентифицировать начало переходного процесса. Обстоятельство «более-менее» в данном случае не слишком существенно, так как лучше сигнализировать лишний раз, заставить флотатора подойти к ФМ, чем упустить особую ситуацию.

Алгоритм идентификации начала переходного процесса, таким образом, состоит в следующем.

1. По нескольким специально созданным переходным процессам определить T^* , имея в распоряжении полные тренды экспериментов.
2. В ходе наблюдений за ФМ (получения следующего тренда) идентифицировать T , и как только $|T - T^*| < \varepsilon$, где ε некоторая граничная погрешность, сигнализировать об изменениях в ФМ, заслуживающих внимания оператора.

3. Для обеспечения п. 2 в ходе выполнения п. 1 определить настройки обоих алгоритмов, обеспечивающие удовлетворительное качество работы (размер скользящего окна, граничную погрешность и т. д.), включая выбор самого исходного сигнала (K4, K5, K8, K9), метод предварительной фильтрации сигнала и его настройки.

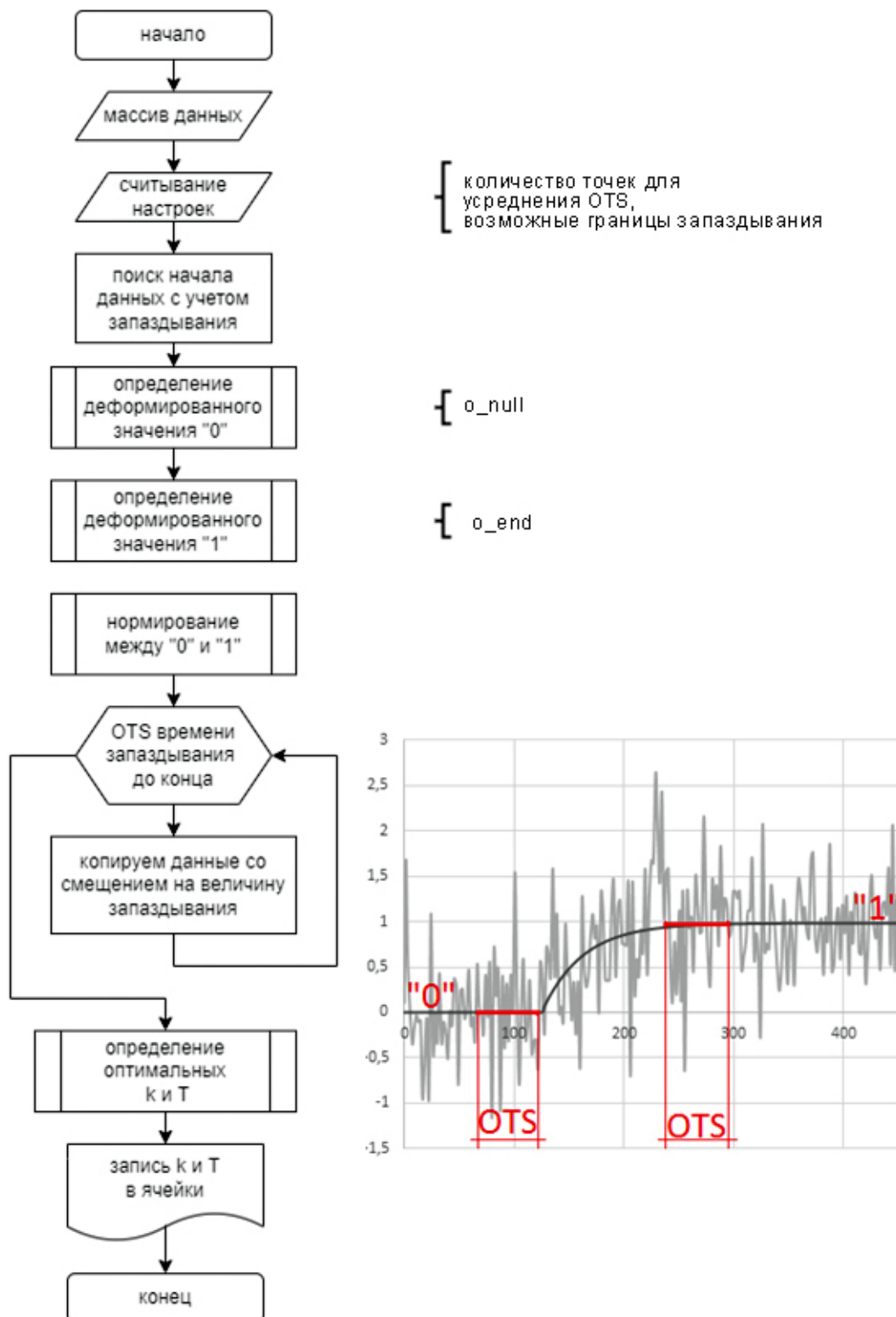


Рис. 5. Алгоритм идентификации запаздывания и постоянной времени с нормированием по усредненным значениям
Fig. 5. Algorithm for delay and time constant identification with averaged values normalization

Исходные материалы

Мы обрабатывали видеопотоки, полученные на разных ФМ ПАО «Уралкалий» и ООО «Еврохим – Усольский калийный комбинат». На одной из ФМ после длительной съемки без внесения возмущений был организован переходный процесс, начало которого и требуется определить. В качестве статистических характеристик пены рассматривались следующие (рис. 6):

- количество бликов (и антибликов, если этот режим включен) – далее обозначено K4;
- усредненное количество красной компоненты на RGB-изображении – K5;
- среднее арифметическое расстояние между центрами бликов – K8;
- среднемедианное расстояние между центрами бликов – K9.

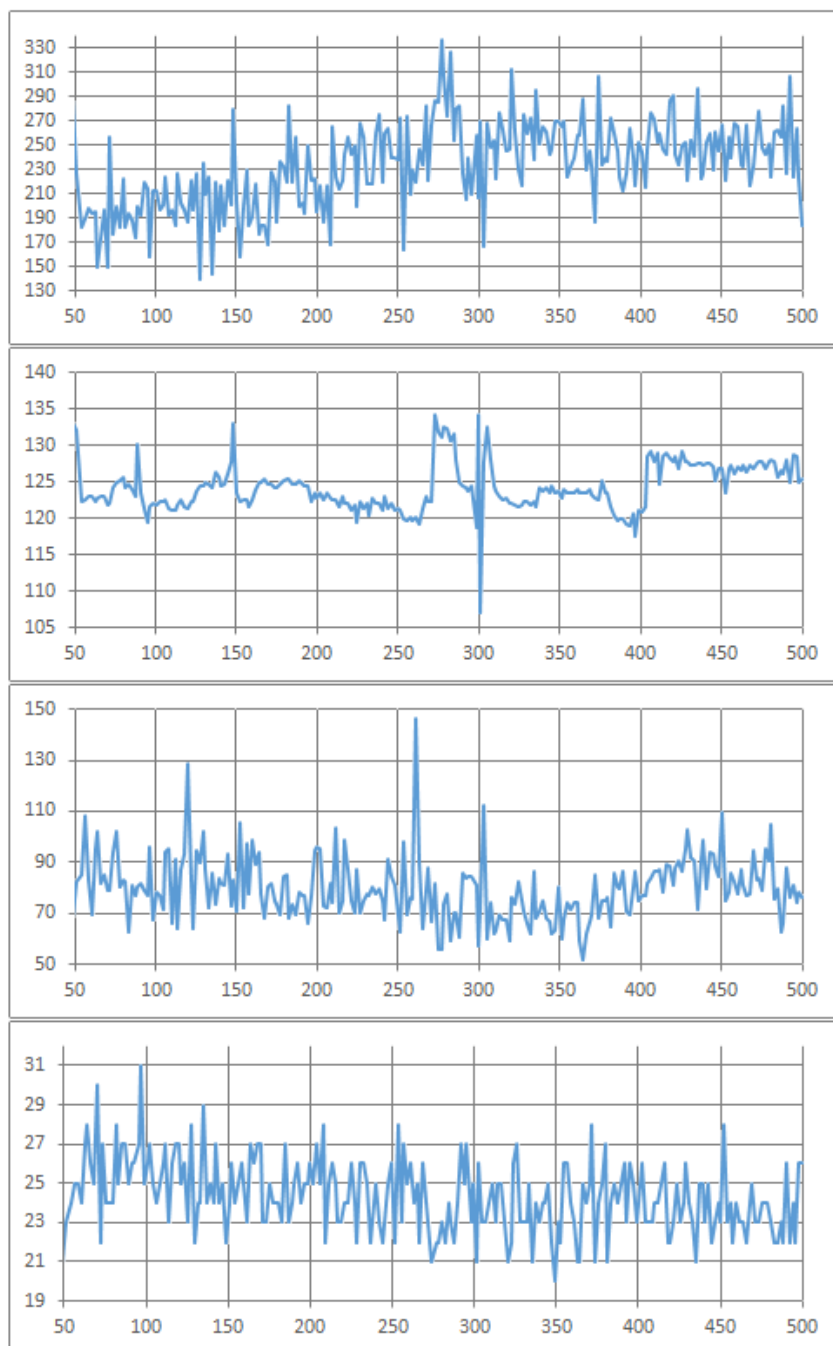


Рис. 6. Исходные тренды K4, K5, K8 и K9 в зависимости от номера одиночного обработанного кадра (без сглаживания и без усреднения по последовательным кадрам)
Fig. 6. Initial trends K4, K5, K8 and K9 depending on the number of a single processed frame (without smoothing and without averaging over successive frames)

Значения характеристик вычислялись путем обработки одного кадра или как среднее от вычисленных по последовательности (2, 3, 5) кадров, взятых подряд на одном и том же полуобороте пеногона.

Предварительно данные блочной обработки видеопотока [11] фильтровались сглаживанием по нескольким (3, 5, 10, 20) точкам. Использование методов неслепой фильтрации (наподобие фильтра Калмана [12, 13]) в данном случае затруднительно, так как они работают в два этапа [14]. На этапе прогнозирования фильтр экстраполирует значения переменных состояния, а также их неопределенности. На втором этапе по данным измерения, полученного с некоторой погрешностью, результат экстраполяции уточняется. Благодаря пошаговой природе алгоритма фильтрации он способен в реальном времени отслеживать состояние объекта, используя только текущие замеры и информацию о предыдущем состоянии и его неопределенности. То есть на вход фильтра время от времени (при изменении характера шума) необходимо подавать «чистый шум», не содержащий информативного сигнала. Это легко реализовать, например, при фильтрации шумов на линиях связи, но в нашем случае достаточно сложно определить, на каком участке тренда нет переходного процесса (информативного сигнала). Собственно, именно его начало и окончание как раз и требуется определить.

Решение задачи фильтрации

Слепая фильтрация в системах автоматического регулирования обычно выполняется методом скользящего среднего [12]. Однако в данном случае его применение вызывает две проблемы. Если использовать малое количество точек, то шум результата не очень отличается от исходного. А если использовать большое количество точек для осреднения (10, 20), то теряется результат (рис. 7).

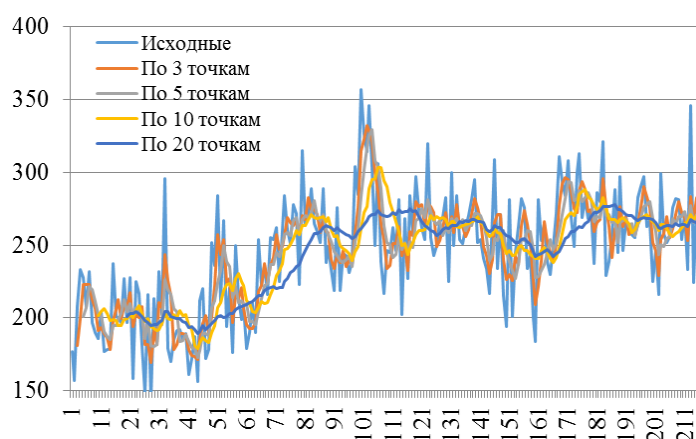


Рис. 7. Фильтрация тренда методом скользящего среднего
Fig. 7. Filtering the trend by the moving average method

Рассмотрим подробнее участок тренда (рис. 8).

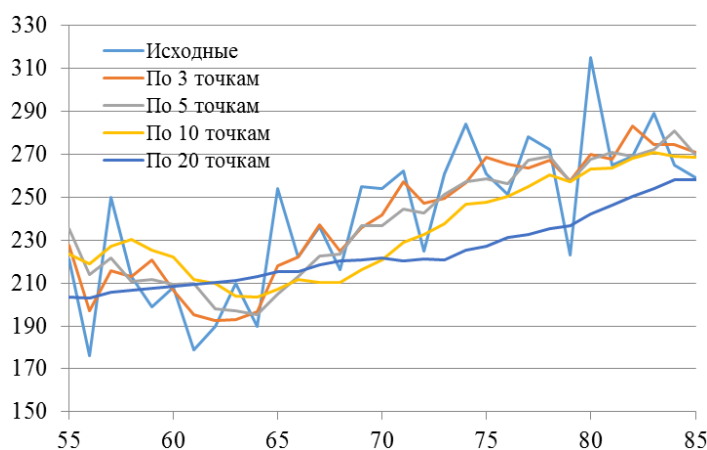


Рис. 8. Участок начала переходного процесса
Fig. 8. Section of the beginning of the transition process

Очевидно, что при сглаживании по 20 и более точкам нет никакой возможности в моменты отсчета 65–70 идентифицировать начало переходного процесса. А при малом количестве точек идентификация по-прежнему затруднена шумом [15].

Нами исследованы возможности применения видов фильтрации исходных данных (1, 3, 5-точечная и т. д., рис. 9) и усреднение по последовательным кадрам.

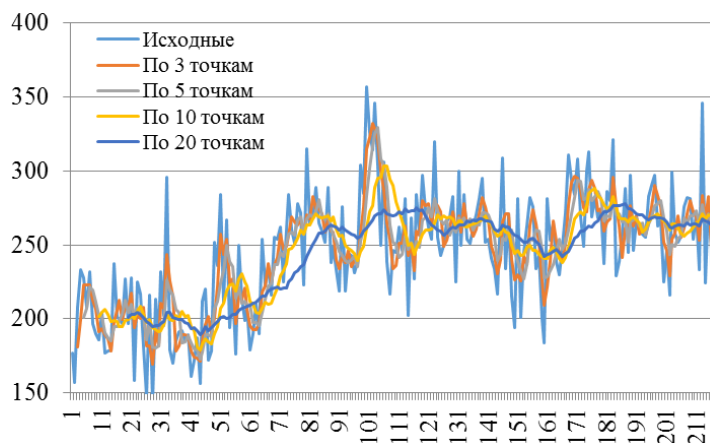


Рис. 9. Фильтрация тренда методом скользящего среднего
Fig. 9. Filtering the trend by moving average method

Приведем фрагмент таблицы с результатами имитационных экспериментов (см. таблицу).

Результаты вычислительных экспериментов (фрагмент)
Results of numerical experiments (fragment)

Таблица

Характеристика	Кадров подряд	Фильтрация	Погрешность
К4	1	1	67,000
К4	1	5	17,955
К4	1	10	12,619
К4	3	1	44,671
К4	3	5	16,332
К4	3	10	11,571
К4	5	1	36,171
К4	5	5	16,726
К4	5	10	11,440
К5	1	1	166,688
К5	1	5	90,464
К5	1	10	69,492
К5	3	1	147,098
К5	3	5	82,825
К5	3	10	70,893
К5	5	1	151,721
К5	5	5	83,930
К5	5	10	64,841
К8	1	1	1141,852
К8	1	5	362,053
К8	1	10	280,039
К8	3	1	1559,268
К8	3	5	642,800
К8	3	10	541,689
К8	5	1	1204,549

Окончание таблицы
Table (end)

Характеристика	Кадров подряд	Фильтрация	Погрешность
K8	5	5	557,533
K8	5	10	482,188
K9	1	1	230,925
K9	1	5	47,808
K9	1	10	28,682
K9	3	1	174,627
K9	3	5	38,839
K9	3	10	22,645
K9	5	1	179,698
K9	5	5	43,752
K9	5	10	24,856

По данным в таблице видно, что лучшим практически во всех ситуациях набором фильтров оказались обработка трех кадров подряд и скользящее среднее по десяти точкам. Пять кадров (и более) подряд существенно замедляют процесс обработки, и на доступных нам компьютерах он при 7–8 кадрах подряд начинает приближаться к времени полуоборота пеногона, что затрудняет обработку видео в реальном времени. А при 15–20 точках для расчета скользящего среднего резко меняется постоянная времени, так как проявляется описанный выше эффект размытия переходного процесса.

Решение задачи идентификации запаздывания

При подборе запаздывания обнаруживается выраженный минимум погрешности S (рис. 10) в окрестности времени 125 с с момента подачи возмущающего воздействия. Разность погрешностей при разном количестве кадров, обрабатываемых подряд, вызвана совокупным суммированием погрешности по всем кадрам. Если пронормировать графики, получим почти совпадающий результат.

Учет антибликов практически не влияет на определение запаздывания. В некоторых расчетных точках значение погрешности изменяется на 0,5–1,5 %, но в большинстве результаты просто совпадают.

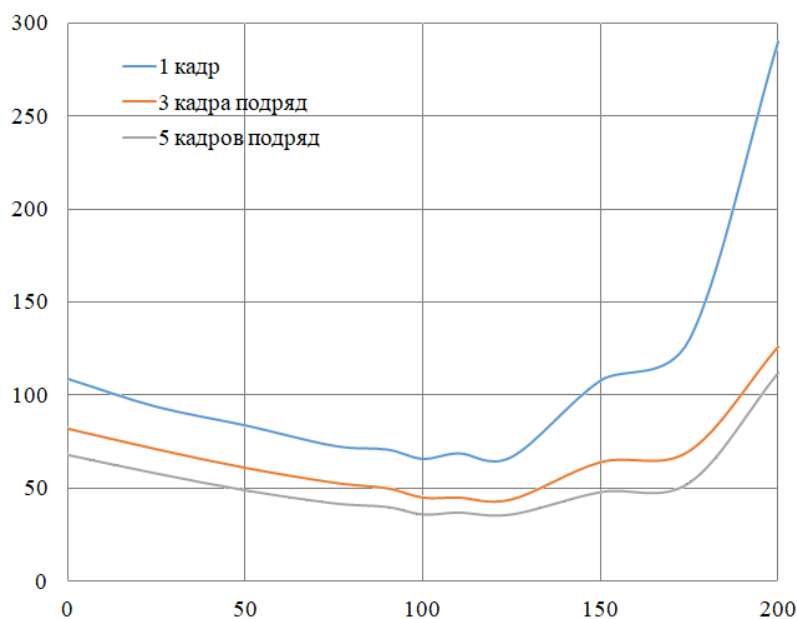


Рис. 10. Зависимость расчетной погрешности S (ось ординат) от запаздывания в секундах (ось абсцисс) при использовании набора данных K4
Fig. 10. Dependence between the calculated error S (y-axis) and the delay in seconds (abscissa) with K4 data set

Результат работы алгоритма идентификации запаздывания с перенормированием по набору данных К4 приведен на рис. 11.

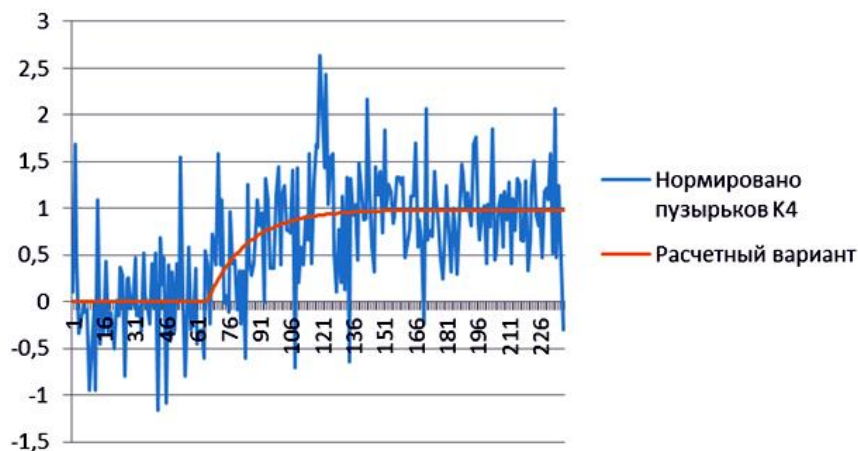


Рис. 11. Результат идентификации запаздывания по набору данных К4 в зависимости от номера кадра

Fig. 11. The result of delay identification with K4 data set depending on the frame number

Аналогичные результаты получились по наборам данных К8 и К9, тогда как набор данных К5 привел к запаздыванию 350 с. Если совместить графики (рис. 12), то напрашивается предположение, что количество бликов К4 характеризует начало процесса (уменьшили подачу аминов в смесь), а количество красной компоненты К5 характеризует окончание процесса (восстановили подачу аминов до начального значения). В связи с окончанием съемки К4 не успело вернуться к начальному значению, но значительно менее инерционная статистическая характеристика К5 уже сигнализировала о начале обратного переходного процесса. Интересно, что постоянные времени процесса при этом получаются различные (36,75 с и 5,52 с соответственно). Значение 36,75 с достаточно хорошо соответствует монографии [6] и статье [5].

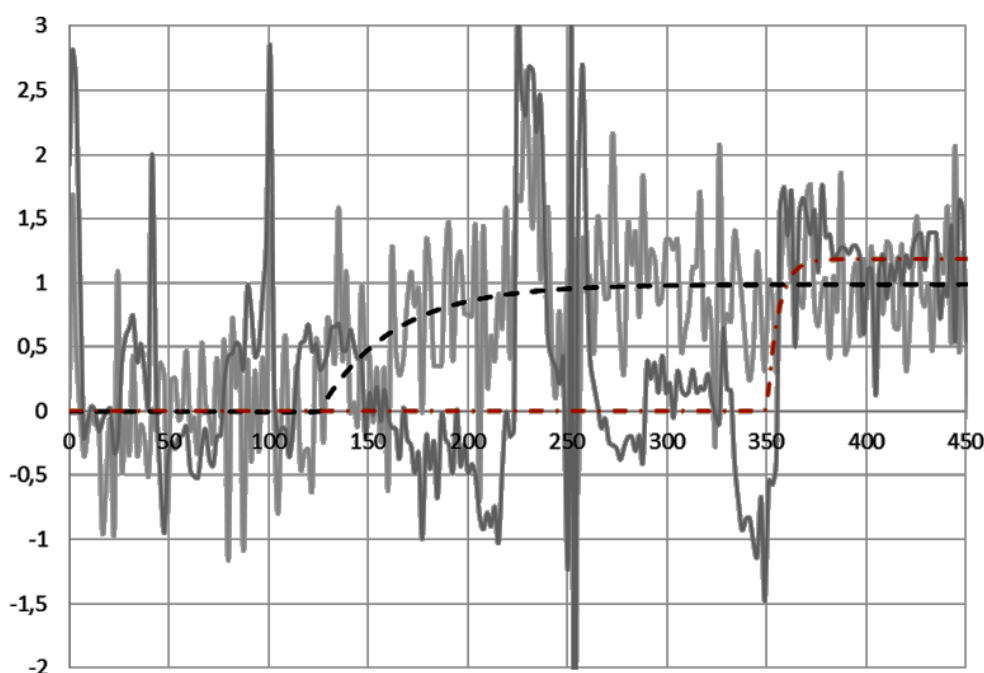


Рис. 12. Наложение расчетных переходных процессов по наборам данных К4 и К5

Fig. 12. Combination of calculated transients processes with data sets K4 and K5

Результаты и выводы

Таким образом, поставленные в начале работы задачи успешно выполнены.

1. Определена постоянная времени ячейки ФМ для разных статистических показателей, хорошо характеризующих начало и окончание переходного процесса.
2. К этим статистическим характеристикам подобраны настройки, обеспечивающие наилучшую (для имеющихся данных) идентификацию начала и окончания переходного процесса.
3. Подтверждена возможность идентифицировать начало переходного процесса за 20–30 с (10–15 отсчетов на рис. 6 и 7) для последующей сигнализации флотатору. Фактически флотатор осматривает машины в отделении с периодичностью раз в 10–30 мин.
4. Показано, что учет антибликов не изменяет существенно возможности алгоритма идентификации особой ситуации в ячейке ФМ и несущественно влияет на идентификацию параметров ячейки.

Список литературы

1. Устойчивое воспроизводство в АПК как важное условие продовольственной безопасности на региональном уровне / Б.А. Воронин, И.П. Чупина, Я.В. Воронина и др. // *International Agricultural Journal*. 2022. Т. 65, № 1. DOI: 10.55186/25876740_2022_6_1_14
2. Технология флотационного обогащения калийных руд / Н.Н. Тетерина, Р.Х. Сабилов, Л.Я. Сквирский, Л.Н. Кириченко. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2002. 484 с.
3. Романенко С.А., Оленников А.С. Опыт внедрения видеокамер FrothMaster на обогатительной фабрике «Зеленая гора-2» // *Обогащение руд*. 2014. № 2. С. 23–28.
4. The concentrate ash content analysis of coal flotation based on froth images / J. Tan, L. Liang, Y. Peng, G. Xie // *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 92. P. 9–20. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.02.006
5. Froth Stereo Visual Feature Extraction for the Industrial Flotation Process / L. Zhao, T. Peng, Y. Xie et al. // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58 (31). P. 14510–14519. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b00426
6. Jahedsaravani A., Massinaei M., Marhaban M.H. An Image Segmentation Algorithm for Measurement of Flotation Froth Bubble Size Distributions // *Measurement*. 2017. Vol. 111. P. 29–37. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2017.07.023
7. Логунова О.С., Шилов Р.Э., Леднов А.В. Методика и алгоритмы сегментации изображения пенного продукта флотации // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2018. Т. 9, № 1. С. 72–75.
8. Затонский А.В., Варламова С.А., Федосеева К.А. Улучшение компьютерного распознавания параметров пены калийных флотомашин за счет учета антибликов пузырей // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2022. Т. 22, № 3. С. 57–67. DOI: 10.14529/ctcr220306
9. Беккер В.Ф. Решение технологических проблем действующего производства средствами автоматизации. Пермь: ПНИПУ, 2012. 366 с.
10. Варламова С. А., Затонский А. В., Федосеева К. А. Исследование чувствительности к освещению метода бликового распознавания пен калийных флотационных машин // *Обогащение руд*. 2021. № 6. С. 29–33.
11. Мальшева А.В. Усовершенствованный алгоритм распознавания бликов бинаризованного изображения пены // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2018. № 5. С. 110–116.
12. Прохоренков А.М., Качала Н.М. Цифровая фильтрация сигналов в промышленных системах управления // *Цифровая обработка сигналов*. 2008. № 3. С. 32–36.
13. Савинов Г.Ф. О некоторых особенностях алгоритма оптимальной фильтрации Калмана – Бьюси // *Авиакосмическое приборостроение*. 2007. № 6. С. 22–29.
14. Цыплаков А. Введение в моделирование в пространстве состояний // *Квантиль*. 2011. № 9. С. 1–21.
15. Федосеева К.А. Усовершенствование адаптивной фильтрации тренда количества бликов с поверхности пены // *Прикладная математика и вопросы управления*. 2021. № 4. С. 59–71.

References

1. Voronin B.A., Chupina I.P., Voronina Ya.V., Zarubina E.V., Simachkova N.N. Sustainable re-production in the agro-industrial complex as an important condition for food security at the regional level. *International Agricultural Journal*. 2022;65(1). (In Russ.) DOI: 10.55186/25876740_2022_6_1_14
2. Teterina N.N., Sabirov R.Kh., Skvirskiy L.Ya., Kirichenko L.N. *Tekhnologiya flotatsionnogo obogashcheniya kaliynykh rud* [Technology of flotation concentration of potash ores]. Perm: Perm State Technical University; 2002. 484 p. (In Russ.)
3. Romanenko S.A., Olennikov A.S. FrothMaster video system introduction experience practice at the “Green mountain-2” plant. *Obogashcheniye rud*. 2014;2:23–28. (In Russ.)
4. Tan J., Liang L., Peng Y., Xie G. The concentrate ash content analysis of coal flotation based on froth images. *Minerals Engineering*. 2016;92:9–20. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.02.006
5. Zhao L., Peng T., Xie Y., Gui W., Zhao Y. Froth Stereo Visual Feature Extraction for the Industrial Flotation Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019;58(31):14510–14519. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b00426
6. Jahedsaravani A., Massinaei M., Marhaban M.H. An Image Segmentation Algorithm for Measurement of Flotation Froth Bubble Size Distributions. *Measurement*. 2017;111:29–37. DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2017.07.023
7. Logunova O.S., Shilov R.E., Lednov A.V. [Technique and algorithms for image segmentation of the froth product of flotation]. *Aktual'nyye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2018;9(1):72–75. (In Russ.)
8. Zatonskiy A.V., Varlamova S.A., Fedoseeva K.A. Improvement of computer recognition of foam parameters in potash flotation machines by anti-glare from bubbles. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2022;22(3): 57–67. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220306
9. Bekker V.F. *Resheniye tekhnologicheskikh problem deystvuyushchego proizvodstva sredstvami avtomatizatsii* [Solving technological problems of existing production by means of automation]. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2012. 366 p. (In Russ.)
10. Varlamova S.A., Zatonskiy A.V., Fedoseeva K.A. [Investigation of the sensitivity to illumination of the method of glare recognition of foams of potash flotation machines]. *Obogashcheniye rud*. 2021;6:29–33. (In Russ.)
11. Malysheva A.V. Modified algorithm for determination of glares on foam binarized images. *Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences*. 2018;5:110–116. (In Russ.)
12. Prokhorenkov A.M., Kachala N.M. [Digital filtering of signals in industrial control systems]. *Digital signal processing*. 2008;3:32–36. (In Russ.)
13. Savinov G.F. [About some features of the Kalman-Bucy optimal filtering algorithm]. *Aerospace instrument-making*. 2007;6:22–29. (In Russ.)
14. Tsyplakov A. [Introduction to state-space modeling]. *Quantile*. 2011;9:1–21. (In Russ.)
15. Fedoseeva K.A. [Improvement of adaptive filtering of the trend of the amount of reflections from the surface of the foam]. *Applied mathematics and control sciences*. 2021;4:59–71. (In Russ.)

Информация об авторах

Затонский Андрей Владимирович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; zhenon@narod.ru.

Федосеева Кристина Александровна, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; kristya_0103@mail.ru.

Некрасов Дмитрий Иванович, магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; otaky1996@yandex.ru.

Information about the authors

Andrey V. Zatonkiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; zxenon@narod.ru.

Kristina A. Fedoseeva, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; kristya_0103@mail.ru.

Dmitriy I. Nekrasov, Master's Student, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; otaky1996@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 09.12.2022

The article was submitted 09.12.2022

Управление в социально-экономических системах Control in social and economic systems

Научная статья
УДК 519.8:658.012.1
DOI: 10.14529/ctcr230105

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУНИЦИПАЛЬНЫХ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ РЕГИОНА

А.В. Кутышкин, avk_200761@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3226-0360>

О.В. Шульгин, shul.oleg.val@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1989-3975>

Нижневартовский государственный университет, Нижневартовск, Россия

Аннотация. Эффективность медицинских учреждений принято оценивать показателями, характеризующими экономические, медицинские и социальные аспекты их деятельности. Показатели медицинской эффективности (МЭ) отражают достижение определенных медицинских результатов при оптимальном расходовании имеющихся ресурсов как для конкретного пациента, так и для медучреждения и региональной системы здравоохранения в целом. Оценки МЭ актуальны и востребованы как внутренними потребителями – менеджментом учреждений и системы здравоохранения, так и внешними потребителями, осуществляющими ее финансирование. Для оценки МЭ медицинских муниципальных учреждений предлагается использовать метод оболочечного анализа данных, характеризующих результаты их функционирования и регистрируемых действующей системой медицинской статистики. Данный метод не требует выявления функциональных связей между результатами деятельности медицинских учреждений и потребляемыми ими ресурсами. **Цель исследования:** определение с использованием метода оболочечного анализа данных медицинской эффективности муниципальных медицинских учреждений Ханты-Мансийского автономного округа – Югра на основе стандартных статистических данных о результатах их деятельности. **Материалы и методы.** Для оценки медицинской эффективности использовалась классическая входо-ориентированная модель с постоянным масштабом отдачи метода оболочечного анализа данных (Data Envelopment Analysis, DEA). Входные показатели данной модели характеризуют основные виды ресурсов, используемые медицинским учреждением. В качестве выходных были приняты показатели общего количества оформленных жителям муниципалитета листов временной нетрудоспособности, полнота охвата обязательными медицинскими осмотрами населения муниципалитета и показатели нагрузки стационаров и амбулаторно-поликлинических подразделений медучреждения. Для обеспечения сопоставимости входные и выходные показатели пересчитывались на 1000 человек населения муниципалитета. Оценка медицинской эффективности муниципальных медучреждений осуществлялась в среде MaxDEA 8 Basic. **Результаты.** Приводятся расчетные показатели медицинской эффективности муниципальных медицинских учреждений Ханты-Мансийского автономного округа – Югра за период с 2013 по 2020 г. Полученные оценки показывают, что более 60 % медучреждений в течение всего периода функционировали с максимальной эффективностью. Для недостаточно эффективных учреждений определены целевые значения входных показателей, достижение которых обеспечит максимальные значения эффективности их деятельности. **Заключение.** Среди муниципальных медицинских учреждений округа, функционирование которых в течение всего наблюдаемого периода времени характеризовалось максимальной медицинской эффективностью, рекомендательно выделены учреждения «лидеры/ориентиры». Показатели последних могут рассматриваться менеджментом системы здравоохранения округа как индикаторы при разработке и реализации управленческих решений по сопровождению и развитию как данной системы, так и учреждений в ее составе.

Ключевые слова: оболочечный анализ данных, медицинская эффективность, медицинские учреждения, учреждения «лидеры-ориентиры», региональная система здравоохранения

Для цитирования: Кутышкин А.В., Шульгин О.В. Использование непараметрического анализа данных для оценки эффективности муниципальных медицинских учреждений региона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 57–66. DOI: 10.14529/ctcr230105

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230105

USE OF NONPARAMETRIC DATA ANALYSIS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF MUNICIPAL MEDICAL INSTITUTIONS OF THE REGION

A.V. Kutyshkin, *avk_200761@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-3226-0360>

O.V. Shulgin, *shul.oleg.val@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-1989-3975>

Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia

Abstract. The effectiveness of medical institutions is usually assessed by indicators characterizing the economic, medical and social aspects of their activities. Indicators of medical effectiveness (ME) reflect the achievement of certain medical results with the optimal use of available resources, both for a particular patient, and for a medical institution and the regional healthcare system as a whole. The ME estimates are relevant and in demand both by internal consumers – the management of institutions and the healthcare system, and by external consumers who finance it. To assess the ME of medical municipal institutions, it is proposed to use the Data Envelopment Analysis (DEA) of data characterizing the results of their functioning and recorded by the current system of medical statistics. This method does not require the identification of functional relationships between the results of the activities of medical institutions and the resources they consume. **Aim.** Determination using the method of shell analysis of data on the medical effectiveness of municipal medical institutions of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra based on standard statistical data on the results of their activities. **Materials and methods.** The classical input-oriented model with a constant scale of return of the Data Envelopment Analysis (DEA) method was used to evaluate the medical effectiveness. The input indicators of this model characterize the main types of resources used by the medical institution. The indicators of the total number of temporary disability sheets issued to the residents of the municipality, the completeness of coverage by mandatory medical examinations of the population of the municipality and the load indicators of hospitals and outpatient departments of the medical institution were taken as days off. To ensure comparability, input and output indicators were recalculated per 1000 inhabitants of the municipality. The evaluation of the medical efficiency of municipal medical institutions was carried out in the MaxDEA 8 Basic environment. **Results.** Estimated indicators of medical efficiency of municipal medical institutions of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra for the period from 2013 to 2020 are given. The estimates obtained show that more than 60% of medical institutions functioned with maximum efficiency throughout the entire period. For insufficiently efficient institutions, target values of input indicators have been determined, the achievement of which will ensure the maximum values of the effectiveness of their activities. **Conclusion.** Among the municipal medical institutions of the district, the functioning of which during the entire observed period of time was characterized by maximum medical efficiency, the “leaders/landmarks” institutions were recommended. The indicators of the latter can be considered by the management of the health care system of the district as indicators in the development and implementation of management decisions to support and develop both this system and the institutions within it.

Keywords: data envelopment analysis (DEA), medical efficiency, medical institutions, benchmark medical institutions, regional healthcare system

For citation: Kutyshkin A.V., Shulgin O.V. Use of nonparametric data analysis for assessing the efficiency of municipal medical institutions of the region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2023;23(1):57–66. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230105

Введение

Эффективность функционирования региональной системы здравоохранения, в том числе и муниципальных медицинских учреждений (ММУ), определяется экономической, медицинской и социальной эффективностью [1–4]. Рассматривая категорию «эффективность» как отношение конечного результата деятельности системы или объекта к затратам ресурсов, которые задействованы в его получении, можно считать, что медицинская эффективность (МЭ) ММУ соответствует определенному медицинскому результату, полученному с использованием определенного

набора ресурсов учреждения. Применительно к конкретному пациенту – это улучшение его состояния или выздоровление (излечение) в результате оказания ему ММУ медицинских услуг. Для учреждения это непосредственно количество или доля пролеченных пациентов и объем оказанных медицинских услуг при оптимальном использовании имеющихся в распоряжении учреждения всех видов ресурсов. К показателям МЭ внутреннего для учреждения характера можно, например, отнести показатели загруженности медицинского персонала или оборот койки стационаров. Оценки МЭ актуальны и востребованы как внутренними потребителями – менеджментом ММУ, так и внешними потребителями, осуществляющими финансирование деятельности учреждения, в лице органов управления региональной системой здравоохранения и страховых компаний. В настоящее время для оценки МЭ чаще всего используются определенная совокупность показателей, которые увязываются с достижением нормативных значений, приведенных в программе государственных гарантий бесплатного оказания гражданам медицинской помощи [3–6]. Основным недостатком данного подхода является большое количество показателей, динамика значений которых не всегда позволяет сделать обоснованные выводы относительно уровня медицинской эффективности деятельности анализируемых учреждений. Более сложным вариантом оценки МЭ является использование ресурсной модели медицинской услуги [7–9], которая опирается на использование структурно-функционального подхода в описании реализации медицинской услуги с учетом стоимости основных видов затрат – адаптированный метод ABC (Activity Based Costing). К основным недостаткам данного подхода относят персонификацию оказываемой медицинской услуги и необходимость ее реализации в требуемом объеме, который зачастую зависит от квалификации персонала, ограниченность и регламентированность не только источников финансирования, но стоимости оказываемых медицинских услуг. Помимо этих классических подходов достаточно активно развивается использование непараметрических методов, в частности метода оболочечного анализа данных (Data Envelopment Analysis, DEA) [10–13]. Данный метод, основанный на применении метода линейного программирования, определяет «относительную технологическую» эффективность достаточно однородных производственных объектов, объединенных в группу. Функционирование каждого объекта представляется типовой моделью преобразования «входов» – затрат ресурсов в агрегированные показатели «выхода». К достоинствам метода DEA можно отнести: возможность оперировать достаточно большим количеством показателей «входа» и «выхода» объекта; может учитывать факторы внешнего окружения объекта; не требует предварительного определения функциональных зависимостей между «входами» и «выходами» объекта; определяет целевые значения «входов», обеспечивающие максимизацию эффективности недостаточно эффективных объектов группы; выявляет групповые «объекты-лидеры/ориентиры», значения параметров которых используются для расчета целевых значений «входов» неэффективных объектов.

К недостаткам данного метода относят: сложности выбора набора показателей «входа» и «выхода» исследуемых объектов; результаты оценки эффективности зависят от структуры и численности группы объектов; при существенном превышении суммарного количества показателей «входа» и «выхода» над количеством объектов группы оценки их эффективности некорректны. Несмотря на указанные недостатки, использование метода DEA для решения задач оценки медицинской эффективности медицинских учреждений, по мнению автора, актуально и представляет научно-практический интерес.

Цель исследования. Целью работы является определение на основе типовых показателей деятельности муниципальных медицинских учреждений Ханты-Мансийского автономного округа их эффективности предоставления медицинских услуг.

Материал и методы исследования

Метод DEA (Data Envelopment Analysis) является непараметрическим (оболочечным) анализом данных о функционировании рассматриваемой группы объектов (DMU – Decision Making Units) [7–9] и базируется на применении линейного программирования для построения непараметрической кусочно-линейной поверхности – границы их производственных возможностей (ГПВ). Объекты представляются в виде типовой функциональной модели системного анализа вида «вход – преобразование – выход». В рамках DEA определяется технологическая, в данном случае медицинская, эффективность объектов как расстояние между их расположением в про-

странстве показателей «вход – выход» и сформированной ГПВ. При этом предполагается, что все рассматриваемые объекты реализуют одинаковые или максимально схожие технологические способы преобразования «входов» (ресурсов) в «выходы». На текущий момент разработано достаточно большое количество DEA – моделей с постоянным и переменным масштабом отдачи ресурсов, используемых сравниваемыми между собой объектами [13]. В данной работе использовалась классическая входо-ориентированная CCR-модель (Charnes – Cooper – Rhodes model) с постоянным масштабом отдачи [13, 14]:

$$\begin{cases} \min_{\lambda} \theta \\ -y_{i,j} + Y\lambda \geq 0; \\ \theta x_k - X\lambda \geq 0; \\ \lambda \geq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь N – количество исследуемых DMU ($j = 1, \dots, N$); M – количество выходных показателей DMU ($i = 1, \dots, M$); K – количество входных показателей ($k = 1, \dots, K$); Y – матрица $[M \times N]$ выходных показателей $y_{i,j}$; X – матрица $[K \times N]$ входных показателей $x_{k,j}$; θ – скаляр; λ – вектор констант размерности $N \times 1$.

Величина θ_j является расчетной оценкой относительной технологической эффективности j -го объекта группы, которая изменяется в диапазоне от «0» до «1». При $\theta_j = 0$ соответствующий объект группы считается функционирующим неэффективно при принятом наборе входных и выходных показателей. Верно и обратное, если для j -го объекта $\theta_j = 1$, то его функционирование считается эффективным и объект располагается на ГПВ. Для тех объектов, у которых $0 < \theta_j < 1$, т. е. функционирующих недостаточно эффективно, с использованием показателей эффективных объектов («объекты-лидеры/ориентир») рассчитываются целевые значения входных показателей $x_{k,j,g}$. Обеспечение достижения таким объектом значений $x_{k,j,g}$ позволяет максимально повысить эффективность его функционирования до уровня $\theta_j = 1$. Расчет $x_{k,j,g}$ осуществляется согласно следующему выражению [13–15]:

$$x_{k,j,g} = \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{k,j,f}, \quad (2)$$

где λ_j – расчетные весовые коэффициенты, обеспечивающие подбор оптимального «объекта-лидера/ориентира» для неэффективного объекта.

Определение значений θ_j и $x_{k,j,g}$ проводилось в среде приложения MaxDEA 8 Basic (<http://maxdea.com/Download.htm>).

Совокупность лечебно-профилактических/медицинских учреждений муниципалитета можно рассматривать как обобщенное муниципальное медицинское учреждение (ОММУ), выступающее в роли DMU. Это обусловлено тем, что все ЛПУ муниципалитетов оказывают их жителям практически одинаковые медицинские услуги согласно правилам и протоколам, утвержденным Минздравом РФ. Ежегодные статистические показатели результатов деятельности медицинских организаций и учреждений округа публикуются Департаментом здравоохранения ХМАО-Югра в докладе «Здоровье населения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и деятельность медицинских организаций», который размещается на сайте Департамента и находится в открытом доступе (<https://dzhmao.admhmao.ru/statisticheskaya-informatsiya/>).

Для объектов, производящих конечный физический или абстрактный продукт, оказывающих клиентам услуги, входными показателями DEA-модели рекомендуется назначать затраты факторов труда L и капитала K . При отсутствии же таких данных можно использовать показатели, которые в той или иной мере заменяют K и L . Применительно к ОММУ такие данные в открытом доступе практически отсутствуют. Вследствие этого предлагается использовать показатели, приводимые в указанных ранее материалах и позволяющие в определенной степени заменить показатели K и L . Сопоставимость объектов – ОММУ – обеспечивалась пересчетом исходных данных (входных и выходных показателей) на 1000 жителей муниципалитета. Для замены затрат фактора капитала используются такие показатели, как: площадь ОММУ ($x_{1,j}$); количество коек, установленных в ОММУ ($x_{2,j}$); мощность амбулаторно-поликлинических отделений ОММУ ($x_{3,j}$). Фактор

затрат труда заменялся обеспеченностью жителей муниципалитета медицинским персоналом (врачами и средними медицинскими работниками) ($x_{4,j}$). Одним из преимуществ метода DEA, как отмечалось выше, является возможность учета влияния внешней среды на функционирование анализируемых объектов за счет включения соответствующих показателей во входные данные модели. В качестве такого показателя, по мнению автора, может выступать показатель количества врачебных посещений жителями муниципалитета ОММУ без учета выездов бригад скорой медицинской помощи ($x_{5,j}$). Показатели $x_{1,j}, \dots, x_{4,j}$, характеризующие ресурсы, находящиеся в распоряжении ОММУ, являются управляемыми менеджментом региональной системы здравоохранения различного уровня в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Выходным показателем для ОММУ может считаться объем оказанных медицинских услуг в стоимостном выражении, но данный показатель, как и показатели K и L , в открытом доступе практически не публикуется. Поэтому для его замены использовались такие показатели, как: количество листов временной нетрудоспособности (заболеваемость с временной утратой трудоспособности по всем причинам), оформленные ОММУ ($y_{1,j}$); удельный вес осмотренных от числа жителей муниципалитета, подлежащих периодическим профилактическим осмотрам ($y_{2,j}$); оборот койки круглосуточного стационара ОММУ ($y_{3,j}$); нагрузка обобщенного муниципального амбулаторно-поликлинического учреждения (%) ($y_{4,j}$).

Оценка медицинской эффективности функционирования ОММУ ХМАО-Югра проводилась методом «временного среза» для каждого года периода 2013–2020 гг.

Результаты исследования и их обсуждение.

Исходные данные перечисленных выше «входных» $x_{k,jf}$ ($K = 5, N = 13$) и «выходных» $y_{k,if}$ ($M = 4$) показателей деятельности ОММУ ХМАО-Югра из-за ограничений объема публикации не приводятся.

В табл. 1 совместно представлены:

- расчетные значения показателя медицинской эффективности θ_j ($j = 1, \dots, 13$) (1) деятельности ОММУ ХМАО-Югра за период с 2013 по 2020 г.;
- для недостаточно эффективных ОММУ ($0 < \theta_j < 1$) – номера «объектов-лидеров/ориентиров» и соответствующие значения λ_j , которые используются для расчета $x_{k,j,g} - j(\lambda_j)$.

Таблица 1

Расчетные значения показателя медицинской эффективности θ_j (1) и идентифицированные «объекты-лидеры/ориентиры» $j(\lambda_j)$ ОММУ ХМАО-Югра за период с 2013 по 2020 г.

Table 1

Estimated values of the indicator of medical effectiveness θ_j (1) and identified "objects-leaders/landmarks" $j(\lambda_j)$ of GMMI KhMAO-Yugra for the period from 2013 to 2020

j	Название ОММУ	Год			
		2013	2014	2015	2016
1	Когалым	1	1	1	1
2	Лангепас	1	1	1	1
3	Мегион	1	0,986	1	1
			7 (0,063); 9 (0,39); 10 (0,632)		
4	Нягань	0,882	1	0,842	0,863
		1 (0,016); 6 (0,259); 9 (0,0878); 10 (0,786)		2 (0,426); 8 (0,049); 10 (0,812)	9 (0,337); 10 (0,933)
5	Покачи	0,820	0,886	0,852	0,810
		1 (0,473); 10 (0,527)	1 (0,52); 7 (0,061); 10 (0,494)	1 (0,254); 7 (0,008); 9 (0,373); 10 (0,362)	1 (0,198); 3 (0,031); 9 (0,165); 10 (0,626)

<i>j</i>	Название ОММУ	Год			
		2013	2014	2015	2016
6	Пыть-Ях	1	1	1	1
7	Радужный	0,972	1	1	1
		2 (0,168); 10 (0,826)			
8	Урай	0,979	0,922	1	1
		2 (1,042); 10 (0,170)	2 (0,463); 9 (0,151); 10 (0,529)		
9	Югорск	1	1	1	1
10	Нефтеюганск	1	1	11	1
11	Нижневартовск	0,934	1	0,955	0,987
		10 (0,989)		2 (0,208); 7 (0,052); 9 (0,255); 10 (0,468)	7 (0,045); 9 (0,359); 10 (0,581)
12	Сургут	0,919	0,862	1	1
		10 (1,102)	10 (1,037)		
13	Ханты-Мансийск	0,706	0,940	0,641	0,674
		10 (0,987)	6 (0,434); 7 (0,587)	2 (0,758); 10 (0,263)	8 (0,294); 10 (0,714)
1	Когалым	1	1	1	1
2	Лангепас	1	1	1	1
3	Мегион	1	1	1	1
4	Нягань	0,799	0,898	1	0,909
		1 (0,051); 2 (0,119); 3 (0,684); 10 (0,237)	3 (0,474); 10 (0,387); 12 (0,282)		1 (0,187); 3 (0,539); 12 (0,436)
5	Покачи	0,962	0,881	1	1
		1 (0,510); 3 (0,532); 10 (0,004)	1 (0,201); 3 (0,053); 9 (0,144); 10 (0,62)		
6	Пыть-Ях	1	1	1	1
7	Радужный	1	1	1	1
8	Урай	0,888	1	0,764	0,932
		2 (1,062); 6 (0,01); 10 (0,028)		1 (0,354); 2 (0,446); 4 (0,159); 6 (0,049)	7 (0,07); 9 (0,846); 12 (0,138)
9	Югорск	1	1	0,953	1
				1 (0,385); 2 (0,352); 3 (0,253); 4 (0,015); 12 (0,005)	
10	Нефтеюганск	1	1	1	1

Окончание табл. 1
Table 1 (end)

<i>j</i>	Название ОММУ	Год			
		2013	2014	2015	2016
11	Нижневартовск	0,998	1	0,983	1
		2 (0,252); 3 (0,262); 10 (0,436); 12 (0,045)		1 (0,0348); 2 (0,226); 3 (0,512); 4 (0,139); 12 (0,085)	
12	Сургут	1	1	1	1
13	Ханты-Мансийск	0,706	0,896	0,977	0,725
		6 (0,471); 10 (0,287); 12 (0,272)	7 (0,605); 12 (0,698)	06 (0,237); 12 (1,16)	10 (0,642); 12 (0,587)

Более 60 % ОММУ округа в течение всего рассматриваемого интервала времени демонстрируют высокую эффективность своей деятельности. Незначительное снижение эффективности функционирования наблюдается у ОММУ г. Сургута в 2013 и 2014 гг. Показатели эффективности деятельности ОММУ г. Нижневартовска и г. Урай колеблются вблизи максимального значения. Более существенные колебания значений θ_j характеризуют деятельность ОММУ г. Нягань. Достаточно устойчивый тренд роста θ_j с выходом на максимальное значение сформировался у ОММУ г. Покачи. Наименьшие значения эффективности с достаточно высокой волатильностью значений соответствуют деятельности ОММУ г. Ханты-Мансийска.

Значения $x_{k,j,g}$ для ОММУ, функционирование которых характеризуется расчетными значениями показателя θ_j : $0 < \theta_j < 1$, определяются согласно (2), где используются фактические значения $x_{k,j,f}$ объектов группы с $\theta_j = 1$ в соответствующем году рассматриваемого временного интервала. Эти объекты можно рассматривать как потенциальные кандидаты на роль эффективного «объекта-лидера/ориентира» для рассматриваемой группы объектов, хотя метод DEA явно его не идентифицирует. Однако как для менеджмента непосредственно исследуемых ОММУ, так и для менеджмента региональной системы здравоохранения определение такого объекта достаточно актуально, так как его показатели можно использовать как ориентир при подготовке и реализации управленческих решений различного уровня. Определение эффективного «объекта-лидера/ориентира» в рассматриваемой выборке ОММУ предлагается осуществлять на основе анализа частоты участия ОММУ с $\theta_j = 1$ в расчете целевых значений входных показателей для неэффективных ОММУ. Анализ данных табл. 1 позволяет заключить, что «объектом-лидером/ориентиром» в течение всего рассматриваемого интервала времени является ОММУ г. Нефтеюганска, так как его показатели использовались при расчетах $x_{k,j,g}$ (3) неэффективных ОММУ 26 раз с достаточно большими весовыми коэффициентами λ_j . Далее следует ОММУ г. Юганска и г. Сургута, причем на эту позицию последнее медицинское учреждение вышло за период с 2017 г. Таким образом, присутствуют определенные тенденции изменения не только непосредственно показателя медицинской эффективности, но позиции ОММУ в качестве «объекта-лидера/ориентира», что достаточно актуально для менеджмента медицинских учреждений и региональной системы здравоохранения в целом.

В табл. 2 для ОММУ г. Нягань и г. Ханты-Мансийска приведены значения $\alpha_{k,j}$, характеризующие расхождение между фактическими значениями $x_{k,j,f}$ и соответствующими целевыми расчетными значениями $x_{k,j,g}$ для ОММУ г. Нягань и ОММУ г. Ханты-Мансийска:

$$\alpha_{k,j} = \frac{x_{k,j,f} - x_{k,j,g}}{x_{k,j,f}}. \quad (3)$$

Таблица 2

Значения $\alpha_{k,j}$ для ОММУ г. Нягань и ОММУ г. Ханты-Мансийска

Table 2

Values $\alpha_{k,j}$ for GMMI Nyagan city and GMMI Khanty-Mansiysk city

Год	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
ОММУ г. Нягань					
2013	0,207	0,233	0,244	0,108	0,126
2015	0,180	0,172	0,148	0,162	0,184
2016	0,201	0,126	0,226	0,140	0,222
2017	0,202	0,261	0,222	0,201	0,177
2018	0,112	0,028	0,093	0,102	0,230
2020	0,223	0,091	0,091	0,106	-0,468
ОММУ г. Ханты-Мансийска					
2013	0,383	0,591	0,402	0,682	0,294
2014	0,327	0,462	0,325	0,331	0,060
2015	0,497	0,505	0,362	0,558	0,359
2016	0,412	0,353	0,326	0,647	0,352
2017	0,318	0,411	0,294	0,550	0,294
2018	0,144	0,196	0,104	0,497	0,104
2019	0,406	0,469	0,261	0,625	0,436
2020	0,275	0,316	0,275	0,564	0,344

Значения $\alpha_{k,j}$ указывают на наличие в ОММУ г. Нягань и г. Ханты-Мансийска существенных резервов ресурсов x_1, \dots, x_4 , которые являются «управляемыми» менеджментом системы здравоохранения округа как в краткосрочной, так и долгосрочной перспективе. Частично данную ситуацию нивелируют значения показателя x_5 , который, как отмечалось ранее, характеризует внешнее окружение ОММУ, в том числе и заболеваемость в этих муниципалитетах. Существенное снижение значения $x_{5,4,r}$ для ОММУ г. Нягань в 2020 г. обусловлено изменением режима работы этого медицинского учреждения в условиях пандемии. Применительно к ОММУ г. Ханты-Мансийска наличие резервов ресурсов x_1, \dots, x_4 обусловлено тем, что в данном муниципалитете расположена Центральная окружная клиническая больница (ОЦКБ). Следует также отметить наличие резервов указанных ресурсов у всех муниципальных ОММУ, которые пусть и эпизодически, но имеют недостаточно высокие расчетные значения показателя θ_j (см. табл. 1).

Заключение и выводы

Получены расчетные оценки медицинской эффективности муниципальных медицинских учреждений Ханты-Мансийского автономного округа за период с 2013 по 2020 г. Для получения этих оценок использовалась типовая входо-ориентированная DEA-модель, входные и выходные показатели которой формировались на основании типовой статистики медицинских учреждений. Согласно полученным оценкам более 60 % ММУ ХМАО-Югра в течение указанного периода функционировали с максимальной медицинской эффективностью. Недостаточно высокая медицинская эффективность остальных ММУ округа обусловлена наличием в их распоряжении существенных резервов используемых ресурсов (входные показатели DEA-модели). Это является следствием последовательно проводимой администрацией округа социально-ориентированной политики, где развитие и укрепление региональной системы здравоохранения занимает ключевое место. Для недостаточно эффективных ММУ округа были определены целевые значения входных показателей (ресурсов), достижение которых обеспечит достижение этими учреждениями максимальной медицинской эффективности. Метод DEA однозначно не определяет самый эффективный «объект-лидер/ориентир» исследуемой группы объектов. Однако частота использования эффективных объектов группы и соответствующие им величины весовых коэффициентов, используемые при расчете целевых значений входных показателей неэффективных объектов, позволяют рекомендательно выделить эффективный «объект-лидер/ориентир». Это достаточно актуально при разработке индивидуальных и системных управленческих решений сопровождения функционирования и развития медицинских учреждений региона, а также мониторинга их реали-

зации. Использование метода оболочечного анализа данных (метод DEA), по мнению автора, достаточно актуально при решении задач оценки эффективности учреждений и организаций, деятельность которых связана с социальной сферой. Вместе с тем целесообразно интегрировать в предложенный автором перечень входных и выходных данных – модели, показатели, характеризующие финансово-экономический аспект деятельности рассматриваемых медицинских учреждений, что повысило бы значимость получаемых оценок эффективности.

Список литературы

1. Орлов Е.М., Соколова О.Н. Категория эффективности в системе здравоохранения // *Фундаментальные исследования*. 2010. № 4. С. 70–75.
2. Кочуров Е.В. Оценка эффективности деятельности лечебно-профилактических учреждений: сравнительный анализ методов и моделей // *Вестник СПбГУ. Менеджмент*. 2005. № 3. С. 110–128.
3. Курнакина Н.В. Методика комплексной оценки эффективности деятельности медицинской организации за год // *Инновации и инвестиции*. 2017. № 2. С. 137–140.
4. Старых Н.П., Егорова А.В. Значение целевых показателей национального проекта «здравоохранение» в оценке эффективности регионального здравоохранения // *Среднерусский вестник общественных наук*. 2020. Т. 15, № 1. С. 143–161. DOI: 10.22394/2071-2367-2020-15-1-143-161
5. Современные подходы к оценке эффективности использования ресурсов здравоохранения (обзор) / Р.А. Хальфин, С.А. Орлов, В.В. Мадьянова и др. // *Проблемы стандартизации в здравоохранении*. 2020. № 3-4. С. 3–12. DOI: 10.26347/1607-2502202003-04003-012
6. Положенцева Ю.С., Муштенко Н.С., Хомутичкина А.Д. Анализ эффективности системы здравоохранения: основные тенденции развития и перспективы модернизации // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент*. 2020. Т. 10, № 3. С. 123–139.
7. Столбов А.П., Кузнецов П.П., Мадьянова В.В. Расчет затрат на выполнение медицинской услуги на основе ресурсной модели // *Врач и информационные технологии*. 2013. № 1. С. 6–17.
8. Столбов А.П., Кузнецов П.П., Кобяцкая Е.Е. О стандартизации алгоритмов расчета косвенных затрат при расчете себестоимости медицинских услуг // *Проблемы стандартизации в здравоохранении*. 2017. № 7-8. С. 42–48.
9. Зурнаджянц Ю.А., Кашкарова И.А., Шаповалова Д.А. Экономическая оценка эффективности оказания медицинской помощи с учетом качества лечения // *Наука Красноярья*. 2019. Т. 8, № 5. С. 36–49. DOI: 10.12731/2070-7568-2019-5-36-49
10. Ямщиков А.С., Килина Е.В., Моргунов Е.П. Применение метода Data Envelopment Analysis для оценки эффективности функционирования лечебно-профилактических учреждений г. Красноярска // *Информационные недра Кузбасса – 2003: сб. тр. конф. Кемерово, 2003*. С. 230–232.
11. Шугалей А.П., Чевтаева В.В., Долганова А.А. Применение метода Data Envelopment Analysis для оценки эффективности функционирования отделений медицинских учреждений // *Решетневские чтения*. 2018. Т. 2. С. 372–373.
12. Ильин И.В., Чемерис О.С., Сарыгулов А.И. Аналитический обзор подходов к оценке эффективности функционирования медицинских организаций в условиях изменения основных бизнес-процессов в системе здравоохранения // *Наука и бизнес: пути развития*. 2021. № 10 (124). С. 57–64.
13. Селамзаде Ф.Д. Оценка эффективности системы здравоохранения Российской Федерации с помощью оболочечного анализа данных: на примере республик // *Globus: Экономика и юриспруденция*. 2021. Т. 7, № 1 (41). С. 7–20.
14. Cheng G. *Data Envelopment Analysis: Methods and MaxDEA Software*. Beijing: Intellectual Property Publishing House Co. Ltd., 2014. 275 p.
15. Моргунов Е.П., Моргунова О.Н. Краткое описание метода Data Envelopment Analysis [Электронный ресурс]. URL: http://morgunov.org/docs/DEA_intro.pdf (дата обращения: 11.07.2022).

References

1. Orlov E.M., Sokolova O.N. [Efficiency category in the healthcare system]. *Fundamental research*. 2010;4:70–75. (In Russ.)
2. Kochurov E.V. [Evaluation of the effectiveness of the activities of medical institutions: a comparative analysis of methods and models]. *Vestnik of Saint-Petersburg university. Management*. 2005;8(3):110–128. (In Russ.)

3. Kurnakina N.V. [Methodology for a comprehensive assessment of the effectiveness of a medical organization for a year]. *Innovations and investments*. 2017;2:137–140. (In Russ.)
4. Starykh N.P., Egorova A.V. Target indicators of the national health project in determining the effectiveness of regional healthcare. *Central Russian journal of social sciences*. 2020;15(1):143–161. (In Russ.) DOI: 10.22394/2071-2367-2020-15-1-143-161
5. Khalfin R.A., Orlov S.A., Madyanova V.V., Stolbov A.P., Kachkova O.E. Modern approaches to assessing the effectiveness of health resource use (overview). *Health care standardization problems*. 2020;3-4:3–12. (In Russ.) DOI: 10.26347/1607-2502202003-04003-012
6. Polozhentseva Yu. S., Mustenko N. S., Khomutinnikova A. D. Analysis of health system effectiveness: main development trends and prospects for modernization. *Proceedings of the South-West state university. Economy. Sociology. Management*. 2020;10(3):123–139. (In Russ.)
7. Stolbov A.P., Kuznetsov P.P., Madyanova V.V. Expenses estimation for medical service performance on the basis of resource model. *Medical doctor and information technologies = Vrach i informacionnye tehnologii*. 2013;1:6–17. (In Russ.)
8. Stolbov A.P., Kuznetsov P.P., Kobiatskaia E.E. The standardization of algorithms for the calculation of indirect costs when conducting clinical and economic analysis of medical technologies. *Medical doctor and information technologies = Vrach i informacionnye tehnologii*. 2017;7-8:42–48. (In Russ.)
9. Zurnadzhants Yu.A., Kashkarova I.A., Shapovalova D.A. Economic evaluation of the effectiveness of medical care, taking into account the quality of treatment. *Krasnoyarsk Science*. 2019;8(5):36–49. (In Russ.) DOI: 10.12731/2070-7568-2019-5-36-49
10. Yamshchikov A. S., Kilina E. V., Morgunov E. P. [Application of the Data Envelopment Analysis method to assess the effectiveness of the functioning of medical institutions in Krasnoyarsk]. In: *Informatsionnyye nedra Kuzbassa – 2003: sb. tr. konf.* [Information bowels of Kuzbass: Proceedings of the conference]. Kemerovo; 2003. P. 230–232. (In Russ.)
11. Shugaley A. P., Chevtaeva V. V., Dolganova A. A. Application of the data envelopment analysis method for measuring of efficiency of departments of medical institution. *Reshetnev readings*. 2018;2:372–373. (In Russ.)
12. Ilyin I.V., Chemeris O.S., Sarygulov A.I. [Analytical review of approaches to assessing the effectiveness of the functioning of medical organizations in the context of changes in the main business processes in the healthcare system]. *Science and business: development ways*. 2021;124(10):57–64. (In Russ.)
13. Selamzade F.D. Evaluation of the efficiency of the healthcare systems of the Russian Federation with data envelopment analysis: an example of republics. *Globus: Economy and Law*. 2021;7(1(41)):7–20. (In Russ.)
14. Cheng G. *Data Envelopment Analysis: Methods and MaxDEA Software*. Beijing: Intellectual Property Publishing House Co. Ltd.; 2014. 275 p.
15. Morgunov E.P., Morgunova O.N. *Kratkoye opisaniye metoda Data Envelopment Analysis* [Brief description of the Data Envelopment Analysis method] [Electronic resource]. Available at: http://morgunov.org/docs/DEA_intro.pdf (accessed 11 July 2022).

Информация об авторах

Кутышкин Андрей Валентинович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории имитационного моделирования, Нижневартковский государственный университет, Нижневартовск, Россия; avk_200761@mail.ru.

Шульгин Олег Валерьевич, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры физико-математического образования, Нижневартковский государственный университет, Нижневартовск, Россия; shul.oleg.val@mail.ru.

Information about the authors

Andrey V. Kutyskin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Simulation, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia; avk_200761@mail.ru.

Oleg V. Shulgin, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Physics and Mathematics Education, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia; shul.oleg.val@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 07.10.2022

The article was submitted 07.10.2022

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ЗАДАЧ

Ю.И. Володина¹, julia_volodina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0936-0638>
К.А. Старикова², xenista@mail.ru

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

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема недооценки или переоценки времени выполнения задач в компании. Произведена выгрузка задач из системы управления проектами. Определены основные причины неправильного оценивания, которые связаны с тем, что оценку задач проводит только руководитель компании и при этом не учитывается проект, по которому выполняется задача, и сотрудник, который ее выполняет. **Цель исследования:** повышение точности оценки продолжительности выполнения задач с учетом выбранного сотрудника и проекта, по которому выполняется задача. **Материалы и методы.** Для повышения точности оценки продолжительности задач была разработана модель, описывающая процесс постановки задач и работы над задачами. Для корректной постановки задачи были определены управляемые, неуправляемые внешние факторы и внутренние параметры рассматриваемой системы, сформулирован критерий точности оценки продолжительности выполнения задачи. Проведен анализ исходной ситуации, вычисленная точность оценки составила 1,26. В процессе анализа были выделены 3 категории и 33 типа задач. Произведен выбор экспертов в группы для оценки времени выполнения задач разных типов. Вычислены коэффициенты компетентности каждого эксперта. Рассчитана оценка времени выполнения каждого типа задачи с учетом веса значимости голоса экспертов. Сделан вывод, что экспертная оценка не в полной мере решает поставленную проблему. Предложен алгоритм адаптивной оценки продолжительности выполнения задач, в основу которого входит время, вычисленное экспертами, с учетом личных коэффициентов сотрудников, выполняющих поставленную задачу. Составлена трехмерная матрица весовых коэффициентов, в которой учитывается проект, тип задачи и сотрудник, который будет выполнять задачу. Соответствующие коэффициенты матрицы регулярно обновляются после выполнения задач, что позволяет учитывать индивидуальные особенности каждого сотрудника и отслеживать прогресс в скорости выполнения однотипных задач. Ввиду специфики работы в компании при расчете коэффициентов был введен параметр «забывания», позволяющий увеличивать планируемое время выполнения задачи ввиду давности работы над проектом. **Результаты.** Представленный алгоритм был реализован в существующей системе управления проектами. Разработанная система пытается адаптироваться под личные особенности каждого сотрудника и как можно более точно оценить лично его время выполнения какой-либо задачи. Предложенный алгоритм адаптивной оценки работал в течение 3 месяцев, за которые было выполнено более 2000 задач. Вычисленная точность оценки составила 0,74. Улучшение точности составило 41 %. **Заключение.** Разработанный алгоритм и модуль для системы управления проектами позволил существенно повысить точность определения времени выполнения каждой задачи в системе управления, время на оценку задач уменьшилось до нескольких секунд за счет возможности оценки любым из сотрудников, а также улучшился процесс декомпозиции задач. В дальнейшем планируется добавить систему автоматического определения типа задачи.

Ключевые слова: оценка продолжительности задач, экспертная оценка, адаптивная оценка, поддержка сайтов, алгоритм, матрица коэффициентов, система поддержки пользователей, управление проектами

Для цитирования: Володина Ю.И., Старикова К.А. Разработка алгоритма адаптивной оценки продолжительности выполнения проектных задач // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 67–81. DOI: 10.14529/ctcr230106

ADAPTIVE ALGORITHM OF ESTIMATING PROJECT TASK DURATION

Yu.I. Volodina¹, julia_volodina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0936-0638>
K.A. Starikova², xenista@mail.ru

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

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The article deals with the problem of underestimation or overestimation of time required for any particular task in a company to be completed. Tasks were exported from the help desk software. The main reasons of incorrect time evaluation are determined: tasks complete time is evaluated only by the head of the company, and tasks project and employee who perform the task are not considered. **Objective of the study.** Increasing the accuracy of estimating task duration with considering of selected employee and task project. **Materials and methods of research.** A model that describes the process of setting tasks and working on tasks is developed for increasing task duration estimation. Controllable, uncontrollable external factors and internal parameters of the system are defined for the right problem definition and criteria for estimating the duration of the task is drafted. The analysis of the initial situation is carried out, the computed estimation accuracy is 1.26. 3 categories and 33 types of tasks are identified during the analysis. The experts are grouped to estimate the execution time of tasks of different types. The coefficients of each expert's competences are calculated. An estimate of the execution time for each type of task is calculated, with considering the weight of the relevance of each expert. The conclusion that expert assessment do not fully solve the problem is made. Adaptive algorithm of estimating project task duration is proposed, which is based on the time calculated by experts, with considering the personal coefficients of employee who performs the task. A three-dimensional weighting matrix, which consider the project, the type of task, and the employee who will perform the task, is created. The corresponding matrix coefficients are regularly updated after the task is completed, which makes it possible to take into account the individual characteristics of each employee and track the time progress of performing tasks of the same type. Due to the specifics of work in the company, when calculating the coefficients, the "forgetting" parameter is introduced, which allows to increase the planned time for completing the task due to last time when employee completed task of this project. **Results.** The algorithm is implemented in the company help desk software. The system with the algorithm is trying to adapt to the personal characteristics of each employee and to estimate more accurately personally his time to complete any task. The suggested adaptive algorithm worked for 3 months, during which more than 2000 tasks were completed. The calculated estimation accuracy is 0.74. The improvement in accuracy is 41%. **Conclusion.** The algorithm and developed module for company help desk software made it possible to significantly increase the accuracy of determining the time to complete each task, the time for task evaluation is reduced to several seconds due to the possibility of evaluation by any of the employees, and the task decomposition process is improved. In the future, it is planned to add a text recognition system to automatically determine the type of task.

Keywords: estimating task duration, expert evaluation, adaptive evaluation, website technical support, algorithm, coefficient matrix, help desk software, project management

For citation: Volodina Yu.I., Starikova K.A. Adaptive algorithm of estimating project task duration. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1): 67–81. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230106

Введение

В современном мире трудно представить компанию, у которой вообще нет никакого сайта. Сайты используют для представления своей компании, для рекламы, для продажи товаров, а некоторые учреждения вообще не могут не иметь сайта, так как их обязывает закон РФ [1].

В Пермском крае существует компания, которая занимается разработкой и поддержкой сайтов по всей России. Компании уже 14 лет, а на протяжении 10 лет в ней используется система управления проектами [2]. В эту систему могут добавлять задачи как клиенты, так и сотрудники компании.

Система управления учитывает абсолютно все задачи в компании, всех исполнителей и тех, кто ставит задачи, также фактическое время выполнения задачи, срок и т. п.

1. Анализ текущей ситуации

Одним из важных аспектов работы компании является планирование работы [3–5]. Для того чтобы правильно планировать работу компании и загруженность сотрудников, очень важно знать продолжительность выполнения каждой задачи [6]. Оценка продолжительности задач нужна не только для того, чтобы знать общую продолжительность работы над проектом, но и для того, чтобы по каждой задаче можно было сказать клиенту, когда она будет выполнена, чтобы самим понимать, сколько задач можно взять в работу, например, одну задачу в день или 10 задач и так далее [7].

На рис. 1 представлена выгрузка выполненных задач в *Excel* из системы управления. Указаны задача, проект, к которому она относится, планируемое время, фактическое время выполнения и, собственно, специалист, который эту задачу выполнял. Как правило, фактическое время не совпадает с плановым.

Проект	Заголовок	Описание	Дата	Время факт	Время план	Вложений	Исполнитель
Музей	Отрисовать баннер	На главной странице	01.03.2021	0:37:15	0:30:00	1	Специалист 2 (Д)
Музей	Разместить выставку на сайте музея	Экспозиция «Фридрих Лехт»	01.03.2021	0:10:15	0:05:00	1	Специалист 6 (П)
Больница	Разместить статистику по коронавирусу на сайте	По состоянию на 1 марта 2021 года...	01.03.2021	0:02:00	0:05:00	0	Специалист 7 (П)
Сайт доставки суши	Добавление функционала отключения корзины после закрытия заведения	Сейчас нужно сделать так, чтобы оплата за заказ не принималась после 22:50 с ВС - ЧТ, а в ПТ - СБ после 00:20 (за 10 мин до закрытия). С 8 каждый день уже можно эту функцию отключать и снова принимать заказы.	01.03.2021	4:36:00	3:00:00	0	Специалист 3 (Р)
Льбжная база	Нужно разместить информацию на сайте	Памятки во вложении	01.03.2021	0:07:30	0:05:00	1	Специалист 8 (П)
ГТО	Разместить расписание ГТО	Фото расписания во вложении	01.03.2021	0:03:12	0:05:00	1	Специалист 6 (П)
УДНТ	Разместить виджет Культура РФ	Код виджета прикрепляю	01.03.2021	0:03:10	0:05:00	0	Специалист 5 (Р)
Архив	Продление домена	Пришло письмо, что истекает домен сайта, прошу продлить	01.03.2021	0:09:15	0:10:00	0	Специалист 7 (П)
Музыкальная школа	Разместить информацию	Всероссийская акция "Мы Вместе". Описание во вложении	01.03.2021	0:12:15	0:10:00	1	Специалист 6 (П)
Медицинский центр	Дополнить раздел УЗИ новым врачом	Информацию и фото возьмите с сайта	01.03.2021	0:07:13	0:10:00	0	Специалист 8 (П)
Управление культуры	Удалить документы	Удалить из раздела План ФХД документы 2015 года	01.03.2021	0:05:46	0:03:00	0	Специалист 6 (П)
Банный комплекс	Верстка главной страницы сайта	Макет доступен в Figma	01.03.2021	6:13:00	5:00:00	0	Специалист 4 (Р)
Стоматология	Разместить режим работы стоматологов на март	Таблица во вложении	01.03.2021	0:12:39	0:15:00	1	Специалист 7 (П)
Магазин детских товаров	Добавление формы задать вопрос на сайте	Добавьте, пожалуйста, форму для клиентов на сайте	01.03.2021	1:15:36	0:45:00	0	Специалист 3 (Р)

Рис. 1. Пример выполненных задач
Fig. 1. An example of completed tasks

Основной причиной задержки выполнения задач является неправильная оценка времени. Если объем работы можно посчитать и оформить это в техническом задании, то оценка времени обычно является субъективным параметром. Это негативно влияет на работу компании, на планирование следующих задач, на работу с клиентами.

Следовательно, в компании существует проблема недооценки или переоценки планового времени выполнения задач по следующим причинам.

1. Каждая задача оценивается субъективно только руководителем; руководитель не всегда имеет время правильно оценить задачу, так как задач много, на оценку также тратится много времени.

2. Руководитель не всегда достаточно компетентен в вопросе сложности выполнения всех задач и может ошибиться со временем в большую или меньшую сторону.

3. Оценка задачи происходит без учета особенностей проекта и исполняющего ее сотрудника (сотрудники бывают разные, проекты бывают разные, сотрудники могут заменять друг друга, сотрудник может медленнее выполнять задачу, если он давно занимался этим проектом или это новый сотрудник) [8].

Исходя из этого, была сформулирована цель работы, которая заключается в повышении точности оценки продолжительности выполнения задач с учетом особенностей сотрудников и проектов, по которым выполняется задача.

При исследовании были рассмотрены существующие методы оценки продолжительности задач [9, 10]:

- экспертные оценки;
- оценки по аналогам;
- оценка по трем точкам (*PERT*);
- параметрическая оценка;
- метод *Planning Poker*.

Все эти методы не подходят для решения существующей проблемы, так как требуют постоянную экспертную оценку каждой поступающей задачи – это неудобно, не везде учитываются специалисты, выполняющие задачу, и при переназначении специалиста придется проводить оценку заново [11]. Также были рассмотрены несколько существующих программных продуктов, но они в основном помогают удаленно провести голосование между сотрудниками по оценке задач каким-либо методом [12–15].

2. Постановка задачи

Для повышения точности оценки продолжительности задач была разработана модель, описывающая процесс постановки задач и работы над задачами.

Для корректной постановки задачи были определены управляемые \vec{X}_1 , неуправляемые \vec{Z} внешние факторы и внутренние параметры \vec{X}_2 рассматриваемой системы, а также \vec{W} – вектор условий, при которых считается приемлемым реакция системы Y .

Общая постановка задачи выглядит следующим образом: вектор внешних факторов \vec{X}_1^0 , значения элементов которого сложились к начальному моменту, требуется изменить на $\vec{\Delta X}_1$ так, чтобы разница между начальным значением реакции системы Y_0 и значением, достигнутым по истечении заданного времени Y_1 , улучшилась за счет ресурсов управления и была не меньше некоторой наперед заданной величины ε , часто задаваемой процентным отношением, при условиях \vec{W} , а также известных пределах, в которых могут меняться компоненты векторов \vec{X}_2 и \vec{Z} .

$$\vec{\Delta X}_1 : \frac{|Y_1 - Y_0|}{Y_0} \geq \varepsilon \left/ \begin{cases} W_i \geq W_i^{\min} \quad \forall i = \overline{1, I} \\ X_{2j}^{\min} \leq X_{2j} \leq X_{2j}^{\max} \quad \forall j = \overline{1, J}, \\ Z_k^{\min} \leq Z_k \leq Z_k^{\max} \quad \forall k = \overline{1, K} \end{cases} \right.$$

где верхними индексами \max и \min обозначены пределы изменения элементов соответствующих векторов размерностей I, J и K соответственно, $Y_0 = Y(\vec{X}_1^0, \vec{X}_2, \vec{W}, \vec{Z})$, $Y_1 = Y(\vec{X}_1^0 + \vec{\Delta X}_1, \vec{X}_2, \vec{W}, \vec{Z})$.

В качестве внешнего управляемого фактора для оценки продолжительности задач выступает вектор \vec{X}_1 , в данном случае представленный скалярной величиной $t_{\text{п}}$ – планового времени, ко-

торое задается руководителем при поступлении задачи. Этот фактор зависит от таких решений руководителя, как:

- выбор сотрудника. Разные сотрудники в зависимости от своей квалификации, набора компетенций и опыта работы над конкретным проектом могут выполнять задачи за разное время;
- декомпозиция задач. Задачи могут быть достаточно объемными по количеству работы, что затрудняет оценку их продолжительности. Например, одна большая задача может включать в себя подзадачи, которые выполняются сотрудниками разных направлений, и оценить суммарное время их совместной работы сложно, ведь подзадачи могут выполняться как последовательно, так и одновременно. Также при плохой декомпозиции существует проблема нехватки исходных данных, которая обнаружится в процессе выполнения задачи и приостановит ее выполнение на неопределенный срок.

В качестве внутреннего параметра модели \vec{X}_2 в нашем случае по аналогии с внешними управляемыми факторами выступает фактическое время выполнения задачи t_{ϕ} , которое зависит от индивидуальных человеческих особенностей:

- компетенции сотрудника. Каждый сотрудник имеет свое направление деятельности и выполняет свои типы задач. Есть «универсальные» сотрудники, которые обладают полным набором компетенций (дизайн, разработка, поддержка), но даже в этом случае скорость выполнения «нетипичных» задач будет существенно ниже;
- давность работы над проектом. За то время, пока сотрудник не занимался данным проектом в силу различных причин, в нем могли произойти существенные изменения, и необходимо время, чтобы заново разобраться. Также понадобится дополнительное время, чтобы вспомнить структуру или особенности давнего проекта, даже если в нем не произошло изменений;
- переквалификация сотрудников или новые сотрудники. В случае изменения направления работы старых сотрудников или приема на работу новых необходимо больше времени на выполнение задач.

Неуправляемыми факторами модели \vec{Z} являются следующие:

- смена сотрудника в процессе выполнения задачи. Время выполнения задач может составлять несколько часов, за это время могут возникнуть различные обстоятельства, которые не позволят данному сотруднику продолжать работу над задачей, следовательно, задача перейдет другому сотруднику. Это повлечет за собой временные потери на «погружение» в задачу, понимание, что уже было сделано предыдущим сотрудником и т. д., а значит, планируемое время не сможет совпасть с фактическим;
- добавление данных в процессе выполнения задачи. Заказчик в процессе работы над задачей может «вспомнить» некоторые детали, добавить новые файлы или даже попытаться расширить функционал разрабатываемого сайта;
- сбой в работе. В ходе работы данные могут не сохраниться ввиду перебоев в работе хостинга, вирусов на сайте и др., а это значит, что работу придется делать повторно;
- смена ответственного за постановку задач. Чаще всего на проект назначается один представитель от заказчика, ответственный за постановку задач компании (или несколько, но каждый по своему направлению). В случае смены ответственного постановка задачи может поменяться, что потребует увеличения времени на выполнение. Бывали ситуации, когда после смены ответственного текст новости и фотографии к ней начинали присылаться не отдельными файлами, а в одном документе MS Word, что увеличивало время на сохранение фотографий из документа в нужном формате. Также в текстах задач может появиться большое количество грамматических ошибок, и сотрудникам приходится редактировать тексты для приемлемого вида на страницах сайта.

Для вектора ограничений \vec{W} :

- на задачу должен быть назначен только один сотрудник в каждый момент времени;
- количество сотрудников в компании ограничено;
- максимальное время на выполнение основывается на здравом смысле и условиях работы над задачей и не должно стремиться к бесконечности.

Для оценки точности планирования задач будем использовать формулу

$$S = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(1 - \frac{t_k^\phi}{t_k^{\text{п}}}\right)^2} / n, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$ – номер задачи; t_k^ϕ – фактическое время выполнения задачи; $t_k^{\text{п}}$ – планируемое время выполнения задачи; n – количество задач. В качестве Y_0 примем значение S , рассчитанное по исходным данным, а Y_1 – значение S , изменившееся за счет ресурсов управления. Будем считать, что улучшение точности оценки должно составлять $\varepsilon = 20\%$.

Также следует учитывать, что необходимо точно спрогнозировать время выполнения задачи в зависимости от различных факторов и возможностей сотрудников, а не пытаться заставить сотрудников укладываться в назначенное время.

3. Расчет ошибки

Для оценки исходной ситуации была сделана выгрузка из 1000 задач с 1 марта 2021 г. по 31 мая 2021 г., фрагмент её показан на рис. 2.

Проект	Заголовок	Описание	Дата	Время факт	Время план	Вложений	Исполнитель	Отклонение
...
Сайт доставки суши	Ari Tillyrad + iKO сравнение	Необходимо сравнить две системы, сделать выводы	31.05.2021	3:00:00	2:00:00	0	Специалист 3 (Р)	0,5000
Больница	Разместить новость на сайте	Новость во вложении	31.05.2021	0:05:16	0:05:00	1	Специалист 6 (П)	0,0533
Больница	Разместить новость на сайте	Новость можно скопировать из группы вк от 27.05	31.05.2021	0:04:50	0:05:00	0	Специалист 7 (П)	0,0333
Больница	Разместить статистику по коронавирусу на сайте	По состоянию на 31 мая 2021 года...	31.05.2021	0:03:15	0:03:00	0	Специалист 6 (П)	0,0833
ИМ кирпичей	изменение наименования у газоблока	В наименовании газоблока неверно указана ширина, пожалуйста, исправьте	31.05.2021	0:03:12	0:05:00	0	Специалист 6 (П)	0,3600
ИМ соли для ванн	Разместить новый отзыв	Разместите отзыв с сайта. Ссылка на отзыв...	31.05.2021	0:16:00	0:20:00	0	Специалист 6 (П)	0,2000
Учебный центр	Ошибка безопасного подключения на сайте	Установка ssl сертификата	31.05.2021	0:03:00	0:05:00	0	Специалист 6 (П)	0,4000
Учебный центр	Продление домена		31.05.2021	0:05:00	0:05:00	0	Специалист 6 (П)	0,0000
ИМ мебели	Отображение кликабельных фото на главной странице - откорректировать работу шаблона		31.05.2021	5:05:00	4:00:00	0	Специалист 4 (Р)	0,2708
ИМ мебели	Включить / Выключить отображение добавления текста названия установленной ткани к названию товара	Необходимо завести свойство товара, для того, чтобы можно было включать вывод ткани у названия товара	31.05.2021	2:05:00	1:30:00	0	Специалист 3 (Р)	0,3889
Музей	Разместить новость на сайте	Летняя оздоровительная кампания – 2021	31.05.2021	0:10:50	0:05:00	0	Специалист 6 (П)	1,1667
Займы	Метатег на главную	Для работы яндекс метрики, разместите, пожалуйста, метатег в title на главной странице	31.05.2021	0:01:00	0:01:00	0	Специалист 3 (Р)	0,0000
СШОР	Разместить на закладке "Для родителей"	Документ во вложении	31.05.2021	0:04:50	0:05:00	1	Специалист 6 (П)	0,0333
Строительная компания	Изменения на сайте	Добавить новый объект строительства. Информация во вложении	31.05.2021	0:04:25	0:10:00	1	Специалист 6 (П)	0,5583
Стройматериалы	СОУТ (специальная оценки условий труда)	Разместить документы на вкладке "Основные документы"	31.05.2021	0:08:50	0:05:00	2	Специалист 7 (П)	0,7667
							Ошибка	1,2614

Рис. 2. Вычисление отклонения от планируемого времени
Fig. 2. Calculation of deviation from the planning time

По списку задач можно заметить, что некоторые задачи выполняются 5–15 мин, а некоторые занимают несколько часов, следовательно, точность в расчете времени неправильно считать в минутах. Поэтому, чтобы отклонение не зависело от размера задачи, считаем его в процентах. Вычислив точность по формуле (1), получили значение $S = 1,26$. Также было замечено, что 54 % задач было недооценено, 38 % – переоценено. Недооцененные задачи часто приводят к недовольству клиентов, поэтому необходимо сократить их количество.

4. Выделение типов задач

Проведен анализ задач с целью узнать, есть ли в выгрузке похожие задачи. В результате было определено несколько категорий задач, схожих по сложности и функционалу: разработка, поддержка, дизайн, и также все задачи поделены на 33 типа (рис. 3).

Дизайн	Отрисовать баннер/отрисовать элемент сайта	Создание дизайн-макета одной страницы/дизайн лендинга	
Поддержка	Создать почту корпоративного пользователя/изменить пароль	Разместить новость с вложениями (2 и более)	Разместить/заменить/удалить документ (1-2шт)
	Разместить отзыв	Работа с хостингом	Разместить прайс (таблица)
	Создать страницу и разместить информацию (без верстки)/внести изменения на странице сайта	Разместить новость без вложений/отредактировать новость (макс. 1 вложение)	Создать фильтрацию/переадресацию на почте корпоративного пользователя
	Изменение цен на товары интернет-магазина	Провести анализ статистики посещения сайта	Предоставить статистику просмотра видео/новости, загрузок документа
	Разработка рекламной компании	Разместить баннер	Добавить товар в интернет-магазине
	Разместить/заменить/удалить документы (более 3)		
Разработка	Внесение изменений на страницы сайта+верстка	Перенос сайта с тестового домена на основной	Подготовка вопросов по макету Figma перед версткой
	Разбор API сервиса	Создание базы данных	Перенос сайта с одной CMS на другую
	Установка CMS	Подключение шрифтов к сайту	Перевод сайта на https протокол
	Установка лицензии на CMS	Верстка страницы сайта	Добавить метрику/виджет на сайт
	Разработка модуля	Интеграция в верстку функционала CMS (обратная связь, инфоленты)	Доработка функционала сайта

Рис. 3. Категории и типы задач
Fig. 3. Categories and types of tasks

5. Экспертная оценка времени выполнения задач

Далее было решено оценить плановое время на выполнение задач по всем типам. Не все специалисты в коллективе обладают достаточной компетенцией для оценки. Специалист поддержки, который занимается только размещением новостей, не может, например, правильно оценить задачу по разработке. Поэтому выбраны экспертные группы, которые будут оценивать задачи каждой категории. Все специалисты компании голосовали «за» или «против» вступления сотрудника в ту или иную группу, в том числе можно было голосовать «за» или «против» себя (рис. 4).

По результатам опроса составлены таблицы, по строкам и столбцам которых записываются эксперты, а элементами таблиц являются переменные

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й эксперт назвал } i\text{-го;} \\ 0, & \text{если } j\text{-й эксперт не назвал } i\text{-го.} \end{cases}$$

На примере группы по дизайну (табл. 1) видно, что все эксперты считают руководителя и дизайнера компетентными в задачах дизайна (в табл. 1 стоит «1»). Также несколько экспертов проголосовали за эксперта 3 (разработчик) и эксперта 6 (поддержка). Остальных экспертов никто не считает достаточно компетентным по задачам дизайна (в табл. 1 стоит «0»).

* ФИО

* Оценка задач по ДИЗАЙНУ: * Оценка задач по РАЗРАБОТКЕ: * Оценка задач по ПОДДЕРЖКЕ:

Эксперт 1 (руководитель) Эксперт 1 (руководитель) Эксперт 1 (руководитель)

Эксперт 2 (дизайнер) Эксперт 2 (дизайнер) Эксперт 2 (дизайнер)

Эксперт 3 (разработчик) Эксперт 3 (разработчик) Эксперт 3 (разработчик)

Эксперт 4 (разработчик) Эксперт 4 (разработчик) Эксперт 4 (разработчик)

Эксперт 5 (разработчик) Эксперт 5 (разработчик) Эксперт 5 (разработчик)

Эксперт 6 (поддержка) Эксперт 6 (поддержка) Эксперт 6 (поддержка)

Эксперт 7 (поддержка) Эксперт 7 (поддержка) Эксперт 7 (поддержка)

Эксперт 8 (поддержка) Эксперт 8 (поддержка) Эксперт 8 (поддержка)

Рис. 4. Выбор экспертной группы
Fig. 4. Expert group selection

Результаты голосования по включению экспертов в команды

Таблица 1

Voting results for grouping experts

Table 1

За кого голосовал	Кто голосовал							
	Эксперт 1 (Рук.)	Эксперт 2 (Д)	Эксперт 3 (Р)	Эксперт 4 (Р)	Эксперт 5 (Р)	Эксперт 6 (П)	Эксперт 7 (П)	Эксперт 8 (П)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
	Разработка							
Эксперт 1 (руководитель)	1	1	1	1	0	1	0	1
Эксперт 2 (дизайнер)	0	0	0	0	0	0	0	0
Эксперт 3 (разработчик)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 4 (разработчик)	1	1	0	1	1	1	1	1
Эксперт 5 (разработчик)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 6 (поддержка)	0	0	0	0	0	0	0	0
Эксперт 7 (поддержка)	0	0	0	1	0	0	1	0
Эксперт 8 (поддержка)	0	0	0	0	0	1	0	0
	Дизайн							
Эксперт 1 (руководитель)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 2 (дизайнер)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 3 (разработчик)	1	1	1	0	0	1	0	0
Эксперт 4 (разработчик)	0	0	0	0	0	0	0	0
Эксперт 5 (разработчик)	0	0	0	0	0	0	0	0
Эксперт 6 (поддержка)	0	1	1	0	0	0	1	0
Эксперт 7 (поддержка)	0	0	0	0	0	0	0	0
Эксперт 8 (поддержка)	0	0	0	0	0	0	0	0

Окончание табл. 1
Table 1 (end)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Поддержка							
Эксперт 1 (руководитель)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 2 (дизайнер)	1	0	1	0	0	1	0	0
Эксперт 3 (разработчик)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 4 (разработчик)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 5 (разработчик)	0	0	0	1	0	0	0	0
Эксперт 6 (поддержка)	1	1	1	1	1	1	1	1
Эксперт 7 (поддержка)	1	1	1	1	1	1	0	1
Эксперт 8 (поддержка)	1	1	1	1	1	1	1	1

По полученным данным можно вычислить относительные коэффициенты компетентности h -порядка, используя алгоритм, предложенный С.П. Хабаровым [16]:

$$K_i^h = \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j^{h-1} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j^{h-1}, \tag{2}$$

где m – число экспертов в списке; h – порядок коэффициента компетентности. Коэффициенты компетентности нормированы так, что их сумма равна единице:

$$\sum_{i=1}^m k_i^h = 1, \quad h = 1, 2, \dots$$

На первом шаге, полагая равную компетентность всех экспертов, принимаем $k^0 = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$. Таким образом, коэффициент компетентности первого порядка – это относительное число экспертов, высказавшихся за включение i -го эксперта в команду.

Так, например, для команды экспертов, которые планируют оценивать задачи по разработке, получились значения k_j^1 , представленные в табл. 2.

Вычисленные k_j^1 для команды экспертов по разработке
Table 2
Calculated k_j^1 for a group of development experts

Эксперт 1 (руководитель)	Эксперт 2 (дизайнер)	Эксперт 3 (разработчик)	Эксперт 4 (разработчик)	Эксперт 5 (разработчик)	Эксперт 6 (поддержка)	Эксперт 7 (поддержка)	Эксперт 8 (поддержка)
0,1875	0	0,25	0,21875	0,25	0	0,0625	0,03125

Уже на первой итерации видно, что сотрудники проголосовали таким образом, что в команде по оценке задач по разработке будут участвовать не все работники. Так, например, Эксперт 2 (дизайнер) и Эксперт 6 (поддержка) гарантированно не будут включены в данную команду, что достаточно явно подтверждается оценками из табл. 1.

Относительный коэффициент компетентности второго порядка получают из (2) для $h = 2$ при условии, что k_j^1 ($j = 1, 2, \dots, m$) определены на первом шаге. Коэффициенты второго порядка представляют собой относительное количество голосов, взвешенных коэффициентом компетентности первого порядка.

Далее последовательно были вычислены относительные коэффициенты компетентности более высоких порядков до тех пор, пока k_i^h не будут отличаться от k_i^{h+1} с точностью $\Delta = 0,001$. Для рассмотренной ранее группы экспертов, участвующих в оценке задач на разработку, коэффициенты достигли требуемой точности на 4 итерации (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты компетентности группы экспертов по оценке задач по разработке

Table 3

Coefficients of competence of the group of experts on the assessment of development tasks

	k^1	k^2	k^3	k^4	$\Delta k^4 - k^3 $
Эксперт 1 (руководитель)	0,1875	0,1849	0,1789	0,1783	0,0006
Эксперт 2 (дизайнер)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Эксперт 3 (разработчик)	0,2500	0,2689	0,2729	0,2737	0,0008
Эксперт 4 (разработчик)	0,2188	0,2017	0,1995	0,1990	0,0005
Эксперт 5 (разработчик)	0,2500	0,2689	0,2729	0,2737	0,0008
Эксперт 6 (поддержка)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Эксперт 7 (поддержка)	0,0625	0,0756	0,0757	0,0753	0,0004
Эксперт 8 (поддержка)	0,0313	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Следовательно, команда по оценке задач на разработку будет включать всего 5 экспертов (Эксперт 1, Эксперт 3, Эксперт 4, Эксперт 5 и Эксперт 7) с коэффициентами компетентности, представленными в табл. 3. Эксперты 2, 6 и 8 не попали в данную команду.

Аналогичным способом определены составы команд по оценке задач по дизайну и поддержке.

Далее группами выбранных экспертов была проведена процедура оценки времени всех типов задач. Было определено нормальное время работы, каждый выбирал время, основываясь на своем опыте. Далее каждую минуту умножили на вес значимости голоса и получили предполагаемую оценку времени выполнения с учетом мнения всех экспертов (рис. 5).

№	Наименование и описание задачи задачи	Категория задачи	Оценка времени								Предполагаемая оценка времени выполнения с учетом мнения всех экспертов
			Эксперт 1 (руководитель)	Эксперт 2 (дизайнер)	Эксперт 3 (разработчик)	Эксперт 4 (разработчик)	Эксперт 5 (разработчик)	Эксперт 6 (поддержка)	Эксперт 7 (поддержка)	Эксперт 8 (поддержка)	
1	Отрисовать баннер/отрисовать элемент сайта	Дизайн	0:30:00	0:30:00	0:25:00	–	–	0:26:00	–	–	0:27:58
2	Создание дизайн-макета одной страницы/дизайн лендинга	Дизайн	6:00:00	5:00:00	7:00:00	–	–	7:00:00	–	–	6:09:28
3	Добавить товар в интернет-магазине	Поддержка	0:10:00	0:15:00	0:10:00	0:09:00	0:09:00	0:13:00	0:10:00	0:10:00	0:10:38
4	Изменение цен на товары интернет-магазина	Поддержка	0:30:00	0:40:00	0:35:00	0:35:00	0:25:00	0:25:00	0:25:00	0:30:00	0:30:42
...	...										
16	Создать почту корпоративного пользователя/изменить пароль	Поддержка	0:05:00	0:03:00	0:03:00	0:05:00	0:03:00	0:04:00	0:04:00	0:03:00	0:03:54
17	Создать фильтрацию/переедресацию на почте корпоративного пользователя	Поддержка	0:15:00	0:15:00	0:10:00	0:10:00	0:10:00	0:08:00	0:08:00	0:08:00	0:10:15
18	Разработка рекламной компании	Поддержка	3:00:00	3:00:00	3:00:00	2:30:00	3:00:00	5:00:00	4:00:00	3:00:00	3:21:54
19	Внесение изменений на страницы сайта+верстка	Разработка	1:00:00	–	1:30:00	1:00:00	1:20:00	–	2:00:00	–	1:18:12
20	Верстка страницы сайта	Разработка	5:00:00	–	6:00:00	6:00:00	7:00:00	–	6:00:00	–	6:05:44
21	Добавить метрики/виджета на сайт	Разработка	0:05:00	–	0:03:00	0:02:00	0:04:00	–	0:05:00	–	0:03:35
...	...										
32	Перенос сайта с тестового домена на основной	Разработка	0:20:00	–	0:10:00	0:20:00	0:10:00	–	0:20:00	–	0:14:32
33	Доработка функционала сайта	Разработка	5:00:00	–	6:00:00	6:00:00	5:00:00	–	7:00:00	–	5:37:24

Рис. 5. Оценка времени с учетом веса значимости голоса

Fig. 5. Estimation of time considering the weight of the expert significance

Это решает проблему постоянной оценки задач, потому что, когда приходит новая задача, достаточно будет выбрать ее тип, который способен определить любой сотрудник.

Несмотря на то, что была получена оценка продолжительности выполнения задач с учетом мнений всех экспертов, специалисты все равно не всегда могут уложиться в это время по причинам, описанным в постановке задачи. Поэтому полностью ориентироваться на предполагаемую

оценку времени выполнения экспертами неправильно. Было решено учитывать основные особенности и ввести повышающие коэффициенты.

6. Модификация метода

Для повышения точности оценки времени выполнения задач необходима адаптивная оценка их продолжительности с учетом особенностей конкретных:

- проекта;
- типа задачи;
- сотрудника, который будет выполнять задачу.

Матрица коэффициентов будет заполняться значениями по мере выполнения задач – поступила задача, сотрудник назначен, тип выбран, задача выполнена – ячейка заполнена.

7. Алгоритм заполнения матрицы коэффициентов и расчета времени выполнения задачи

Когда в компанию поступает новая задача, для того чтобы вычислить время ее выполнения, любой из сотрудников должен определить ее тип и исполнителя, если исполнитель не был выбран при поступлении задачи. Проект клиента будет определен автоматически.

При отсутствии значения в ячейке матрицы при поступлении задачи коэффициент будет равен 2, т. е. время на выполнение будет увеличено в 2 раза относительно времени, определенного ранее экспертами.

Если в ячейке уже было записано какое-то значение, то при вычислении планового времени по данной формуле коэффициент будет равен этому значению (рис. 6).

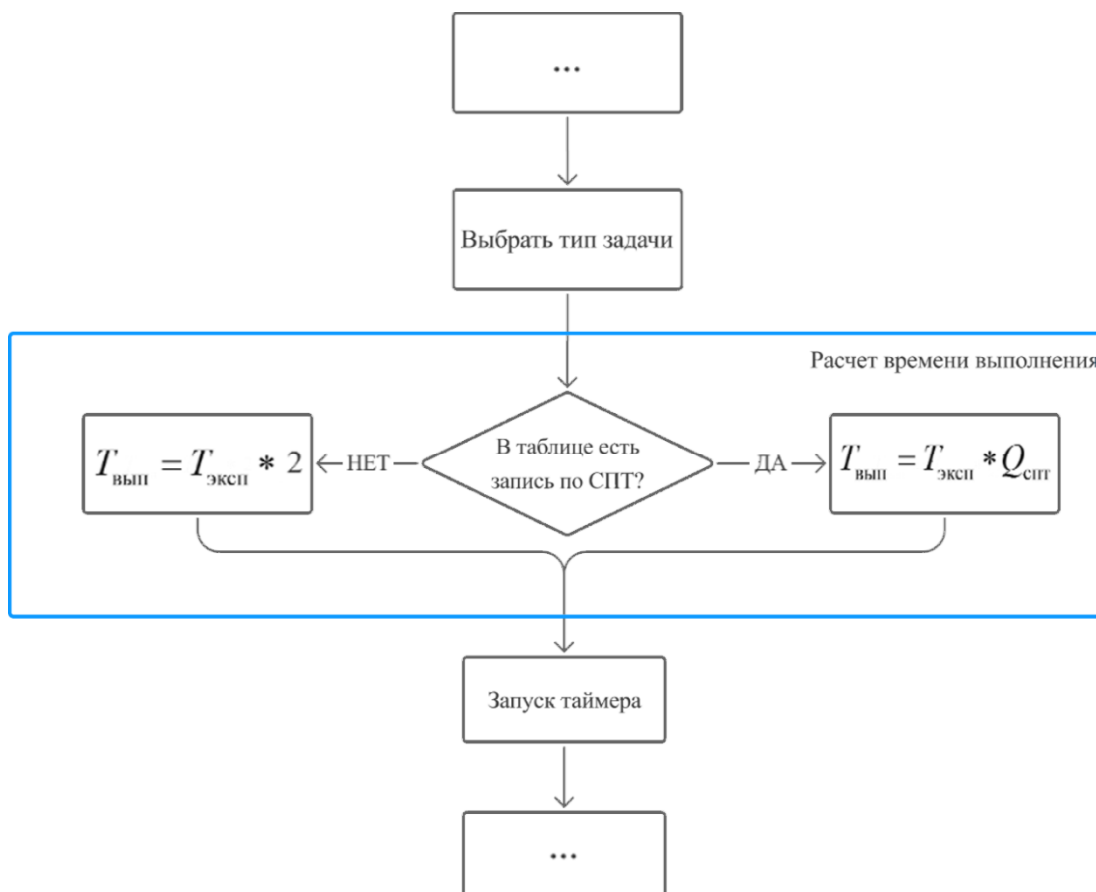


Рис. 6. Расчет времени выполнения
Fig. 6. Execution time calculation

Если в ячейке уже был какой-то коэффициент, то его необходимо обновить по формуле, представленной на рис. 7.

При поступлении новой аналогичной задачи плановое время выполнения будет рассчитываться с применением обновленного коэффициента.

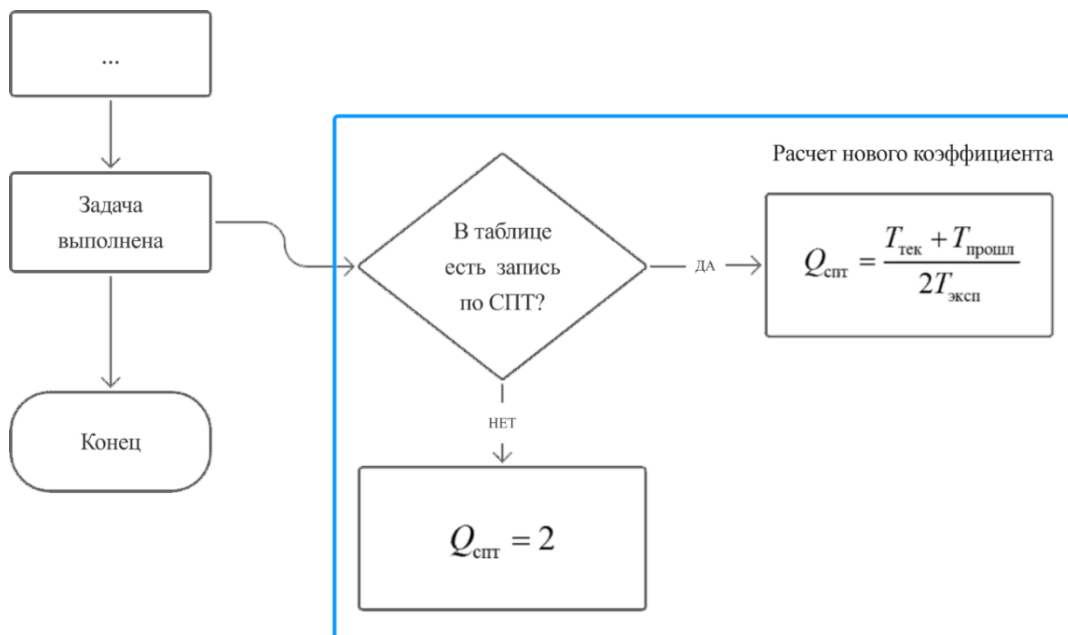


Рис. 7. Расчет нового коэффициента
Fig. 7. Calculation of the new coefficient

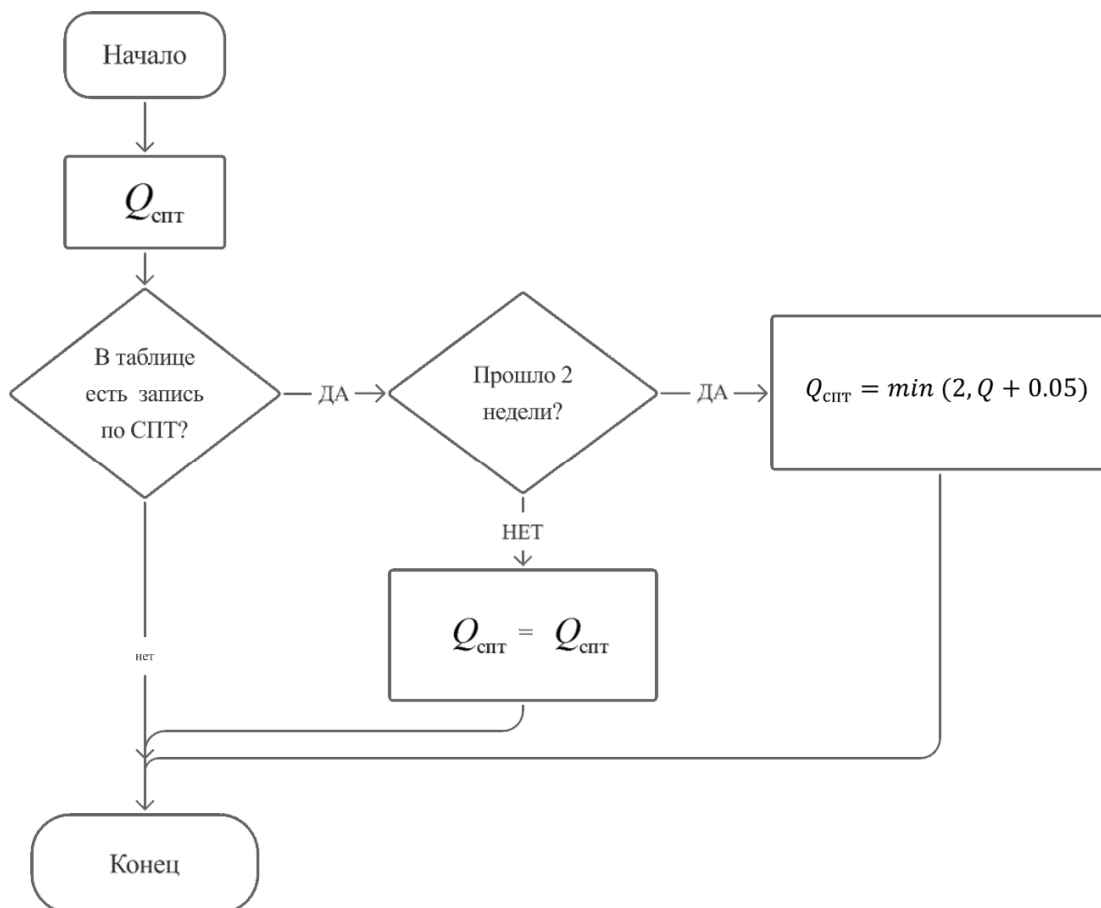


Рис. 8. Расчет параметра «забывания»
Fig. 8. Calculation of the "forgetting" parameter

Если задачи данного типа давно не выполнялись сотрудником, учитывается их «забывание» (рис. 8). Невозможно всегда помнить всех особенностей проекта и разных систем управления сайтом, как и обновления и доработки самого сайта. Каждый день с утра запускается проверка:

если в таблице есть запись с коэффициентом по конкретному сотруднику, проекту и типу задачи, проверяем, когда задача последний раз выполнялась. Если после выполнения задачи прошло две недели, повышаем коэффициент на 0,05, но не более 2. Выбор такого значения обусловлен анализом времени выполнения предыдущих задач.

Представленный алгоритм был реализован в существующей системе управления проектами. Помимо хранения самой таблицы коэффициентов была предусмотрена возможность просмотра истории изменения этих коэффициентов. Это нужно, в первую очередь, для анализа работы системы. Так, например, можно проанализировать работу сотрудника по тем или иным типам задач: понижаются ли коэффициенты при регулярном выполнении однотипных задач по одному проекту или без объективных на то причин, наоборот, начали расти. Это поможет руководителю вовремя отреагировать и принять соответствующие решения.

Также стоит отметить, что, несмотря на то, что все сотрудники будут стремиться выполнять задачи за минимально возможное время, даже при регулярном выполнении однотипных задач можно не достигнуть коэффициента, равного 1, т. е. выполнять задачу ровно за то время, которое предположили эксперты. Разработанная система пытается адаптироваться под личные особенности каждого сотрудника и как можно более точно оценить лично его время выполнения какой-либо задачи, а не минимизировать, например, общую продолжительность выполнения проекта.

Заключение

Разработанный алгоритм адаптивной оценки работал в течение 3 месяцев. За этот период выполнено более 2000 задач и снова сделана выгрузка. Новая ошибка, рассчитанная по формуле (1), равна 0,7435.

Первоначальная ошибка была равна 1,2614, ставилась задача улучшить точность оценки не менее чем на 20 %. В итоге улучшение составило 41,06 %, а количество недооцененных задач уменьшилось до 23 %. Также улучшился процесс декомпозиции задач.

В дальнейшем планируется добавить систему автоматического определения типа задачи [17]. Это позволит еще больше сократить время на оценку продолжительности выполнения задачи и освободит сотрудников от необходимости просматривать каждую задачу для определения ее типа.

Список литературы

1. Федеральный закон от 29.12.2012 N 273-ФЗ (ред. от 16.04.2022) «Об образовании в Российской Федерации».
2. Ципес Г.Л., Товб А.С. Проекты и управление проектами в современной компании: учеб. пособие. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2010. 463 с.
3. Фунтов В.Н. Основы управления проектами в компании. СПб.: Питер, 2008. 489 с.
4. Мазур И.И., Шапиро В.Д. Управление проектами: учеб. пособие. Омга-Л, 2010. 960 с.
5. Разу М.Л. Управление проектом. Основы проектного управления. М.: КноРус, 2007. 760 с.
6. Кушнер М.А. Модель минимизации сроков выполнения проекта в рамках сетевых технологий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2010. № 2. С. 124–129.
7. Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Fifth Edition. An American National Standard ANSI/PMI 99-001-2013. Project Management Institute, Inc., 2013. 616 p.
8. Кононенко И.В., Емельянова Е.В. Программная реализация методов оптимизации сроков и стоимости осуществления проекта с учетом заданных альтернативных вариантов выполнения работ // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. Т. 4, № 8. С. 57–61.
9. Милошевич Д. Набор инструментов для управления проектами. М.: Компания АйТи; ДМК Пресс, 2008. 729 с.
10. Этапы оценки проекта: понятия, методы и полезные инструменты. URL: <https://netology.ru/blog/05-2021-ocenka-proekta>.
11. Экспертная оценка в проектном управлении. URL: <http://grznt.ru/articles.html?id=89>.
12. Scrum Poker Cards. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=artarmin.android.scrum.poker>.

13. Planning Poker. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.inspearit.android.planningpoker>.
14. PERT. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=pl.olekstomek.pert>.
15. Yandex Forms. URL: <https://forms.yandex.ru/admin/>.
16. Хабаров С.П. Выявление знаний от экспертов. URL: http://www.habarov.spb.ru/new_es/exp_sys/es02/es2.htm.
17. Володина Ю.И., Зекирьяев М.Я. Методы и средства текстового анализа в системе поддержки пользователей // Прикладная математика и вопросы управления. 2019. № 4. С. 71–86. DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.05

References

1. *Federal'nyy zakon ot 29.12.2012 N 273-FZ (red. ot 16.04.2022) "Ob obrazovanii v Rossiyskoy Federatsii"* [Federal Law "On Education in the Russian Federation" No. 273-FZ]. (In Russ.)
2. Tsipes G.L., Tovb A.S. *Proekty i upravlenie proektami v sovremennoy kompanii: uchebnoe posobie* [Projects and Project Management in a Modern Company: Study Guide]. Moscow: Olimp-Biznes; 2010. 463 p. (In Russ.)
3. Funtov V.N. *Osnovy upravleniya proektami v kompanii* [Fundamentals of Project Management in a Company]. St. Petersburg: Piter; 2008. 489 p. (In Russ.)
4. Mazur I.I., Shapiro V.D. *Upravlenie proektami: ucheb. posobie* [Project Management: Study Guide]. Omega-L; 2010. 960 p. (In Russ.)
5. Razu M.L. *Upravlenie proektom. Osnovy proektnogo upravleniya* [Project Management. Fundamentals of Project Management]. Moscow: KnoRus; 2007. 760 p. (In Russ.)
6. Kushner M.A. Minimization model of project due dates in the form of network technologies and a fixed budget. *Vestnik of Astrakhan state technical university. Series Economics*. 2010;2:124–129. (In Russ.)
7. Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Fifth Edition. An American National Standard ANSI/PMI 99-001-2013. Project Management Institute, Inc.; 2013. 616 p.
8. Kononenko I.V., Emel'yanova E.V. [Software Implementation of Methods for Optimizing the Timing and Cost of the Project, Considering the Given Alternative Options for Performing Work]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2009;4(8):57–61. (In Russ.)
9. Miloshevich D. *Nabor instrumentov dlya upravleniya proektami* [Project Management Toolkit]. Moscow: Kompaniya AyTi; DMK Press; 2008. 729 p. (In Russ.)
10. *Etapy otsenki proekta: ponyatiya, metody i poleznye instrument* [Project Evaluation Stages: Concepts, Methods and Useful Tools]. (In Russ.) Available at: <https://netology.ru/blog/05-2021-ocenka-proekta>.
11. *Ekspertnaya otsenka v proektnom upravlenii* [Expert assessment in project management]. (In Russ.) Available at: <http://grznt.ru/articles.html?id=89>.
12. Scrum Poker Cards. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=artarmin.android.scrumpoker>.
13. Planning Poker. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.inspearit.android.planningpoker>.
14. PERT. Available at: <https://play.google.com/store/apps/details?id=pl.olekstomek.pert>.
15. Yandex Forms. Available at: <https://forms.yandex.ru/admin/>.
16. Khabarov S.P. *Vyyavlenie znaniy ot ekspertov* [Revealing Knowledge From Experts]. (In Russ.) Available at: http://www.habarov.spb.ru/new_es/exp_sys/es02/es2.htm.
17. Volodina Yu.I., Zekiryayev M.Ya. Text analysis methods and tools in the user support system. *Applied mathematics and control sciences*. 2019;4:71–86. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.05

Информация об авторах

Володина Юлия Игоревна, канд. техн. наук, доц. кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, Березники, Россия; julia_volodina@mail.ru.

Старикова Ксения Андреевна, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; xenista@mail.ru.

Information about the authors

Yuliya I. Volodina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Automation of Technological Processes, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russia; julia_volodina@mail.ru.

Kseniya A. Starikova, Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; xenista@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 29.11.2022

The article was submitted 29.11.2022

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ РЕШЕНИЯ ПРОТИВОРЕЧИВЫХ ЗАДАЧ «МЯГКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ» УПРАВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКИМ УЧРЕЖДЕНИЕМ

*Д.В. Гилёв*¹, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>

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

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена задаче как классификации противоречивости условий в проблемах управления в медицинских учреждениях, так и их решению при помощи метода комитетов. В проведенных ранее исследованиях было установлено, что медицинская проблематика требует использования метода «мягкого моделирования», который часто сводится к решению систем линейных уравнений и неравенств из-за своей трудноформализуемости. Здесь и возникают ограничения разного рода. **Цель работы.** Целью данной работы является изучение противоречий при решении задач управления медицинскими учреждениями, возможность их устранения с помощью метода комитета, а также подхода построения максимально совместных подсистем. **Материалы и методы.** Предлагается использовать метод максимально совместных подсистем, модифицированный под конструкции задачи, обусловленный вероятностью модели, то есть когда вектор состояния считается некоторым случайным вектором (случайной величиной). Здесь же возникает ситуация, связанная с принципом неопределенности, которая хорошо решается с помощью p -комитета. Рассмотренные методы показывают результативность, так как приближенное решение несовместной системы оказывается достаточно близко к истинному. Однако классификация противоречий раскрывает новые проблемы, связанные с размерностью и числом членов минимального комитета. **Результаты исследования.** В ходе формулирования видов противоречий становится понятно, что задача о количестве членов комитета сводится к уже решенной проблеме о построении максимально совместных подсистем, что, с одной стороны, полностью обосновывает рассматриваемый авторами подход, а с другой – делает его достаточно простым в условиях современной цифровизации, так как решение систем линейных неравенств не является трудоёмким для современных компьютерных программ. **Обсуждение и заключение.** Полученные результаты позволяют утверждать, что использование «мягкого моделирования» в задачах управления медицинскими учреждениями является более простым, так как сводится к понятным и простым системам неравенств, пусть и несовместным, но эта проблема решается при помощи метода комитетов. Однако стоит отметить, что в конечном итоге задача имеет простые решения при использовании выпуклых функций и остаётся открытым вопрос в общем случае.

Ключевые слова: «мягкое моделирование», управление, метод комитетов, несовместная система неравенств, максимально совместные подсистемы

Для цитирования: Гилёв Д.В., Логиновский О.В. Один из подходов решения противоречивых задач «мягкого моделирования» управления медицинским учреждением // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 82–88. DOI: 10.14529/ctcr230107

Original article

DOI: 10.14529/ctcr230107

ONE OF THE APPROACHES TO SOLVING THE CONTRADICTIONARY PROBLEMS OF “SOFT MODELING” OF THE MANAGEMENT OF A MEDICAL INSTITUTION

D.V. Gilev¹, denis.gilev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1040-5696>**O.V. Loginovskiy**², loginovskiiiov@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the problem of both classification of contradictory conditions in management problems in medical institutions and their solution using the method of committees. In previous studies, it was found that medical problems require the use of “soft modeling” methods, which is often reduced to solving systems of linear equations and inequalities due to its difficulty in formalizing. This is where restrictions of various kinds arise. **The purpose of the work.** The purpose of this work is to study the contradictions in solving the problems of management of medical institutions, as well as the possibility of eliminating them using the committee method, as well as the approach of building the most joint subsystems. **Materials and methods.** It is proposed to use the method of maximally joint subsystems modified for the design of the problem, due to the probability of the model, that is, when the state vector is considered to be some random vector (random variable). Here, a situation arises related to the uncertainty principle, which is well solved with the help of the p -committee. The considered methods show effectiveness, since the approximate solution of an incompatible system turns out to be quite close to the true one. However, the classification of contradictions reveals new problems related to the dimension and number of members of the minimum committee. **The results of the study.** In the course of formulating the types of contradictions, it becomes clear that the problem of the number of members of the committee is reduced to the already solved problem of building maximally joint subsystems. Which, on the one hand, fully justifies the approach considered by the authors, and on the other hand makes it quite simple in the conditions of modern digitalization, since solving systems of linear inequalities is not time-consuming for modern computer programs. **Discussion and conclusion.** The results obtained allow us to assert that the use of “soft modeling” in the management of medical institutions is simpler, since it is reduced to clear and simple systems of inequalities, albeit incompatible, but this problem is solved using the method of committees. However, it is worth noting that in the end the problem has simple solutions when using convex functions, and the question remains open, in the general case.

Keywords: “soft modeling”, management, committee method, incompatible system of inequalities, maximally joint subsystems

For citation: Gilev D.V., Loginovskiy O.V. One of the approaches to solving the contradictory problems of “soft modeling” of the management of a medical institution. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):82–88. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230107

Введение

Вопросы медицинской проблематики в современных реалиях все больше возникают и привлекают свое внимание как учёных-теоретиков, так и практиков. Годы пандемии новой коронавирусной инфекции выявили проблемы и узкие, наиболее болезненные места системы здравоохранения как в целом, так и на местном уровне. Безусловно, благодаря быстрой реакции со стороны государства и самоотверженному труду медиков нашей стране удалось, правда, не без потерь, но все же достаточно быстро справиться с ситуацией. Однако возникшая ситуация показала необходимость проведения работы над различными конструкциями сферы здравоохранения, такими как быстрая диагностика заболеваний, эффективное распределение врачей и машин скорой помощи по объектам, оценка качества медицинской услуги, оценка результативности деятельности медицинского учреждения.

Все вышеописанные проблемы требуют быстрых решений, которые необходимо принимать осознанно и желательно, используя математические методы как наиболее подходящие и обоснованные.

1. Обзор литературы

В вопросах медицинской проблематики использование математических методов в данный момент является наиболее актуальным, о чём говорят многочисленные научные статьи на данную тему. Это касается таких аспектов, как диагностика заболеваний, «электронный помощник врача», управление медицинским учреждением. И если к первым двум сами врачи относятся очень настороженно, что и понятно, так как пациенты – индивидуальны и требуют такого же уникального подхода, то вот вопросы управления, а также оценки его эффективности вполне могут быть решены с помощью математического моделирования. Однако чаще всего традиционный подход, как, например, в экономике или промышленности, здесь может не подойти, и предлагается использовать «мягкое моделирование» [1]. Здесь стоит обратить внимание на специфику деятельности, так как в отличие от, например, промышленного предприятия оценка результата автоматизации медицинской организации осуществляется с помощью трех составляющих эффективности – клинической, организационной и экономической [2]. При этом методы, связанные с экономической составляющей, не стоит отделять от первых, а необходимо рассматривать в совокупности [3]. При таком подходе часто задача сводится к плохо формализуемой [4]. Используемые на данный момент методы управления порой не показывают нужный результат и не оправдывают цель [5, 6]. При этом попытки решения поставленной задачи иногда вскрывают новые проблемы данной области. Так, приходится учитывать вероятностную природу проблемы и применять стохастический подход, например, цепи Маркова, которые уже показали свою определенную результативность [7], или системы массового контроля [8]. Имеет свою ценность и результативность такой нередко применяемый метод, как имитационное моделирование [9]. Хорошо описываются с помощью математического моделирования экономические и финансовые инструменты управления [10].

При этом все указанные методы всё ещё не решили проблему целиком, так как направлены на решение только конкретно узконаправленной её части. В связи с этим возникает необходимость разработки новых более качественных и в то же время понятных и простых в реализации методов управления.

2. Материалы и методы

Как показал анализ литературы, для решения большей части проблем, связанных с эффективным управлением в медицине, необходимо использование математических методов. При этом нет чёткого описания проблемы, иными словами, постановка задачи является плохо формализуемой. В связи с этим предлагается использовать так называемый подход «мягкого моделирования». В отличие от известных методов, например, статистических или эконометрических (регрессионный анализ), где необходимо чётко отслеживать связь между причиной и следствием, при указанном подходе достаточно попытаться установить связь между несколькими следствиями, которые были порождены одной причиной. Таким образом, для решения медицинских проблем приходится искать некоторые прогрессивные, «мягкие», неформальные шаги. Часто в таких ситуациях модели плохо формализуемые из-за противоречивости условий. Одним из решений противоречивости является использование метода комитетов [11].

«Мягкое моделирование» позволяет знать не обязательно точный механизм явления, а лишь его абстрактную структуру [12]. Так, часть медицинских задач можно свести к моделям с неравенствами.

Пусть $x \in X$ – некоторый план решения. На x накладываются некоторые требования в виде систем:

$$\langle c_j, x \rangle \geq b_j (\forall j \in J); \quad (1)$$

$$\langle d_j, x \rangle \leq v_j (\forall j \in J). \quad (2)$$

Предположим, что системы несовместны. Тогда строим p -комитет системы (1), лежащий в множестве всех решений системы (2). Число p максимизируется.

При такой постановке мы выбираем один из рациональных путей частичного удовлетворения всех потребностей. План (комитетный) $K = \{x_1, \dots, x_q\}$ можно использовать, либо принимая решения x_1, \dots, x_q в циклически повторяющейся последовательности, либо как случайный вектор $x_i \in K$ с вероятностью $1/q$.

Итак, пусть M – множество векторов, допустимых по расходу ресурсов, по технико-экономическим и другим показателям. Требуется найти

$$\max\{p: K - p\text{-комитет системы (2)}, K \subset M\}.$$

Для решения поставленной задачи находим максимальные совместные подсистемы (μ -подсистемы) системы

$$\langle c_j, x \rangle \geq b_j \quad (\forall j \in \overline{1, m}), \quad x \in M. \quad (3)$$

Здесь включено ограничение $x \in M$. Пусть индексы подсистем из (1), включаемых в эти максимально совместные подсистемы, суть I_1, \dots, I_q , x_s – решение подсистемы $\langle c_j, x \rangle \geq b_j \quad (\forall j \in I_s), x \in M$.

Затем решаем задачу:

$\max \{ p: K - p\text{-комитет системы (1); } K \text{ состоит из точек } x_1, \dots, x_q \text{ (каждая, возможно, в нескольких экземплярах)} \}$.

Эта задача имеет вид задачи целочисленного программирования.

Рассмотрим вопрос о нахождении μ -подсистемы (3), включающей ограничение $x \in M$. Это можно сделать с помощью метода свертывания. Найдя полную свертку системы (3), получим индексы ν -подсистем: J_1, \dots, J_s . Затем отыскиваем максимальные

$$S: S \not\subset J_k \quad (k = 1, \dots, s) \quad S \supset J,$$

где J – индекс системы неравенств $x \in M$.

Приведем еще один пример комитетного решения задачи, являющейся абсолютизацией некоторой действительной ситуации.

Пусть имеется система уравнений

$$f_j(x) = b_j \quad (\forall j \in \overline{1, m}). \quad (4)$$

Действительные ограничения должны быть неравенствами, но мы не знаем, какими именно (некоторые \leq , некоторые \geq).

Тогда комитет K системы (4) – хорошее приближение для действительной системы, так как любое ограничение действительной системы на нем выполнится с вероятностью, большей 1/2.

Комитетные решения могут также использоваться в некоторых ситуациях, связанных с принципом неопределенности.

3. Классификация противоречий и пути решения по их устранению на основе комитетных методов

Как уже было показано ранее, система часто противоречива. Для того чтобы обойти этот момент, предлагается использовать комитет, однако следует подробно проклассифицировать все виды противоречий, чтобы сделать выводы о существовании комитета.

Противоречие 1-го рода: несовместное неравенство, например, $0 > 0$. В этом случае (т. е. в системе линейных неравенств имеются противоречия 1-го рода) ни при каком $p > 0$ p -комитет не существует.

Противоречие 2-го рода: существует пара неравенств, составляющая несовместную подсистему. Если нет противоречий 1-го рода, но есть противоречия 2-го рода, то существует слабый комитет. Если нет противоречий ни 1-го, ни 2-го рода, то существует комитет с числом членов, не большим m (m – число неравенств).

Противоречие k -го рода: существует k неравенств, составляющих несовместную подсистему.

Если система состоит из m неравенств и нет противоречий $(m - 1)$ -го рода, то существует комитет из трех членов.

Если нет противоречий m -го рода, то существует комитет из одного члена (решение).

Возникает вопрос: что можно сказать о числе членов минимального комитета, если нет противоречий k -го рода, но есть противоречия $(k + 1)$ -го рода ($1 < k < m - 1$)?

Ответ зависит также от размерности n , так как, по теореме Хелли, если нет противоречий $(n + 1)$ -го рода, то существует решение.

Некоторая информация по этому вопросу для произвольной системы соотношений содержится в следующей теореме.

Теорема [13]. Если в произвольной системе из m соотношений относительно x нет противоречий k -го рода, то при $k/m > p$ существует p -комитет этой системы.

Конечные системы выпуклых неравенств сводятся разными способами к бесконечным системам линейных неравенств в совокупности всех μ - и ν -подсистем для таких бесконечных систем. Точнее, необходимо исследовать цепочку аппроксимаций: система выпуклых неравенств аппроксимируется бесконечной системой, эта система – счетной системой линейных неравенств, а последняя – конечной системой. Необходимо исследовать соотношение между ν - и μ -подсистемами, комитетами и минимальными комитетами этих систем.

Задача распознавания образов непосредственно связана с бесконечными системами линейных неравенств: в непрерывном случае обучающие выборки потенциально бесконечны, а сами образы представляют собой бесконечные множества [14].

Для нахождения ν -подсистем можно использовать метод свертывания [15]. Этот метод предложен и использован С.Н. Черниковым для случая произвольных (не обязательно совместных) конечных систем линейных неравенств и для случая совместных полиэдрально замкнутых бесконечных систем линейных неравенств.

Ограничения, входящие в модель планирования (проектирования, управления), имеют приоритеты, различную степень эластичности; в частности, в системе ограничений можно выделить директивные и факультативные. В связи с этим необходимо находить ν -подсистемы методом свертывания для некоторой области значений параметра t для системы

$$\langle c_\alpha, x \rangle - \beta_\alpha \leq \gamma_\alpha t \quad (\forall \alpha \in A),$$

где γ_α – коэффициент эластичности.

Кроме метода свертывания, как правило, связанного с использованием большого объема памяти, необходимо иметь и более простые алгоритмически и программно-реализованные методы.

Исследование множеств μ -подсистем для различных классов задач и изучение возможности построения достаточно эффективных комитетных конструкций из решений таких подсистем может пролить некоторый свет на природу соответствующих реальных задач.

Принципиальная схема метода анализа μ -подсистем системы выпуклых неравенств может иметь следующий вид.

1. Системе выпуклых неравенств

$$f_j(x) \leq 0 \quad (\forall j \in \overline{1, m}) \quad (5)$$

соответствует бесконечная система линейных неравенств

$$\langle c_{j\alpha_j}, x \rangle - b_{j\alpha_j} \leq 0 \quad (\forall j \in \overline{1, m}, \forall \alpha_j \in A_j). \quad (6)$$

Это может быть сделано многими способами.

2. Система (6) аппроксимируется некоторой конечной системой линейных неравенств

$$\langle c_j, x \rangle - b_j \leq 0 \quad (\forall j \in \overline{1, k}). \quad (7)$$

3. Находим все ν - и μ -подсистемы системы (5), по ним – все ν - и μ -подсистемы (7) и по последним – все ν - и μ -подсистемы системы (6).

Рассмотрим подробнее первый этап этой схемы.

Пусть функции f_j выпуклые, дифференцируемые. Системе (5) поставим в соответствие систему

$$\langle \nabla f_j(p), x - p \rangle + f_j(p) \leq 0 \quad (\forall p \in R^n, \forall j \in \overline{1, m}). \quad (8)$$

Каждому неравенству системы (8) отнесем его индекс (p, j) . Таким образом, получаем решение, которое помогает формализовать условия задачи с медицинской проблематикой.

Выводы

Предложенный авторами подход «мягкого моделирования» имеет свою действенность при решении задач управления медицинскими учреждениями, так как является достаточно простым, легко реализуемым и понятным для менеджера управляющего звена. При этом реализуется он при помощи известных математических методов, таких как система неравенств, которая в общем случае является несовместной из-за противоречивости требований (ограничений). Здесь как раз и предлагается использовать p -комитет, и задача сводится к уже известным теоремам, которые и обосновывают качественный подход авторов с теоретической точки зрения.

Список литературы

1. Гельфанд И.М., Розенфельд Б.И., Шифрин М.А. Очерки о совместной работе математиков и врачей. М.: Наука, 1989.
2. Титов В.А., Цыганов С.Н. Влияние средств автоматизации деятельности лечебно-профилактических учреждений на показатели эффективности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 3-3. С. 505–506.
3. Кадыров Ф.Н. Экономические методы оценки эффективности деятельности медицинских учреждений. 2-е актуализир. изд. М.: Менеджер здравоохранения, 2011. 495 с.
4. Мазуров Вл.Д., Мазуров А.Д., Шестаков А.А. Математические модели диагностики и прогнозирования в медицине и биологии // Вестник Уральского института экономики, управления и права. 2012. № 4 (21). С. 98–108.
5. Современные подходы к решению задач управления медицинских организаций / С.Б. Чолоян, А.К. Екимов, Е.Н. Байгазина и др. // Менеджер здравоохранения. 2021. № 10. С. 4–13. DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13
6. Методы стратегического управления медицинской организацией (информационный аспект) / С.Б. Чолоян, М.В. Шеенкова, А.К. Екимов и др. // Общественное здоровье и здравоохранение. 2017. № 3 (55). С. 44–48.
7. Екимов А.К., Естеев В.М., Комаров Н.Н. Современные подходы к управлению в здравоохранении. Оренбург: ОАО «ИПК «Южный Урал», 2006. 400 с.
8. Газизова Л.Р., Галимулина Ф.Ф. Система массового обслуживания в частной медицине // Управление устойчивым развитием. 2018. № 6 (19). С. 5–10.
9. Имитационное моделирование в задачах управления медицинской организацией амбулаторного типа / С.М. Щербаков, Е.Д. Теплякова, С.А. Румянцев, А.В. Василенок // Социальные аспекты здоровья населения. 2017. № 4 (56).
10. Соколов Е.В., Самойлов Д.И. Экономико-математическая модель управления финансовым результатом работы структурных подразделений и поликлиники в целом // Экономика и управление: проблемы, решения. 2015. Т. 2, № 8. С. 22–32.
11. Мазуров Вл.Д. Комитеты систем неравенств и задача распознавания // Кибернетика. 1971, № 3. С. 140–146.
12. Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вестник АН СССР. 1979. № 5. С. 38–49.
13. Мазуров Вл.Д. Линейная оптимизация и моделирование. Свердловск: Уральский государственный университет им. А.М. Горького, 1986. 68 с.
14. Mazurov V.D., Krivonogov A.I., Kazantsev V.S. Solving of optimization and identification problems by the committee methods // Pattern Recognition. 1987. Vol. 20, no. 4. P. 371–378. DOI: 10.1016/0031-3203(87)90061-6
15. Еремин И.И., Мазуров Вл.Д. Нестационарные процессы математического программирования. М.: Наука, 1979. 287 с.

References

1. Gelfand I.M., Rozenfeld B.I., Shifrin M.A. *Ocherki o sovmestnoy rabote matematikov i vrachey* [Essays on the joint work of mathematicians and doctors]. Moscow: Nauka; 1989. (In Russ.)
2. Titov V.A., Tsyganov S.N. [The influence of automation tools of medical and preventive institutions on performance indicators]. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2016;3-3:505–506. (In Russ.)
3. Kadyrov F.N. *Ekonomicheskiye metody otsenki effektivnosti deyatel'nosti meditsinskikh uchrezhdeniy* [Economic methods of evaluating the effectiveness of medical institutions]. 2nd actualization. ed. Moscow: Menedzher zdravookhraneniya; 2011. 495 p. (In Russ.)
4. Mazurov V.I. D., Mazurov A.D., Shestakov A.A. Mathematical models of diagnostics and forecasting in medicine and biology. Bulletin of the Ural Institute of Economics, Management and Law. 2012;4(21):98–108. (In Russ.)
5. Choloyan S.B., Ekimov A.K., Baigazina E.N., Molodtsov N.S., Kalinina E.A., Posnov A.A. Modern approaches to solving the tasks of management of medical organizations. *Manager Zdravookhraneniya*. 2021;10:4–13. (In Russ.) DOI: 10.21045/1811-0185-2021-10-4-13

6. Choloyan S.B., Sheenkova M.V., Ekimov A.K., Danilova L.V., Baygazina E.N. Methods of strategic management in healthcare institution (IT-aspect). *Public Health and Health Care*. 2017;3(55):44–48. (In Russ.)
7. Ekimov A.K., Estefeyev V.M., Komarov N.N. *Sovremennyye podkhody k upravleniyu v zdravookhraneni* [Modern approaches to management in healthcare]. Orenburg: Yuzhnyy Ural; 2006. 400 p. (In Russ.)
8. Gazizova L.R., Galimulina F.F. Mass service system in private medicine. *Managing sustainable development*. 2018;6(19):5–10. (In Russ.)
9. Shcherbakov S.M., Teplyakova E.D., Rummyantsev S.A., Vasilenok A.V. Simulation for outpatient medical organization management. *Social aspects of population health*. 2017;4(56). (In Russ.)
10. Sokolov E.V., Samoilov D.I. The economic-mathematical model of management of financial result of the structural units and outpatient clinics in general. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2015;2(8):22–32. (In Russ.)
11. Mazurov V.I.D. [Committees of systems of inequalities and the task of recognition]. *Kibernetika*. 1971;3:140–146. (In Russ.)
12. Samarskiy A.A. [Mathematical modeling and computational experiment]. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. 1979;5:38–49. (In Russ.)
13. Mazurov V.I.D. *Lineynaya optimizatsiya i modelirovaniye* [Linear optimization and modeling]. Sverdlovsk: Ural State University; 1986. 68 p. (In Russ.)
14. Mazurov V.D., Krivonogov A.I., Kazantsev V.S. Solving of optimization and identification problems by the committee methods. *Pattern Recognition*. 1987;20(4):371–378. DOI: 10.1016/0031-3203(87)90061-6
15. Eremin I.I., Mazurov V.I.D. *Nestatsionarnyye protsessy matematicheskogo programmirovaniya* [Nonstationary processes of mathematical programming]. Moscow: Nauka; 1979. 287 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Гилёв Денис Викторович, канд. техн. наук, доц. кафедры экономики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; denis.gilev@urfu.ru.

Логиновский Олег Витальевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

Information about the authors

Denis V. Gilev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Economics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; denis.gilev@urfu.ru.

Oleg V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

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 20.11.2022

The article was submitted 20.11.2022

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СТРОИТЕЛЬНОЙ СФЕРЕ В УСЛОВИЯХ ИХ ДЕФИЦИТА

С.А. Баркалов, barkalov@vgasu.vrn.ru

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

Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Материально-техническое обеспечение в сфере строительства является одной из важнейших ее составляющих, непосредственным образом влияющих на успешность реализации строительных проектов. Проблема оптимального распределения имеющихся ограниченных ресурсов является важной и актуальной задачей при планировании и организации строительных работ, особенно в условиях дефицита ресурсов. Решение этой задачи непосредственным образом влияет на качество и результат выполнения строительных проектов, продолжительность и ритмичность строительства, затраты и производительность труда. **Цель исследования** заключается в разработке математической модели, основанной на методах векторной оптимизации, позволяющей оптимально распределять ограниченные по запасам ресурсы разного вида между строительными мероприятиями, работами или объектами с целью повышения эффективности выполнения строительных проектов. **Материалы и методы.** В основе описанной в работе модели распределения ресурсов лежит теория векторной линейной оптимизации, позволяющей распределять ограниченные ресурсы разного вида между работами, мероприятиями либо объектами строительства. Модель учитывает минимальные и оптимальные требования по обеспечению строительных объектов или работ ресурсами, их запас, а также приоритетность к снабжению объектов. Приведена методика организации вычислительных процедур по модели численными методами. Методами имитационного моделирования на основе вычислительных экспериментов обоснована адекватность предлагаемой модели и свойства результатов, полученных по ней. Также проведена оценка эффективности внедрения модели распределения ресурсов в систему планирования и управления строительными проектами. **Результаты.** Разработана и обоснована математическая модель распределения ограниченных ресурсов между строительными объектами, работами или мероприятиями. Доказана адекватность полученных по модели результатов. Описана методика проведения вычислительных процедур для реализации модели в численном виде в среде MS Excel. На основе вычислительных экспериментов была оценена эффективность применения модели распределения ресурсов при управлении строительными проектами, которая в среднем составила более 34 %. **Заключение.** Показана актуальность разработки модели распределения ресурсов разного вида в сфере строительства, доказана адекватность результатов, описана методика получения оценок по модели численными методами, оценен экономический эффект от применения модели на практике. Предложенная модель распределения ресурсов приводит к значительному увеличению эффективности организации и управления строительными проектами и увеличивает вероятность своевременного их завершения с минимальными затратами.

Ключевые слова: строительство, ресурсы, управление проектами, планирование, оптимальное распределение, линейное программирование, векторная оптимизация

Для цитирования: Баркалов С.А., Моисеев С.И., Серебрякова Е.А. Математическая модель оптимального распределения ресурсов в строительной сфере в условиях их дефицита // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 89–99. DOI: 10.14529/ctcr230108

Original article
DOI: 10.14529/ctcr230108

MATHEMATICAL MODEL OF THE OPTIMAL RESOURCES DISTRIBUTION IN THE CONSTRUCTION SPHERE UNDER CONDITIONS OF THEIR DEFICIENCY

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

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

E.A. Serebryakova, sea-parish@mail.ru

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Logistics in the field of construction is one of its most important components, directly affecting the success of the implementation of construction projects. The problem of the optimal distribution of available limited resources is an important and urgent task in planning and organizing construction work, especially in conditions of scarcity of resources. The solution of this problem directly affects the quality and result of construction projects, the duration and rhythm of construction, costs and labor productivity. **Aim.** The purpose of the study is to develop a mathematical model based on vector optimization methods that allows optimal distribution of various types of limited resources between construction activities, works or objects in order to increase the efficiency of construction projects. **Materials and methods.** The model of resource distribution described in the paper is based on the theory of vector linear optimization, which makes it possible to distribute limited resources of various types between works, activities, or construction objects. The model takes into account the minimum and optimal requirements for providing construction objects or works with resources, their supply, as well as the priority for supplying objects. A technique for organizing computational procedures according to the model by numerical methods is given. Simulation methods based on computational experiments substantiate the adequacy of the proposed model and the properties of the results obtained from it. Also, the effectiveness of the implementation of the resource allocation model in the system of planning and management of construction projects was assessed. **Results.** A mathematical model for the distribution of limited resources between construction objects, works or events has been developed and justified. The adequacy of the results obtained by the model is proved. A technique for carrying out computational procedures for the numerical implementation of the model in the MS Excel environment is described. On the basis of computational experiments, the efficiency of applying the resource allocation model in the management of construction projects was evaluated, which averaged more than 34%. **Conclusion.** The relevance of developing a model for the distribution of resources of various types in the field of construction is shown, the adequacy of the results is proved, the method for obtaining estimates from the model by numerical methods is described, and the economic effect of applying the model in practice is estimated. The proposed resource allocation model leads to a significant increase in the efficiency of organization and management of construction projects and increases the likelihood of their timely completion at minimal cost.

Keywords: construction, resources, project management, planning, optimal distribution, linear programming, vector optimization

For citation: Barkalov S.A., Moiseev S.I., Serebryakova E.A. Mathematical model of the optimal resources distribution in the construction sphere under conditions of their deficiency. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):89–99. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230108

Введение

Материально-техническое обеспечение в сфере строительства является одной из важнейших ее составляющих, непосредственным образом влияющих на успешность реализации строительных проектов. Несвоевременная поставка необходимых для строительства ресурсов приводит к незапланированному увеличению сроков выполнения строительных проектов, увеличению сметных стоимостей как отдельных работ, так и всего проекта, неравномерной загрузки необходимого оборудования, техники, транспортных средств и иным существенным последствиям [1, 2].

Таким образом, проблема оптимального распределения имеющихся ограниченных ресурсов является важной и актуальной задачей при планировании и организации строительных работ, особенно в условиях дефицита ресурсов. Решение этой задачи непосредственным образом влияет на качество и результат выполнения строительных проектов, продолжительность и ритмичность строительства, затраты и производительность труда [3, 4].

Под ресурсами в строительстве будем в дальнейшем понимать любые виды ресурсов, предоставляемые на строительный объект и необходимые для выполнения строительного проекта: строительные материалы, конструкции и детали, человеческие ресурсы, запасные части, комплектующие, энергоресурсы, оборудование и прочие ресурсы [5].

Цели и задачи

Целью данной научной работы является разработка математической модели, основанной на методах векторной оптимизации, позволяющей оптимально распределять ограниченные по запасам ресурсы разного вида между строительными мероприятиями, работами или объектами с целью повышения эффективности выполнения строительных проектов.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать и обосновать математическую модель распределения ограниченных ресурсов между строительными объектами, работами или мероприятиями;
- описать методику проведения вычислительных процедур для реализации модели в численном виде;
- на основе вычислительных экспериментов оценить эффективность применения модели распределения ресурсов при управлении строительными проектами.

Математическая модель оптимального распределения ресурсов

В данном разделе приведем математическую модель оптимального распределения ресурсов между строительными объектами и мероприятиями, которая отличается научной новизной. Она основана на теории оптимального управления на основе решения оптимизационных задач [6–9]. Данную модель можно одинаково эффективно использовать как для распределения ресурсов для выполнения строительных работ на нескольких строительных объектах, так и для распределения ресурсом между различными работами или мероприятиями по проведению строительства на одном строительном объекте.

Проблема заключается в том, что обычно ресурсы ограничены и, как правило, их количества не хватает для полноценного обеспечения всех строительных объектов. Но в условиях дефицита ресурса мероприятия по организации строительных работ на объектах строительства все равно осуществимы, так как необходимые ресурсы на такие мероприятия обычно планируются с некоторым запасом, который обеспечит идеальное его исполнение. В условиях дефицита ресурсов возможно выполнение мероприятий и с меньшим количеством ресурса, но эффективность мероприятия при этом может упасть на величину, не превышающую 20–30 %. Назовем минимальное количество ресурса, приводящего к выполнению мероприятий при проведении строительных работ, в рамках разумного падения его эффективности, достаточным количеством ресурса, отводимого на организацию строительных работ.

Приведем математическую постановку задачи оптимального распределения ресурсов между строительными объектами [8].

Пусть имеется n видов или типов некоторого ресурса, который обозначим как R_1, R_2, \dots, R_n , его необходимо перераспределить на m строительных объектов с максимальным эффектом. Мероприятия или строительные объекты обозначим через M_1, M_2, \dots, M_m .

Введем следующие матрицы:

$a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ – необходимое количество ресурсов i -го типа, который должно получить j -й строительный объект (мероприятие) для проведения строительных работ при их идеальной реализации;

$b_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ – достаточное количество ресурсов i -го типа, который должно получить j -й строительный объект или мероприятие для реализации строительных работ с минимально возможной эффективностью.

Также необходимо для построения адекватной модели распределения ресурсов учитывать важность строительных объектов или мероприятий [10]. Обозначим через $W_j, j = 1, 2, \dots, m$ – вес или важность j -го объекта или мероприятия по проведению строительных работ с точки зрения его вклада в решение комплексной задачи выполнения строительного проекта.

Кроме этого, для учета ограниченности ресурсов обозначим через Z_i общий запас ресурсов i -го типа.

Необходимо определить x_{ij} – количество ресурсов i -го типа, которое должно получить j -е мероприятие или объект так, чтобы эффективность выполнения строительных проектов была максимальной.

Для решения этой задачи введем некоторый критерий эффективности [7] δ_{ij} , который показывает, на какую долю уменьшится эффективность j -го мероприятия по проведению строительных работ, если ресурс i -го типа, распределяемый на него, в рамках допустимого значения уменьшить на единицу. Предполагая, что эффективность мероприятий по проведению строительных работ равномерно зависит от наличия ресурсов, из чего следует то, что падение эффективности мероприятия, связанное с нехваткой единицы ресурса, обратно пропорционально разности между достаточным и необходимым количеством ресурса [9]. Исходя из этого, критерий эффективности можно записать в виде

$$\delta_{ij} = \frac{1}{a_{ij} - b_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Критерием оптимизации F_i для нахождения оптимального распределения ресурса i -го типа будет служить целевая функция, которая имеет смысл обобщенной величины падения эффективности проведения строительных работ из-за недостатка необходимых ресурсов. Согласно [9] она должна быть мультипликативной от веса мероприятия W_j , критерия эффективности δ_{ij} , а также от количества ресурса, которого недостаточно на данное мероприятие: $a_{ij} - x_{ij}$. Согласно приведенным требованиям, целевая функция будет равна

$$F_k(x_{ij}) = \sum_{j=1}^m \delta_{ij} (a_{ij} - x_{ij}) W_j \rightarrow \min, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Преобразовав алгебраически условие оптимизации (2) и изменив его направление, можно записать выражение, тождественное (2) с точки зрения оптимизационных задач:

$$F_k(x_{ij}) = \sum_{j=1}^m \delta_{ij} W_j x_{ij} \rightarrow \max, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

а учитывая соотношение (1), можно записать

$$F_k(x_{ij}) = \sum_{j=1}^m \frac{W_j x_{ij}}{a_{ij} - b_{ij}} \rightarrow \max, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Перейдем к ограничениям оптимизационной задачи. Как было сказано ранее, выделяемые на мероприятие по проведению строительных работ ресурсы не могут быть меньшими по величине, чем достаточные, но и не должны превышать необходимые. Если окажутся избыточные ресурсы, они будут направлены в общий резерв. Математически данные условия можно записать в виде

$$x_{ij} \leq a_{ij}, \quad x_{ij} \geq b_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Кроме этого, отведенные на мероприятия ресурсы могут быть целыми, если они представляют неделимые объекты (это необязательное условие), и не могут превышать его запаса:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq Z_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

В результате, учитывая целевую функцию (3) и ограничения, получаем многокритериальную (векторную) задачу целочисленного линейного программирования [8] следующего вида:

$$F_k(x_{ij}) = \sum_{j=1}^m \frac{W_j x_{ij}}{a_{ij} - b_{ij}} \rightarrow \max, \quad k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq Z_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ x_{ij} \leq a_{ij}, \\ x_{ij} \geq b_{ij}, \\ x_{ij} - \text{целое}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (5)$$

Следует отметить, что оптимизационная задача (5) является векторной [7], то есть она требует оптимизации распределения ресурсов по каждому из объектов или строительных мероприятий. С точки зрения организации вычислительных процедур по модели (5), векторная оптимизация достаточно трудоемкая, так как требует проведения вычислений по каждому ресурсу отдельно. Для решения этой проблемы имеется возможность перейти к однокритериальной задаче оптимизации, учитывая то, что задача по каждому ресурсу линейная.

При построении однокритериальной задачи линейного программирования лучше всего использовать метод обобщенной целевой функции [11, 12], когда критерии оптимизации (3) суммируются, формируя общую целевую функцию. Математическая модель задачи целочисленного линейного программирования, которая будет использовать обобщенную целевую функцию, оптимизирующую все ресурсы по единому критерию, будет иметь вид:

$$F(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{W_j x_{ij}}{a_{ij} - b_{ij}} \rightarrow \max;$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq Z_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ x_{ij} \leq a_{ij}, \\ x_{ij} \geq b_{ij}, \\ x_{ij} - \text{целое}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (6)$$

Если запас ресурса превышает необходимое количество, то остаток ресурса переводится в резерв. Количество резерва r_i можно определить по формуле

$$r_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} - Z_i, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Решать оптимизационную задачу (6) можно аналитически при небольшом количестве ресурсов и мероприятий (объектов), однако намного эффективней при этом использовать вычислительную технику [13, 14]. Для численного решения задачи был разработан вычислительный лист на базе MS Excel, который позволял автоматизировать вычисления по оптимальному распределению ресурсов на строительные мероприятия.

Методика организации вычислительных процедур

Приведем методику проведения вычислительных процедур в среде MS Excel на следующем примере. Данная методика может быть использована для автоматизации расчетов для любого количества мероприятий или объектов и произвольного числа ресурсов.

Имеем 8 маскировочных мероприятий по проведению строительных работ, в ходе которых требуется распределение 7 видов ресурсов. Данные по мероприятиям и ресурсам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для примера апробации модели

Table 1

Input data for the model validation example

Мероприятие	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	Запас ресурса
Вес W_i	5	9	6	7	4	2	8	3	
Необходимые ресурсы									
R ₁	24	17	13	25	12	23	18	19	154
R ₂	19	22	23	17	22	18	22	15	138
R ₃	20	10	13	15	16	21	12	20	107
R ₄	20	18	8	12	22	24	8	20	112
R ₅	21	22	15	23	8	23	23	14	150
R ₆	11	12	8	17	15	18	13	12	86
R ₇	24	17	14	17	11	18	9	13	103
Достаточные ресурсы									
R ₁	20	14	7	22	7	16	15	14	
R ₂	15	17	22	10	21	13	20	13	
R ₃	18	7	10	13	11	16	6	18	
R ₄	16	14	4	11	17	17	2	19	
R ₅	16	21	10	18	2	19	19	11	
R ₆	4	8	6	16	14	16	10	5	
R ₇	21	13	7	15	5	17	7	6	

Вводим исходные данные в расчетный лист MS Excel, как показано на рис. 1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Мероприятие	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Целевая функция		
2	Его вес	5	9	6	7	4	2	8	3		1892,3	
3		Матрица необходимых ресурсов										
4	Ресурс\Мероприят.	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Запас ресурса		
5	R1	24	17	13	25	12	23	18	19		131	
6	R2	19	22	23	17	22	18	22	15		138	
7	R3	20	10	13	15	16	21	12	20		107	
8	R4	20	18	8	12	22	24	8	20		112	
9	R5	21	22	15	23	8	23	23	14		129	
10	R6	11	12	8	17	15	18	13	12		86	
11	R7	24	17	14	17	11	18	9	13		103	
12		Матрица достаточных ресурсов										
13	Ресурс\Мероприят.	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8			
14	R1	20	14	7	22	7	16	15	14			
15	R2	15	17	22	10	21	13	20	13			
16	R3	18	7	10	13	11	16	6	18			
17	R4	16	14	4	11	17	17	2	19			
18	R5	16	21	10	18	2	19	19	11			
19	R6	4	8	6	16	14	16	10	5			
20	R7	21	13	7	15	5	17	7	6			

Рис. 1. Исходные данные для автоматизированного распределения ресурсов
Fig. 1. Initial data for automated resource allocation

Для решения задачи линейного программирования (6) выделяем под переменные диапазон ячеек B23-I29 и вводим в них произвольные числа, можно их оставить пустыми. Остальные

ячейки оформляем в соответствии с рис. 2, расчетные функции в MS Excel приводим в соответствии с табл. 2. Там же приведены параметры надстройки «Поиск решений» (Solver), которая непосредственно выполняет решение оптимизационной задачи.

Таблица 2
Расчетные формулы для решения задачи (6) в MS Excel
Table 2
Calculation formulas for solving problem (6) in MS Excel

Лист MS Excel		
Ячейка	Формула	Диапазон автозаполнения
K2	=СУММ(B32:I38)	–
K23	=СУММ(B23:I23)	K23-K29
B32	=B\$2*B23/(B5-B14)	B32-I38
K32	=K5-K23	K32-K38
Параметры надстройки «Поиск решений»		
Поле		Значение
Ячейка целевой функции		\$K\$2
Направление оптимизации		Максимум
Изменяемые переменные		\$B\$23:\$I\$29
Ограничения		\$B\$23:\$I\$29 <= \$B\$5:\$I\$11
Ограничения		\$B\$23:\$I\$29 >= \$B\$14:\$I\$20
Ограничения		\$K\$23:\$K\$29 <= \$K\$5:\$K\$11
Ограничения		\$B\$23:\$I\$29 = целое

В результате исполнения надстройки «Поиск решений» получены результаты, которые приведены на рис. 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
21		Матрица распределения ресурсов									
22	Ресурс\Мероприят.	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Потрачено ресурса	
23	R1	24	17	10	25	7	16	18	14	131	
24	R2	15	20	23	10	22	13	22	13	138	
25	R3	20	10	11	15	11	16	6	18	107	
26	R4	16	18	8	12	17	17	4	20	112	
27	R5	16	22	13	23	2	19	23	11	129	
28	R6	4	8	8	17	15	16	13	5	86	
29	R7	24	17	7	17	5	18	9	6	103	
30		Расчет целевой функции									
31	Ресурс\Мероприят.	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Резерв	
32	R1	30	51	10	58,3	5,6	4,57	48	8,4	0	
33	R2	18,8	36	138	10	88	5,2	88	19,5	0	
34	R3	50	30	22	52,5	8,8	6,4	8	27	0	
35	R4	20	40,5	12	84	13,6	4,86	5,33	60	0	
36	R5	16	198	15,6	32,2	1,33	9,5	46	11	0	
37	R6	2,86	18	24	119	60	16	34,7	2,14	0	
38	R7	40	38,3	6	59,5	3,33	36	36	2,57	0	

Рис. 2. Результаты распределения ресурсов между мероприятиями
Fig. 2. Results of the distribution of resources between activities

Результаты оптимального распределения ресурсов по строительным мероприятиям или объектам приведены на рис. 2 в ячейках B23-I29. Приведенное решение оптимально.

Для проверки адекватности модели распределения ресурсов были проведены вычислительные эксперименты, которые заключались в генерации различных условий для распределения ресурсов на строительные мероприятия или объекты, а затем решалась задача (6) с использованием вычислительной техники. Эксперименты показали высокую устойчивость решения к внешним условиям, отсутствие ограничений на исходные данные и однозначность получаемого результата. Это может служить основанием того, что разработанная модель пригодна для практического использования в планировании и управлении строительными проектами.

Оценка эффективности модели

Предложенная модель распределения ресурсов позволяет определить эффективность применения модели распределения ресурсов на строительные мероприятия или объекты. В качестве критерия эффективности рационально взять целевую функцию вида (2), которая и служит основой оптимизации (6). Тогда показателем эффективности KE как функции от распределения ресурса x_{ij} будет выступать следующий критерий [15]:

$$KE(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{W_j(a_{ij} - x_{ij})}{a_{ij} - b_{ij}}. \quad (7)$$

Обозначим через x_{ij}^c , $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ – обыкновенное распределение ресурса без решения оптимизационной задачи (6), а x_{ij}^* , $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ – оптимальное распределение ресурсов, полученное из решения (6).

Поясним смысл распределения x_{ij}^c . Это распределение ресурса между мероприятиями предполагается получить лицом, принимающим решение по планированию и управлению строительными проектами, на основании интуиции и опыта. Обычно это распределение находится между необходимым и достаточным ресурсом и подбирается так, чтобы выполнялись требования ограниченности ресурса (4). Считая, что это распределение равномерное, для моделирования распределения x_{ij}^c можно использовать формулу

$$x_{ij}^c = a_{ij} + \gamma(b_{ij} - a_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

где γ – некоторый параметр, который подбирается максимально большим с условием выполнения ограничения (4).

На основании этого с учетом (7) эффективность E применения модели распределения ресурсов при проведении маскировочных мероприятий будет равна

$$E = \frac{KE(x_{ij}^c) - KE(x_{ij}^*)}{KE(x_{ij}^c)} \cdot 100\% = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{W_j(a_{ij} - x_{ij}^c)}{a_{ij} - b_{ij}} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{W_j(a_{ij} - x_{ij}^*)}{a_{ij} - b_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{W_j(a_{ij} - x_{ij}^c)}{a_{ij} - b_{ij}}} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Для обоснования эффективности были проведены вычислительные эксперименты, суть которых заключалась в следующем.

Случайно генерировались необходимые и достаточные ресурсы для каждого мероприятия или объекта, а также запасы ресурсов. При этом количество видов ресурса и число мероприятий также было различным.

Затем для каждого эксперимента по формуле (8) генерировалось обыкновенное распределение ресурсов x_{ij}^c и на основании решения оптимизационной задачи (6) вычислялось оптимальное распределение x_{ij}^* . Далее вычислялась эффективность для каждого эксперимента по формуле (9). Вычисления были реализованы в среде MS Excel с использованием надстройки «Поиск решений».

Например, для данных, изображенных на рис. 2, обыкновенное распределение ресурсов x_{ij}^c приведено в табл. 3.

Обыкновенное распределение ресурсов для данных из рис. 2

Таблица 3

Table 3

Ordinary resource allocation for the data from Fig. 2

Ресурсы	Мероприятия							
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈
R ₁	24	17	13	25	12	23	18	19
R ₂	16	19	22	12	21	15	20	13
R ₃	18	7	12	13	13	18	6	20
R ₄	18	16	6	11	19	19	4	19
R ₅	21	22	15	23	8	23	23	14
R ₆	5	8	6	18	16	18	10	5
R ₇	23	15	9	16	5	17	9	9

Были проведены более 50 вычислительных экспериментов, которые показали, что средняя эффективность оптимального распределения ресурсов по сравнению с обыкновенной составляет 34,513 % (для примера данных из рис. 2 эффективность составила 36,25 %).

Заключение

В данной работе описана разработанная и основанная на методах векторной оптимизации математическая модель, которая позволит оптимально распределять ограниченные по запасам ресурсы разного вида между строительными объектами или строительными мероприятиями или работами с целью повышения эффективности выполнения строительных проектов.

При этом получены следующие основные результаты:

- на математическом языке поставлена, разработана и обоснована математическая модель распределения ограниченных ресурсов между строительными объектами, работами или мероприятиями;
- описана методика проведения вычислительных процедур для реализации модели в численном виде в среде MS Excel;
- на основе вычислительных экспериментов была оценена эффективность применения модели распределения ресурсов при управлении строительными проектами, которая в среднем составила более 34 %.

Таким образом, предложенная модель распределения ресурсов приводит к значительному увеличению эффективности организации и управления строительными проектами [16] и увеличивает вероятность своевременного их завершения с минимальными затратами.

Список литературы

1. Гладкова Ю.В., Гладков В.П. Этапы принятия управленческих решений // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2010. № 4. С. 39–44.
2. Баркалов С.А., Курочка П.Н. Формирование управленческого решения на основе построения комплексных оценок // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. 2017. № 6. С. 30–36.
3. Баркалов С.А., Глушков А.Ю., Моисеев С.И. Динамическая модель разработки и реализации проекта под влиянием внешних факторов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 3. С. 76–84. DOI: 10.14529/ctcr200308
4. Маликов Д.З. Этапы разработки управленческих решений // Вестник науки. 2020. Т. 4, № 5 (26). С. 116–120.
5. Колпачев В.Н., Семенов П.И., Михин П.В. Оптимизация календарного плана при ограниченных ресурсах // Известия ТулГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2004. Вып. 7. С. 154–164.
6. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Задачи и методы линейного программирования. Математические основы и практические задачи. М.: Либроком, 2016. 322 с.
7. Карзаева Н.Н. Математическое программирование в экономике: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2010. 240 с.

8. Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Физматлит, 2008. 264 с.
9. Кремер Н.Ш. Исследование операций в экономике: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2013. 438 с.
10. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for Determining the Term of Execution of Sub-conflicting Works // Proceedings of Tenth International Conference "Management of Large-scale System Development" (MLSD). 2017. P. 8109598.
11. Соколов А.В., Токарев В.В. Методы оптимальных решений. В 2 т. Т. 1: Общие положения. Математическое программирование. М.: Физматлит, 2012. 564 с.
12. Моисеев С.И., Обуховский А.В. Математические методы и модели в экономике: учеб. пособие. Изд. 2-е, испр. Воронеж: АОНО ВПО «Ин-т менеджмента, маркетинга и финансов». 2009. 160 с.
13. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Порядина В.Л. Математические методы и модели в управлении и их реализация в MS Excel. Воронеж: Воронежский ГАСУ; 2015. 265 с.
14. Баркалов С.А., Моисеев С.И., Порядина В.Л. Модели и методы в управлении и экономике с применением информационных технологий [Электронный ресурс]: учеб. пособие. СПб.: Интермедия, 2017. 264 с.
15. Гармаш А.Н., Орлова И.В. Математические методы в управлении: учеб. пособие. М.: Вузовский учебник, 2018. 240 с.
16. Орлова И.В. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование: учеб. пособие. М.: Вузовский учебник; НИЦ Инфра-М; 2013. 389 с.

References

1. Gladkova Yu.V., Gladkov V.P. [Stages of managerial decision-making]. *Bulletin of the Perm State Technical University. Electrical engineering, information technologies, control systems*. 2010;4:39–44. (In Russ.)
2. Barkalov S.A., Kurochka P.N. [Formation of a management decision based on the construction of complex assessments]. *FES: Finance. Economy. Strategy*. 2017;6:30–36. (In Russ.)
3. Barkalov S.A., Glushkov A.Yu., Moiseev S.I. Dynamic Model of Development and Implementation of the Project under the Influence of External Factors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(3):76–84. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200208
4. Malikov D.Z. [Stages of development of managerial decisions]. *Vestnik nauki*. 2020;4(5(26)):116–120. (In Russ.)
5. Kolpachev V.N., Semenov P.I., Mikhin P.V. [Schedule optimization with limited resources]. *Proceedings of TSU. Series "Construction and architecture"*. 2004;7:154–164. (In Russ.)
6. Yudin D.B., Holstein E.G. *Zadachi i metody lineynogo programmirovaniya. Matematicheskiye osnovy i prakticheskiye zadachi* [Problems and Methods of Linear Programming. Mathematical Foundations and Practical Problems]. Moscow: Librokom Publ.; 2016. 322 p. (In Russ.)
7. Karsaev N.N. *Matematicheskoye programmirovaniye v ekonomike: uchebnoye posobiye* [Mathematical Programming in the Economy: Textbook]. Moscow: Finansy i statistika Publ.; 2010. 240 p. (In Russ.)
8. Karmanov V.G. *Matematicheskoye programmirovaniye* [Mathematical Programming]. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2008. 264 p. (In Russ.)
9. Kremer N.Sh. *Issledovaniye operatsiy v ekonomike: uchebnyy dlya vuzov* [Operations Research in Economics: A Textbook for High Schools]. 3rd ed., revised and add. Moscow: Yurayt Publ.; 2013. 438 p. (In Russ.)
10. Barkalov S.A., Kurochka P.N. Model for Determining the Term of Execution of Sub-conflicting Works. In: *Proceedings of Tenth International Conference "Management of Large-scale System Development" (MLSD)*; 2017. P. 8109598.
11. Sokolov A.V., Tokarev V.V. *Metody optimal'nykh resheniy. V 2 t. T. 1: Obshchiye polozheniya. Matematicheskoye programmirovaniye* [Methods of Optimal Solutions. In 2 Vols. Vol. 1: Generalities. Mathematical Programming]. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2012. 564 p. (In Russ.)
12. Moiseev S.I., Obukhovskiy A.V. *Matematicheskkiye metody i modeli v ekonomike: uchebnoye posobiye* [Mathematical Methods and Models in Economics: Textbook]. Voronezh: Institute of Management, Marketing and Finance Publ.; 2009. 160 p. (In Russ.)

13. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Poryadina V.L. *Matematicheskiye metody i modeli v upravlenii i ikh realizatsiya v MS Excel* [Mathematical Methods and Models in Management and Their Implementation in MS Excel]. Voronezh: SUACE Publ.; 2015. 265 p. (In Russ.)

14. Barkalov S.A., Moiseev S.I., Poryadina V.L. *Modeli i metody v upravlenii i ekonomike s primeniyem informatsionnykh tekhnologiy: uchebnoye posobiye* [Models and methods in management and economics with the use of information technology: textbook]. St. Petersburg: Intermedia; 2017. 264 p. (In Russ.)

15. Garmash A.N., Orlova I.V. *Matematicheskiye metody v upravlenii: uchebnoye posobiye* [Mathematical Methods in Management: Textbook]. Moscow: Vuzovskiy uchebnyk; 2018. 240 p. (In Russ.)

16. Orlova I.V. *Ekonomiko-matematicheskiye metody i modeli: komp'yuternoye modelirovaniye: uchebnoye posobiye* [Economic-Mathematical Methods and Models: Computer Modeling: Textbook]. Moscow: Vuzovskiy uchebnyk, Infra-M; 2013. 389 p. (In Russ.)

Информация об авторах

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

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

Серебрякова Елена Анатольевна, канд. экон. наук, доц., доц. кафедры цифровой и отраслевой экономики, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия; sea-parish@mail.ru.

Information about the authors

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

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

Elena A. Serebryakova, Cand. Sci. (Econ.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Digital and Industrial Economics, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.12.2022

The article was submitted 15.12.2022

МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ МЕДИЦИНСКОГО УЧРЕЖДЕНИЯ КАК ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА

Р.А. Ларионова, r.larionova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4108-2762>
Д.Н. Кривоги́на, darya.krivogina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6453-3701>
В.А. Харито́нов, cems@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9440-0528>

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия*

Аннотация. Рассматривается задача организации процесса перепрофилирования лечебно-профилактических учреждений посредством управления ресурсом коечного фонда на основе согласования интересов агентов при нестационарной динамике заболеваний, в частности коронавирусной инфекции. Актуальность задачи обусловлена необходимостью принятия эффективных управленческих решений при ограничении временного ресурса и невозможности применения ранее используемых подходов, в частности статистических данных о пиках заболеваемости. Решение возможно посредством предложенного механизма управления. **Целью работы** является разработка механизма управления составом и структурой организационной системы, позволяющего обеспечить рациональное поведение каналов с востребованным соотношением показателей эффективности и качества обслуживания. Данные мероприятия способствуют уменьшению очередей пациентов, сокращению количества неудовлетворенных обслуживанием пациентов за счет своевременного предоставления необходимого и достаточного количества коечного фонда. **Материалы и методы.** Предложено использование принципов открытого управления системами с активными элементами, метода имитационного моделирования для описания происходящих процессов загрузки отделений учреждения с известным периодом дискретности накопления заявок и процессом их обработки, а также механизма комплексного оценивания и обобщенных медианных механизмов согласования мнений агентов. Данный выбор обусловлен нестационарностью потока заявок на госпитализацию и необходимостью принятия управленческих решений в организационной системе при ограничении временного ресурса и коечного фонда. Данные методы позволяют агентам оперативно принимать решения и исключают факторы субъективизма. **Результаты.** Выполнено построение субъектно-ориентированной модели в отдельном подразделении с использованием программного продукта, представленного механизмами комплексного оценивания. Значение комплексной оценки отражает существенное влияние факторов при поиске рационального режима работы отделения и позволяет прогнозировать своевременно его смену. Модифицированная медианная схема позволяет оперативно согласовать истинные мнения агентов, а графоаналитический метод в данном вопросе делает процедуру нахождения согласованного решения наглядной и удобной. **Заключение.** Предложенный в работе механизм позволяет осуществлять эффективное управление составом и структурой организационной системы, тем самым улучшить работу медицинского учреждения при нестационарных процессах поступления заявок на госпитализацию.

Ключевые слова: организационная система, система массового обслуживания, лечебно-профилактическое учреждение, ресурс коечного фонда, имитационное моделирование, метод модифицированной медианы, субъектно-ориентированное управление

Для цитирования: Ларионова Р.А., Кривоги́на Д.Н., Харито́нов В.А. Механизм управления структурой медицинского учреждения как организационной системой массового обслуживания в условиях нестационарного потока // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 1. С. 100–114. DOI: 10.14529/ctcr230109

METHODOLOGY FOR MANAGING THE STRUCTURE OF A MEDICAL INSTITUTION AS AN ORGANIZATIONAL SYSTEM OF QUEUE SERVICE UNDER CONDITIONS OF NON-STATIONARY FLOW

R.A. Larionova, r.larionova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4108-2762>

D.N. Krivogina, darya.krivogina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6453-3701>

V.A. Kharitonov, cems@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9440-0528>

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The task of organizing the process of repurposing medical and preventive institutions by managing the bed resource on the basis of coordination of the interests of agents in the non-stationary dynamics of diseases, in particular coronavirus infection, is considered. The relevance of the task is due to the need to make effective management decisions when limiting the temporary resource and the impossibility of using previously used approaches, in particular statistical data on incidence peaks. The solution is possible through the proposed control mechanism. **Aim.** The purpose of the work is to develop a mechanism for managing the composition and structure of the organizational system, which allows ensuring the rational behavior of channels with a demanded ratio of performance indicators and quality of service. These measures help to reduce patient queues, reduce the number of unmet patients by providing the necessary and sufficient bed capacity in a timely manner. **Materials and methods.** It is proposed to use principles of open management of systems with active elements, method of simulation modeling to describe processes of loading of departments of institution with known period of discrete accumulation of applications and process of their processing, as well as mechanism of complex evaluation and generalized median mechanisms of coordination of opinions of agents. This choice is due to the unsteady flow of applications for hospitalization and the need to make management decisions in the organizational system when limiting the temporary resource and bed capacity. These methods will allow agents to quickly make decisions and exclude factors of subjectivism. **Results.** A subject-oriented model was built in a separate unit using a software product represented by complex evaluation mechanisms. The importance of a comprehensive assessment reflects the significant influence of factors in the search for a rational mode of operation of the department and makes it possible to predict its timely change. The modified median scheme allows you to quickly agree on the true opinions of agents, and the graphoanalytical method in this matter makes the procedure for finding a coordinated solution visual and convenient. **Conclusion.** The mechanism proposed in the work allows effective management of the composition and structure of the organizational system, thereby improving the work of the medical institution in case of non-stationary processes of receipt of applications for hospitalization.

Keywords: organizational system, mass service system, medical and preventive institution, bed fund resource, simulation modeling, modified median method, subject-oriented management

For citation: Larionova R.A., Krivogina D.N., Kharitonov V.A. Methodology for managing the structure of a medical institution as an organizational system of queue service under conditions of non-stationary flow. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(1):100–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230109

Введение

Динамика ряда заболеваний, в частности коронавирусной инфекции, меняется хаотично и не поддаётся прогнозу [1]. Это обстоятельство приводит к нехватке ресурса коечного фонда лечебно-профилактического учреждения (далее ЛПУ) [2]. Возникает задача организации своевременного предоставления мест в стационаре для нуждающихся в госпитализации пациентов, требующая организации мероприятий по формированию дополнительного коечного фонда. Решение задачи возможно посредством строительства новых медицинских корпусов или перепрофилирования существующих отделений ЛПУ и/или их уплотнения [3, 4]. При этом новое строительство дополнительных медицинских корпусов не всегда оправдано ввиду высокой цены

строительства, ограничения временных сроков на строительство и на ввод в эксплуатацию объектов, а также риском дальнейшей оптимизации данных объектов в случае снижения уровня заболеваемости.

Процесс перепрофилирования производится в случае необходимости значительного увеличения мощности коечного фонда. При этом определить необходимое и достаточное количество дополнительных мест невозможно, опираясь только на статистические данные по предыдущим пикам заболеваемости ввиду их хаотичности [4]. Одним из существенных недостатков перераспределения ресурса коечного фонда, выделенного ранее на другие профили заболеваемости, является увеличение числа жалоб по несвоевременному оказанию медицинской помощи. Также уплотнение коечного фонда всегда сопряжено со снижением качества оказываемых услуг. В соответствии с вышеизложенным, можно сделать вывод о том, что процесс перераспределения коечного фонда при нестационарном потоке заявок на госпитализацию в период пиков заболеваемости требует оптимизации.

Исследованием организационных систем занимались такие ученые, как В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили, А.К. Еналеев, Н.А. Коргин и т. д. [5]. Авторами был предложен принцип открытого управления системами с активными элементами [5]. Предложенные методы были применимы к задачам управления в социальной и экономической сферах, включая область здравоохранения. Однако применение методов теории организационных систем ЛПУ для решения проблем предоставления ресурсов в условиях нестационарного потока заявок на госпитализацию не было рассмотрено.

Вопросами управления системами массового обслуживания (далее СМО) в ЛПУ с позиции управления процессом ожидания приема (очередью) занимались Л.Р. Газизова, Ф.Ф. Галимулина [6], Б.В. Гнеденко [7], W.C. Kyoung, M.K. Seong, M.C. Young, U.S. Yong [8], однако вопросы управления СМО при нестационарных потоках заявок на госпитализацию не были раскрыты.

Вопросами принятия решений на основе учета человеческого фактора занимались В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, Н.А. Коргин и т. д. [7]. Вопросы преодоления негативных последствий субъективизма были раскрыты в работах В.А. Харитоновой, А.О. Алексеевой, Д.Н. Кривогиной [9–13] посредством разработки применения методов субъектно-ориентированного управления (далее СОУ). Однако вопросы принятия решений при использовании подходов перепрофилирования и уплотнения отделений в ЛПУ не были исследованы.

Механизмы согласования предпочтений с применением метода обобщенной медианной схемы изучались В.Н. Бурковым, М.Б. Исаковым, Н.А. Коргиным, Д.А. Новиковым, А.О. Алексеевым, Т.А. Катаевой и др. [14–18]. Данный механизм приводит к согласованному решению с преимуществом «верхней» или «нижней» коалиции. Для обеспечения «справедливого» решения целесообразно провести корректировку существующего механизма. Это позволит обеспечить преимущественное формирование «справедливого» решения внутри естественного интервала решений между коалициями, даже если такое решение не будет совпадать ни с одним из высказываний экспертов [18]. С этой целью в работе предложено применение метода модифицированной медианы в вопросах согласования мнений при управлении ЛПУ в задачах их перепрофилирования и уплотнения.

Выполнение исследований с применением методов СОУ сопряжено с имитационным моделированием, позволяющим с достаточной точностью «проигрывать во времени» процессы загрузки ЛПУ при отсутствии аналитической модели объекта исследования. Преимуществом применения имитационного моделирования в данном вопросе является возможность логико-математического описания функционирования ЛПУ. Дальнейшее исследование на моделях оправдано получением необходимой информации, используемой для управления структурой и составом ЛПУ. Построение имитационных моделей позволит спрогнозировать моменты перехода системы из одного режима в другой.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что управление распределением коечного фонда ЛПУ целесообразно осуществлять на основе предложенной методологии, в основе которой лежит построение имитационных моделей загруженности ЛПУ при нестационарном потоке заявок на госпитализацию, а также методов СОУ. При этом предлагается медицинские учреждения рассматривать как организационную систему массового обслуживания [19, 20].

1. Лечебно-профилактическое учреждение как организационная система массового обслуживания

Исследуемая в работе СМО демонстрирует процесс управления коечным фондом стационара ЛПУ (рис. 1).

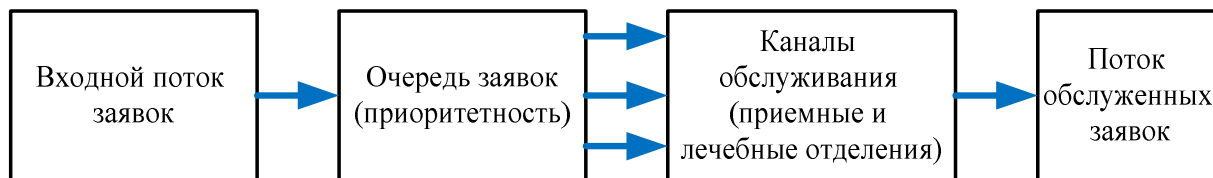


Рис. 1. Процесс массового обслуживания в лечебно-профилактическом учреждении
Fig. 1. The process of mass service in a medical and preventive institution

ЛПУ является организационной системой, которая представлена объединением людей различных профессий и функционирует на основе определенных процедур и правил. Поэтому процесс управления необходимо осуществлять как в отношении персонала организации, так и ее структуры. На рис. 2 представим ЛПУ в соответствии с положениями теории управления организационными системами.

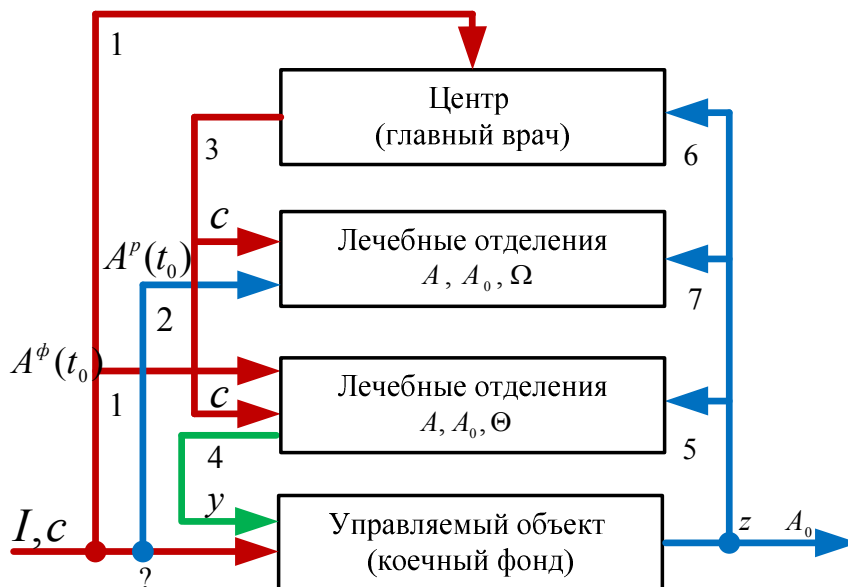


Рис. 2. Структура организационной системы лечебно-профилактического учреждения
Fig. 2. Structure of the organizational system of the medical and preventive institution

На первоначальном этапе в систему поступает внешняя информация (I) и управляющее воздействие (c), на выходе – выбранный вариант управления коечным фондом (U). Информация по нагрузке на СМО ЛПУ отправляется в центр (главному врачу) и в приемное отделение. Система будет описываться следующими параметрами:

$A_i^p(t_0)$ – ресурс коечного фонда, который выделяется согласно федеральным нормативам на ЛПУ;

$A^\phi(t_0)$ – фактическая нагрузка на ЛПУ, которая может существенно отличаться от предполагаемой загрузки коечного фонда в результате влияния нестационарных процессов;

c – управляющее воздействие на систему центра (1), которое основывается на ситуации заболеваемости:

$$c = C_A \times C_{A_0} \times C_{U_i^\phi(t_0)}, \quad (1)$$

C_A – множество действий центра, из которых происходит выбор действий отделений; C_{A_0} – множество действий центра, оказывающих влияние на целевую функцию отделений; $C_{U_i^{\phi}(t_0)}$ – множество действия центра по управлению ЛПУ, исходя из фактической нагрузки;

y – возможные варианты действий агента (подразделений) по управлению коечным фондом ЛПУ, представленные в форме предикатов [21]. Их выбор обоснован загруженностью ЛПУ и нестабильностью поступления заявок на госпитализацию;

U – множество управляющих воздействий центра в период возросшей нагрузки на коечный фонд ЛПУ в условиях нестационарного потока заявок Ω ;

U_0 – множество вариантов управления агентами, приемным и лечебными отделениями, которые будут реализованы в ЛПУ при управлении коечным фондом;

Θ – множество возможных условий по управлению коечным фондом, к которым необходимо быть готовым организационной системе в результате влияния нестационарных условий;

z – полученное решение в результате управляющего воздействия y , $z \in U_0$.

Тогда управление коечным фондом ЛПУ, опираясь на критерий эффективности системы, можно представить следующим образом:

$$K(c, y) = \max_{c \in C} f(c, y),$$

K – критерий эффективности системы, $c \in C$ – управление центра, y – выбор возможных действий агента в нестационарных условиях, когда существуют некоторые ограничения на увеличение коечного фонда. Таким образом, необходимо найти такое управление, эффективность которого будет максимальна для изучаемой СМО.

Как показывает практика, управление СМО ЛПУ осуществляется в большей степени неэффективно. Были очереди по обслуживанию пациентов и нехватка коечного фонда. Для решения данных проблем предлагается использование имитационного моделирования для описания происходящих процессов загрузки во времени при существовании нестационарных процессов. При разработке имитационной модели, описывающей процесс загрузки ЛПУ, будем ориентироваться на входной поток пациентов и их выписку (в том числе и убыль).

Управленческие решения основываются на результатах текущих событий и осуществляются раз в сутки. Применим также динамическое планирование, подразумевающее множество шагов (этапов действий). Пусть на текущий момент времени t_i в подразделении сложилось состояние $A^3(t_i)$ в результате выписки больных (в том числе и убыль) $\Delta A_{-}^3(t_i)$ и приема больных $\Delta A_{+}^3(t_i)$, тогда загруженность подразделения (канала обслуживания) будет вычисляться по следующей формуле

$$\sum A^3(t_0) = \Delta A_{-}^3(t_0) - \Delta A_{+}^3(t_0). \quad (2)$$

Динамика может быть как положительная, так и отрицательная.

На рис. 3 и 4. отобразим процесс моделирования загруженности ЛПУ. По оси абсцисс будем откладывать уровень загрузки (коечный фонд) A^3 подразделений, а по оси y – время (t) [21]. Характерные точки изменения определяются руководством ЛПУ, исходя из федеральных требований нормирования по максимальной и минимальной загруженности отделений ЛПУ стационарной помощью, когда ЛПУ способно функционировать без риска. Стоит отметить, что данные характерные точки подлежат согласованию между центром и заведующими отделениями.

Переход из одного состояния в другое происходит в результате изменения уровня загруженности отделения во времени. Мониторинг данных происходит ежедневно, исходя из уровня заболеваемости.

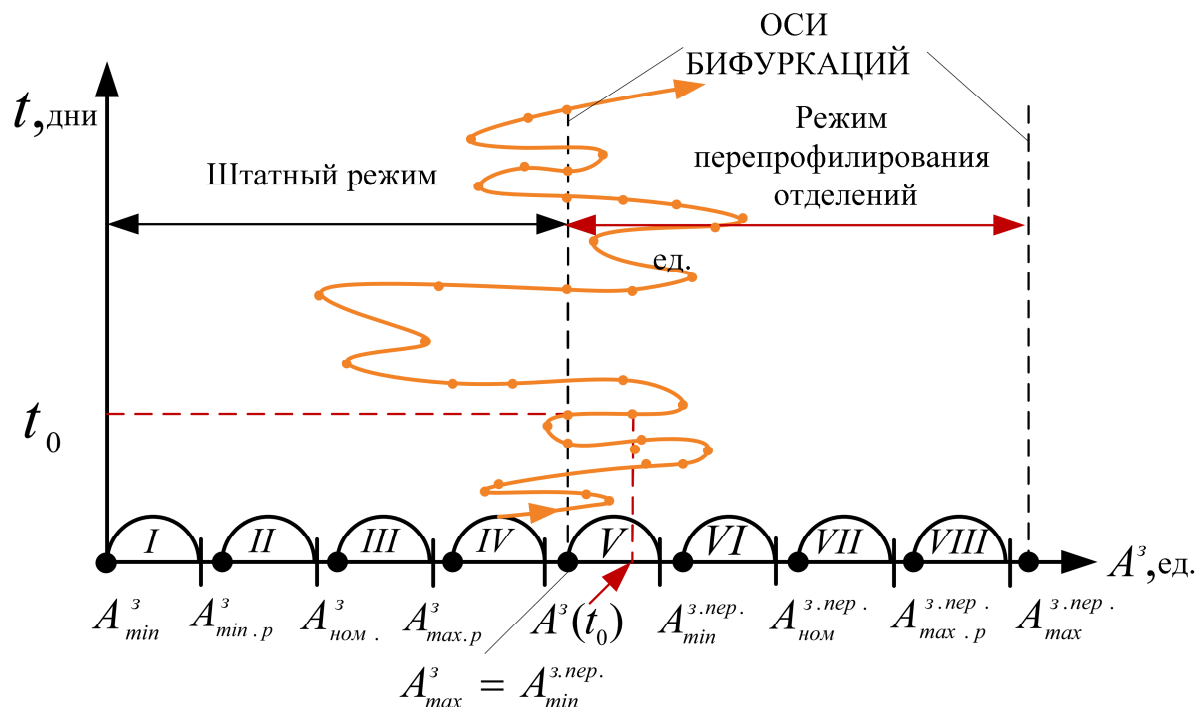


Рис. 3. Модель работы отделений в штатном режиме и в режиме перепрофилирования
Fig. 3. Model of departments operation in normal mode and in re-profiling mode

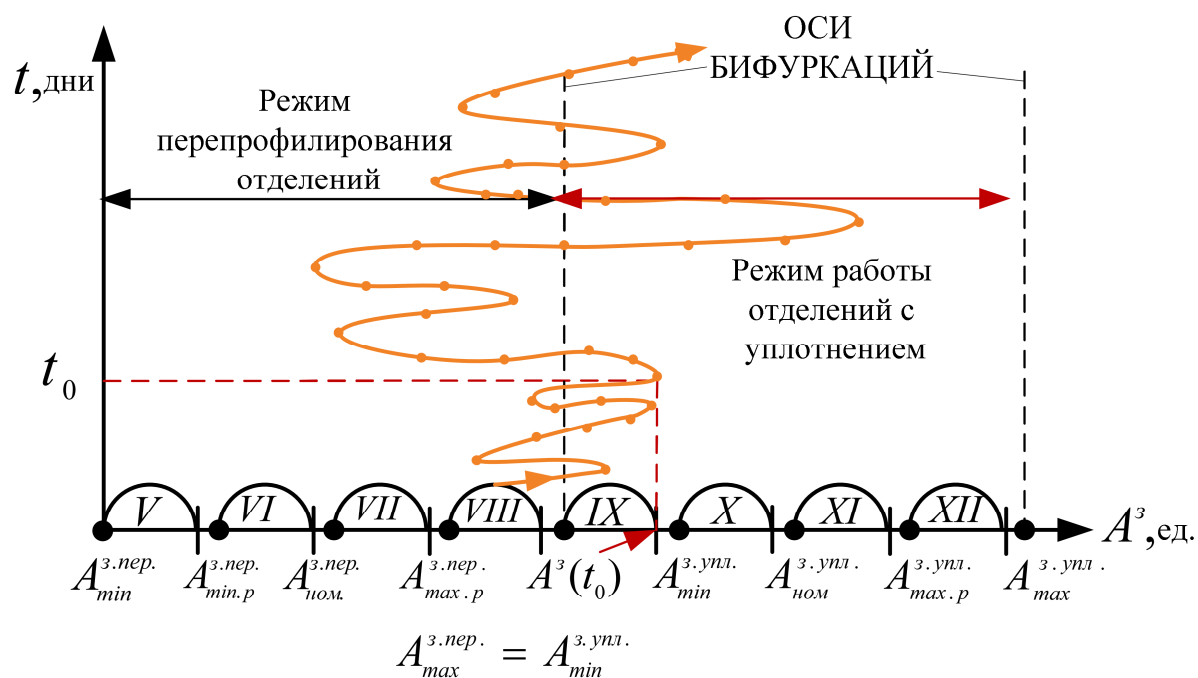


Рис. 4. Модель работы отделений в режиме перепрофилирования и уплотнения отделений
Fig. 4. Model of operation of compartments in the mode of repurposing and compaction of compartments

2. Варианты управления поведением системы массового обслуживания в зависимости от интенсивности нагрузки системы

Представим на рис. 5 процесс перехода системы из одного состояния в другое в результате изменения нестационарного потока заявок.

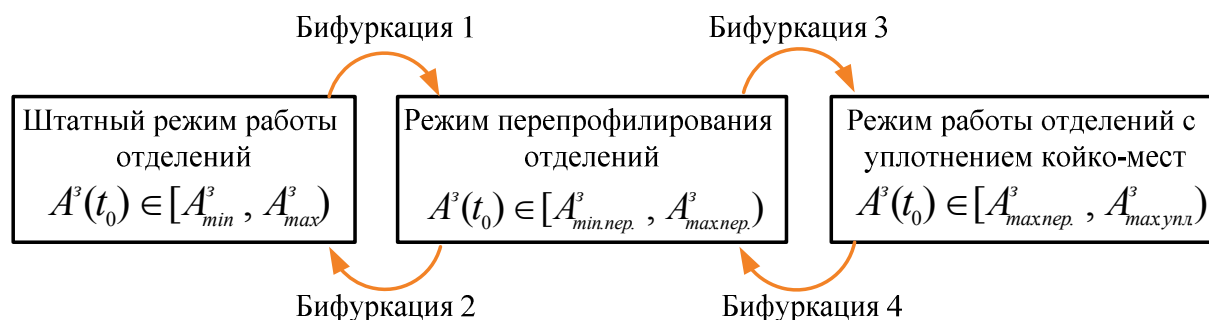


Рис. 5. Переход в разные состояния в результате изменения интенсивности нагрузки
Fig. 5. Transition to different states as a result of changing load intensity

Выделим такую характеристику системы, как интенсивность нагрузки, которая показывает степень согласования входного и выходного потоков заявок, а также является индикатором устойчивости системы. Переходы из одного состояния системы массового обслуживания в другое осуществляются при изменении интенсивности нагрузки в течение одной недели. Интенсивность нагрузки (w) отделения будем вычислять как отношение фактической загрузки (A^ϕ) отделения к рекомендованному максимальному значению загрузки (отделения) ($A^{max.рек}$):

$$w = \sum_{n=1}^n \frac{A^\phi}{A^{max.рек}}. \quad (3)$$

В случаях снижения коэффициента интенсивности нагрузки возможны и обратные переходы. При этом переход для установления смены режима возможен с некоторым запозданием (до недели) в случае выполнения условий интенсивности нагрузки.

Правило изменения структуры системы массового обслуживания должно быть согласовано между каналами обслуживания (подразделениями) и главным врачом (центром). Отделения сообщают центру о ежедневном состоянии загруженности и состоянии резерва коечного фонда. Решение данных вопросов должно осуществляться с помощью системы поддержки принятых решений агентов (y), так как носит многофакторный и многокритериальный характер. Принятые решения могут быть представлены формализованными предикатам (суждениям) [21].

3. Модель комплексного оценивания канала (отделения) в медицинском учреждении

Для управления состоянием СМО построим модель управления в отдельном подразделении (канале), заложив характеристики, из которых складывается работоспособность лечебного отделения. В качестве существенных характеристик выделим следующие: A^3 – уровень загруженности отделения, c^q – количество жалоб на входе (ожидающих в очереди) и c^h – количество жалоб от лиц, получающих лечение в ЛПУ (в связи с уплотнением). Данные показатели являются прямым указанием для смены режима работы медицинского учреждения, а значит, должны учитываться комплексно. Построим модель комплексного оценивания на основе программного комплекса «Декон», в основе которого лежит метод иерархической линейной свертки, отличающегося возможностью установления отношения строгого порядка на множестве альтернатив и их характеристик в соответствии со степенью важности каждой [22–24].

Построим функцию приведения (рис. 6) для характеристики A^3 – уровень загруженности отделения по точкам в период интенсивности потока заявок на госпитализацию. Максимальная загруженность одного отделения типового ЛПУ составляет 80 коек (на стационар). Оценка 1 – отделение загружено «неудовлетворительно», что соответствует минимальной загрузке отделения, 20 занятых коек. Оценка 2 – «удовлетворительно» – будет соответствовать рекомендованному номинальному значению – занято 35 коек. Оценка 3 – «хорошо» – будет выставляться в том случае, если количество коек будет близко к максимально рекомендованному и будет установлено на уровне 55. Оценка 4 – «отлично» – соответствует, когда занято 80 коек отделения.

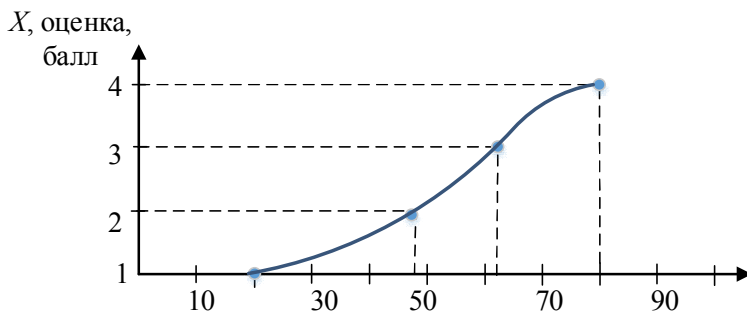


Рис. 6. Функция приведения для характеристики «уровень загруженности отделения»
Fig. 6. Cast function for “compartment load level” characteristic

Функцию приведения для характеристики c^d – «Количество жалоб на входе» также будем строить по точкам. Оценке «отлично» – в очереди 1 пациент. Оценка «хорошо» соответствует, когда количество пациентов 12. Оценка «удовлетворительно» соответствует 20 жалобам от пациентов. Оценка «неудовлетворительно» соответствует 30 жалобам.

Функцию приведения для характеристики c^h – «Количество жалоб в стационаре», связанных с увеличением коечного фонда», также будем строить по точкам. Оценке «отлично» будет советовать количество жалоб, равных 10. Оценка 3 – «хорошо» – соответствует, когда количество жалоб от пациентов 27. Оценка «удовлетворительно» соответствует 55 жалобам от пациентов. Оценка «неудовлетворительно» соответствует 70 жалобам.

Комплексная оценка одного канала представляет собой линейную свертку трех заданных характеристик. Перед вычислением комплексной оценки целесообразно расставлять важности выбранных критериев: «Уровень загрузки отделения» – 100 %, «Количество жалоб на входе в стационар» – 100 %, «Количество жалоб в стационаре, связанных с увеличением коечного фонда» – 70 %. При данных значениях важности критериев взвешенные коэффициенты будут соответствовать значениям $10/27$, $10/27$ и $7/27$.

Данные важности подлежат согласованию, описанному далее в статье.

В зависимости от значений характеристик и проставленных степеней и важностей будет вычисляться комплексная оценка (рис. 7).

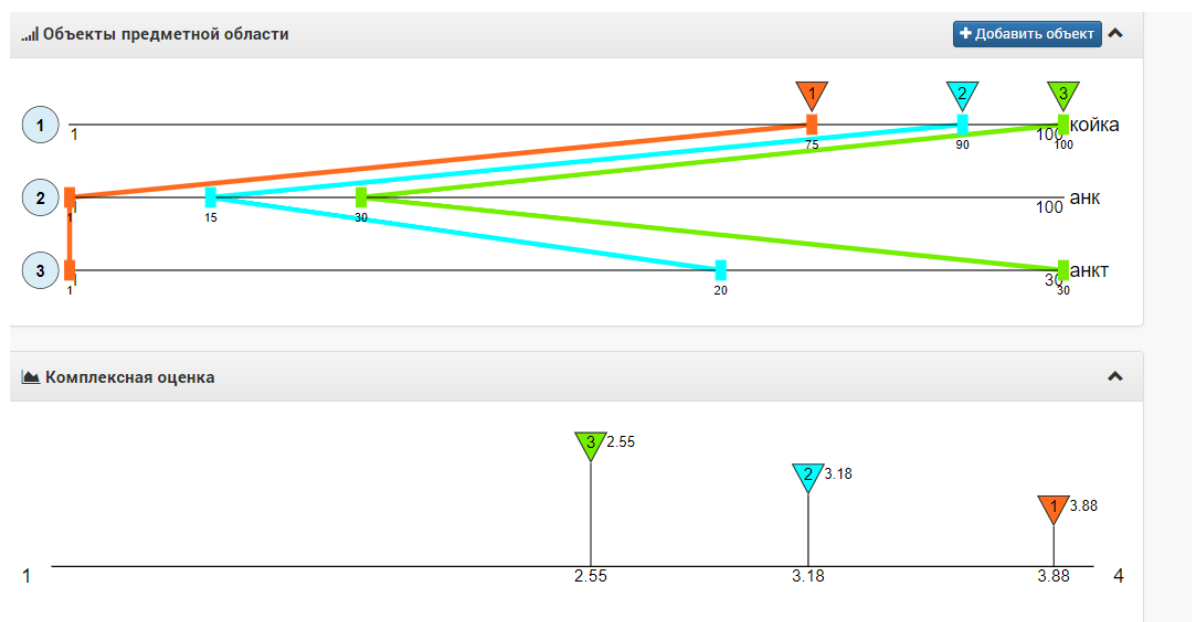


Рис. 7. Процедура определения комплексной оценки одного канала в зависимости от изменения заданных характеристик
Fig. 7. Procedure for determining the integrated assessment of one channel depending on the change in the specified characteristics

Комплексные оценки одного канала в зависимости от изменения заданных характеристик при помощи механизма комплексного оценивания «Декон» представлены в табл. 1.

Данные имитационной модели работы отделения
Data of the simulation model of the department work

Таблица 1
Table 1

Характеристики	Время работы ЛПУ, недели		
	1	2	3
Уровень загруженности отделения A^3 , койко-мест (шт.)	75	90	100
Количество жалоб на входе c^q , анкет	0	20	40
Количество жалоб в стационаре c^h , анкет	0	15	30
Комплексная оценка \hat{A}	3,88	3,18	2,55

Комплексная оценка состояния ЛПУ будет находиться следующим образом:

$$\hat{A} = \sum_{i=1}^n k_i + k_q c_i^q + k_c c_i^h,$$

где $k_i + k_q + k_c = 1$; n – количество отделений.

Таким образом, значение комплексной оценки позволит оценивать эффективность работы инфекционного отделения ЛПУ во времени, с точки зрения эффективности хозяйственной деятельности и принятия дальнейших оперативных решений на институциональном уровне.

4. Вопросы практического применения метода модифицированной медианы для согласования высказываний различных групп экспертов

Вопросы согласования поднимаются при несовпадающих мнениях агентов в случае проведения опроса и дальнейшей обработки результатов. В качестве механизма обработки экспертных оценок предлагается использование модифицированной медианы для согласованных оценок [23].

Вопросы согласования предпочтений с применением метода модифицированной медианы были изучены при несовпадающих инвестиционных решениях в отношении объектов культурного значения [23] и в социально-экономических системах при несовпадающих интересах при управлении многоквартирным домом [24]. Расширим понимание вопроса в использовании данного метода при управлении ЛПУ, когда процессы загрузки отделений нестационарные.

В предложенной модифицированной процедуре медианной схемы, способствующей принятию согласованных инвестиционных решений при управлении объектами культурного наследия, процедура нахождения однозначного согласованного решения применяется в случае несовпадения интересов агентов при построении сертификата функции приведения (далее ФП) к стандартной шкале комплексного оценивания [1, 4], где 1 – «неудовлетворительно», 2 – «удовлетворительно», 3 – «хорошо», 4 – «отлично». Суть данного метода в том, что согласованное решение лежит вне области правой и левой коалиции, а устанавливается с помощью пересечения специальной функции W_i и $f(i+1)$ высказываний экспертов (непрерывная функция, в которой значения экспертов проранжированы и участвует мнение виртуального эксперта с нецелочисленным номером). На рис. 8 представлена графическая схема определения согласованного решения методом модифицированной медианы.

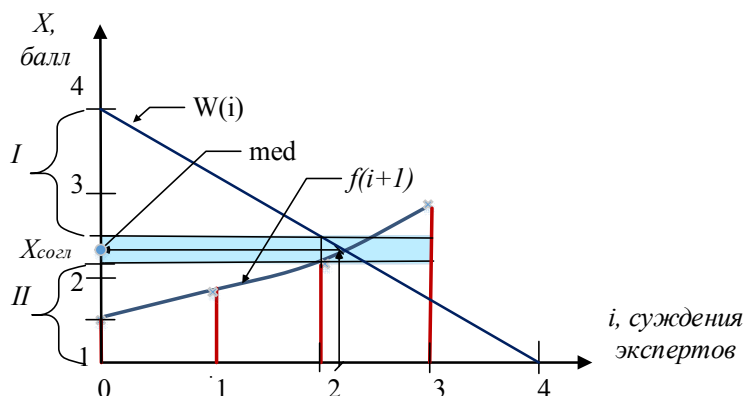


Рис. 8. Графическая схема определения согласованного решения методом модифицированной медианы
Fig. 8. Modified median consensus diagram

Авторами ранее была рассмотрена возможность применения данного метода в отношении взвешенных коэффициентов линейной свертки при управлении сложными объектами на примере ЛПУ [21]. В представленной работе предлагается расширить данное применение механизма модифицированной медианы в организационных СМО для следующих случаев:

1) согласования точек сезонного колебания значений сертификата ФП при нестационарном потоке заявок пациентов такими экспертами, как главный врач, старшая медсестра и заведующими лечебными отделениями;

2) согласования коэффициентов важности в моделях комплексного оценивания с целью коррекции взвешенных коэффициентов, влияющих на комплексную оценку и др.

Проиллюстрируем (рис. 9) согласование точек сезонного колебания заявок на госпитализацию ФП, описывающее загрузку учреждения (1 случай).

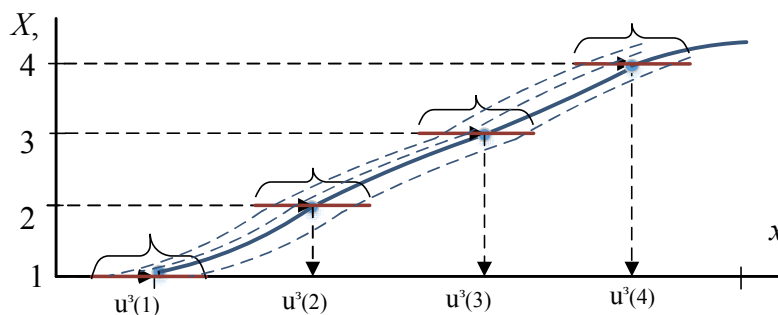


Рис. 9. Процесс согласования по сертификату функции приведения
Fig. 9. Certificate Approval Process of the Cast Function

Также необходимо согласование сертификата ФП в особых точках. Стоит отметить, что при использовании данного метода устанавливается конкретное согласованное значение, а не диапазон значений. Отметим, что при работе данной процедуры получаются две коалиции, одна из которых имеет тенденции к завышению оценок, а другие – к занижению. Причем процедура нахождения модифицированной медианы требует нахождения согласованного решения вне области *I* и *II* коалиции. Это отличие означает, что требуется установление такого (нового) решения, которое будет устраивать *I* и *II* коалицию.

Рассмотрим случай согласования коэффициентов важности.

При вычислении комплексной оценки с целью определения состояния отделений и дальнейших управляющих воздействий стоит обратить особое внимание на ранжирование и согласование коэффициентов важности. В нашем случае их три: коэффициент k_t – показывает важность уровня загрузки в комплексной оценке канала, k_q – важность жалоб пациентов, ожидающих в очереди, k_c – важность жалоб пациентов, находящихся в стационаре, получающих лечение

(в том числе недовольство из-за уплотненности). Коэффициенты важности позволят управлять значением комплексной оценки, что становится актуальным при управляющем воздействии на систему и коэффициенты важности подлежат в этом случае пересмотру и согласованию экспертами. Предлагается согласовывать данные коэффициенты важности при смене режима отделений. Следует отметить, что согласовывать их необходимо одновременно: k_i, k_q, k_c , так как при изменении одного коэффициента происходит изменение степеней важности остальных. Это обосновывается формулой веса (коэффициентов важности к. в.):

$$\bar{k}_i = \frac{к.в.(k_i)}{(k_i + k_q + k_c)},$$

где $k_i + k_q + k_c = 1$ – по правилу нормирования.

Предлагается методом модифицированной медианы согласовывать данные коэффициенты важности, используя графоаналитический метод. В табл. 2 представлены результаты опроса экспертов, среди которых Эксперт 1 – главный врач, Эксперт 2 – заведующий лечебным отделением 1, Эксперт 3 – заведующий лечебным отделением 2, Эксперт 4 – заведующий лечебным отделением 3, Эксперт 5 – заведующий лечебным отделением 4, Эксперт 6 – заведующий инфекционным отделением 5, Эксперт 7 – старшая медсестра.

В табл. 2 представим данные, подлежащие согласованию методом модифицированной медианы, и согласованные значения коэффициентов важности.

Данные для согласования методом модифицированной медианы

Таблица 2

Data for matching by the modified median method

Table 2

Коэффициенты	Субъективная оценка ситуации экспертами							Согласованные важности $v_i, согл$	Согласованные коэффициенты $\bar{k}_i согл$
	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4	Эксперт 5	Эксперт 6	Эксперт 7		
k_i	100	90	95	87	90	100	100	88	0,36
k_q	100	100	80	85	95	100	70	82	0,34
k_c	100	100	80	90	70	100	70	74	0,3

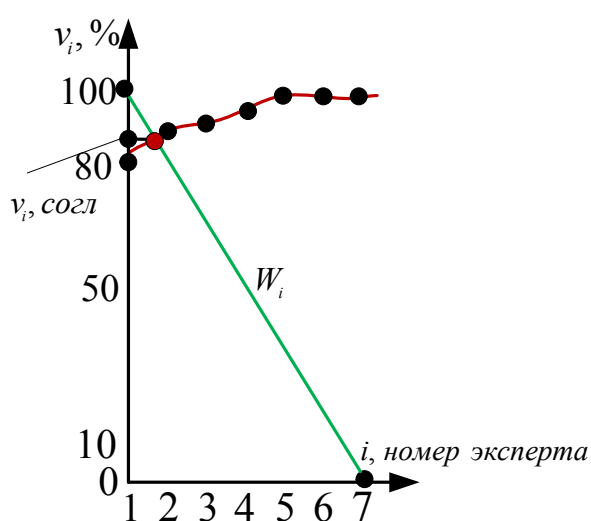


Рис. 10. Пример согласования методом модифицированной медианы коэффициента важности $v_i, согл$

Fig. 10. Example of modified median importance factor matching $v_i, согл$

На рис. 10 представим графически процесс согласования интересов.

Следующим шагом является установление согласованных коэффициентов важности ($k_i согл$) с использованием программного продукта комплексного оценивания «Декон»:

$$k_i + k_q + k_c = 1, k_i = 0,34; k_q = 0,36; k_c = 0,3.$$

Таким образом, изучено практическое применение метода модифицированной медианы в вопросах управления ЛПУ. Стоит отметить, что принимаемые решения, получаемые методом модифицированной медианы, являются компромиссными для обеих коалиций. Преимущество применения графоаналитического метода в данном вопросе делает процедуру нахождения согласованного решения наглядной и удобной.

Заключение

В данной работе ЛПУ рассмотрено с позиции теории организационных систем. Предложена возможность управления поведением СМО с целью алгоритмизации происходящих процессов и выделения ресурса коечного фонда по принципу необходимости и достаточности. Использование методов имитационного моделирования позволяет обеспечить своевременный переход в нужное состояние системы посредством регулирования коэффициентов интенсивности нагрузки. В статье предложено использование комплексного оценивания отделения ЛПУ для обоснования эффективного решения. Предложено согласовывать точки сезонного колебания (в сертификатах ФП) и коэффициенты важности в моделях комплексного оценивания (с целями коррекции взвешенных коэффициентов), опираясь на метод модифицированной медианы. Можно заключить, что изложенные мероприятия помогают улучшить работу медицинского учреждения при нестационарных процессах.

Список литературы

1. Комерсантъ. 2022. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4314405?ya> (дата обращения 28.06.2022).
2. Чижевский Я.А. Государственная политика финансирования сферы здравоохранения в России сквозь призму ценностно-ориентированного подхода // Теории и проблемы политических исследований. 2021. Т. 10, № 6А. С. 39–50. DOI: 10.34670/AR.2021.17.49.005
3. Хайруллин И.И., Габитова С.Е. Действия медицинской организации при массовом поступлении пациентов (обзор литературы и практический опыт) // Общественное здоровье и здравоохранение. 2020. № 3 (67). С. 38–47.
4. Логиновский О.В., Гилев Д.В. Совершенствование алгоритма управления оказанием медицинских услуг на основе комитетных методов // Прикладная математика и вопросы управления. 2020. № 4. С. 105–120. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07
5. Теория управления организационными системами и другие науки об управлении организациями / В.Н. Бурков, М.В. Губко, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков // Проблемы управления. 2012. № 4. С. 2–10.
6. Газизова Л.Р., Галимуллина Ф.Ф. Система массового обслуживания в частной медицине // Управление устойчивым развитием. 2018. № 6 (19). С. 5–10.
7. Гнезденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Стереотип, 2021. 400 с.
8. Application of queuing theory to the analysis of changes in outpatients' waiting times in hospitals introducing EMR / W.C. Kyoung, M.K. Seong, M.C. Young, U.S. Yong // Healthcare Informatics Research. 2017. Vol. 23 (1). P. 35–42. DOI: 10.4258/hir.2017.23.1.35
9. Квантификация предпочтений хозяйствующих субъектов управления в задачах цифровой экономики / В.А. Харитонов, А.О. Алексеев, А.В. Вычегжанин и др.; под ред. проф., д-ра техн. наук В.А. Харитонova. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. 172 с.
10. Техно-гуманитарный взгляд на проблемы проективного управления в социально-экономических системах / В.А. Харитонов, Д.Н. Кривоги́на, В.С. Спирина, А.С. Саламатина // Прикладная математика и вопросы управления. 2020. № 1. С. 140–158. DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.09
11. Харитонов В.А., Алексеев А.О., Кривоги́на Д.Н. Парадигма инженерной поддержки технологий субъектно-ориентированного управления [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та. 2015. № 112. С. 208–229. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/15.pdf> (дата обращения: 20.04.2022).
12. Methodology of Structural Management of Organizational Systems on the Basis of Competitive Mechanisms / V. Kharitonov, D. Krivogina, A. Salamatina, E. Guselnikova // Proceedings of 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2022, Virtual, Lipetsk, 9–11 November 2022. IEEE, 2022. P.241–244.
13. Харитонов В.А., Алексеев А.О. Концепция субъектно-ориентированного управления в социальных и экономических системах [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электрон. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та. 2015. № 109. С. 690–706. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/43.pdf> (дата обращения: 07.05.2022).

14. Бурков В.Н., Исаков М.Б., Коргин Н.А. Применение обобщенных медианных схем для построения неманипулируемых механизмов активной экспертизы // Проблемы управления. 2008. № 4. С. 38–47.
15. Burkov V.N., Sergeev V.A., Korgin N.A. Identification of integrated rating mechanisms as optimization problem // 2020 13th International Conference “Management of large-scale system development” (MLSD), 28–30 Sept. 2020, Moscow, Russia. Los Alamitos: IEEE, 2020. Art. no. 20153257. 5 p. DOI: 10.1109/MLSD49919.2020.9247638
16. Алексеев А.О., Коргин Н.А. Матричный анонимный обобщенный медианный механизм с правом делегирования сообщений // Прикладная математика и вопросы управления. 2016. № 4. С. 137–156.
17. Модели согласованного комплексного оценивания в задачах принятия решений / В.Н. Бурков, И.В. Буркова, Н.А. Коргин, А.В. Щепкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 2. С. 5–13. DOI: 10.14529/ctcr200201
18. Алексеев А.О., Катаева Т.А. Применение механизмов комплексного оценивания и матричных неанонимных обобщенных медианных механизмов для согласования интересов агентов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2021. Т. 21, № 3. С. 75–89. DOI: 10.14529/ctcr210308
19. Новиков Д.А., Русяева Е.Ю. Философия управления // Вопросы философии. 2013. № 5. С. 19–26.
20. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 208 с.
21. Интеллектуальные технологии управления структурами организационных систем массового обслуживания при нестационарном потоке заявок / В.А. Харитонов, Д.Н. Кривогино, А.С. Саламатина и др. // Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем: междунар. конф., Санкт-Петербург, 15–17 марта 2022 г.: сб. докл. СПб.: СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2022. С. 117–119.
22. Харитонов В.А., Дмитриюков М.С., Ларионова Р.А. Алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия согласованных инвестиционных решений в задачах управления объектами культурного наследия // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2016. № 3 (30). С. 61–76. DOI: 10.17072/1994-9960-2016-3-61-76
23. Дмитриюков М.С., Харитонов В.А., Сафонов Н.И. Совершенствование механизма активной экспертизы на основе обобщенных медианных схем для задач многоаспектного управления в социально-экономических системах // Прикладная математика и вопросы управления. 2016. № 2. С. 41–55.
24. Ларионова Р.А. Алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в лечебно-профилактическом учреждении // Прикладная математика и вопросы управления. 2021. № 1. С. 81–94. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.1.05

References

1. Kommersant. 2022. (In Russ.) Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4314405?ya> (accessed 28.06.2022).
2. Chizhevskii Ya.A. Russian state policy of healthcare financing through the glance of value-based approach. *Theories and problems of political studies*. 2021;10(6A):39–50. DOI: 10.34670/AR.2021.17.49.005 (In Russ.)
3. Khayrullin I.I., Gabitova S.E. The actions of the medical organization in the mass admission of patients (literature review and practical experience). *Public Health and Health Care*. 2020;3(67):38–47. (In Russ.)
4. Loginovskiy O.V., Gilev D.V. Improving the algorithm for managing the provision of medical services based on committee methods. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2020;4:105–120. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2020.4.07
5. Burkov V.N., Gubko M.V., Korgin N.A., Novikov D.A. [The theory of management of organizational systems and other sciences about the management of organizations]. *Control Sciences*, 2012;4:2–10. (In Russ.)

6. Gazizova, L.R., Galimulina, F.F. Mass service system in private medicine. *Managing sustainable development*, 2018;6(19):5–10. (In Russ.)
7. Gnezdenko B.V., Kovalenko I.N. *Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* [Introduction to queuing theory]. Moscow: Stereotype; 2021. 400 p. (In Russ.)
8. Cho K.W., Kim S.M., Chae Y.M., Song Y.U. Application of queuing theory to the analysis of changes in outpatients' waiting times in hospitals introducing EMR. *Healthcare Informatics Research*. 2017;23(1):35–42. DOI: 10.4258/hir.2017.23.1.35
9. Kharitonov V.A., Alekseev A.O., Vychezhzhanin A.V. et al. *Kvantifikatsiya predpochteniy khozyaystvuyushchikh sub"ektov upravleniya v zadachakh tsifrovoy ekonomiki* [Quantification of preferences of economic subjects of management in the tasks of the digital economy]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2018. 172 p. (In Russ.)
10. Kharitonov V.A., Krivogina D.N., Spirina V.S., Salamatina A.S. Techno-humanitarian view on problems of projective management in socio-economic systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*, 2020, no. 1, pp. 140–158. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2020.1.09
11. Haritonov V.A., Alekseev A.O., Krivogina D.N. Engineering support paradigm of subject-oriented control technologies. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015;112:208–229. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/08/pdf/15.pdf> (accessed 20.04.2022). (In Russ.)
12. Kharitonov V., Krivogina D., Salamatina A., Gusel'nikova E. Methodology of Structural Management of Organizational Systems on the Basis of Competitive Mechanisms. In: *Proceedings of 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2022, Virtual, Lipetsk, 9–11 November 2022*. IEEE; 2022. P. 241–244.
13. Haritonov V.A., Alekseev A.O. The concept of agent-based control in social and economic systems. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015;109:690–706. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/43.pdf> (accessed 07.05.2022). (In Russ.)
14. Burkov V.N., Isakov M.B., Korgin N.A. Application of Generalized Median Voter Schemes to Designing Strategy-proof Mechanisms of Multicriteria Active Expertise. *Automation and Remote Control*. 2010;71:1681–1694. DOI: 10.1134/S0005117910080163
15. Burkov V.N., Sergeev V.A., Korgin N.A. Identification of integrated rating mechanisms as optimization problem. In: *2020 13th International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD), 28–30 Sept. 2020, Moscow, Russia*. Los Alamitos: IEEE; 2020. Art. no. 20153257. 5 p. DOI: 10.1109/MLSD49919.2020.9247638
16. Alekseev A.O., Korgin N.A. The Matrix Anonymous Generalized Median Schemes with Delegation. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2016;4:137–156. (In Russ.)
17. Burkov V.N., Burkova I.V., Korgin N.A., Shchepkin A.V. Models for Coordinated Integrated Assessment in Decision-Making Problems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2020;20(2):5–13. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200201
18. Alekseev A.O., Kataeva T.A. Application of Integrated Rating Mechanisms and Matrix Non-Anonymous Generalized Median Voter Schemes to Coordination of the Agents' Interests. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2021;21(3):75–89. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210308
19. Novikov D.A, Rusaeva E.Yu. [Management philosophy]. *Questions of Philosophy*. 2013;5:19–26. (In Russ.)
20. Venttsel E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: tasks, principles, methodology]. Moscow: Publishing house of physical, mathematical and technical literature; 1988. 208 p. (In Russ.)
21. Kharitonov V.A., Krivogina D.N., Salamatina A.S., Larionova R.A., Salamatin A.A., Gusel'nikova E.D. [Intelligent technologies for managing the structures of organizational queuing systems with a non-stationary flow of requests]. In: *Proektirovanie i obespechenie kachestva informatsionnykh protsessov i sistem: mezhdunar. konf.* [Design and quality assurance of information processes and systems: International conference]. St. Petersburg; 2022. P. 117–119. (In Russ.)
22. Kharitonov V.A., Dmitryukov M.S., Larionova R.A. Making concerted investment decisions in cultural heritage management: algorithms of intellectual support. *Vestnik Permskogo uni-*

versiteta. Seria: Ekonomika = Perm University Herald. Economy. 2016;3(30):61–76. (In Russ.) DOI: 10.17072/1994-9960-2016-3-61-76

23. Dmitriukov M.S., Kharitonov V.A., Safonov N.I. Improvement of mechanisms of active expertise based on generalized media scheme for the problem of multidimensional management in social and economic systems. *Applied Mathematics and Control Sciences.* 2016;2:41–55. (In Russ.)

24. Larionova R.A. Intelligent decision-making support algorithms for health-care institutions. *Applied Mathematics and Control Sciences.* 2021;1:81–94. (In Russ.) DOI: 10.15593/2499-9873/2021.1.05

Информация об авторах

Ларионова Регина Альбертовна, ассистент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; r.larionova@mail.ru.

Кривоги́на Дарья Николаевна, канд. техн. наук, доц. кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; darya.krivogina@gmail.com.

Харитонов Валерий Алексеевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; cems@pstu.ru.

Information about the authors

Regina A. Larionova, Assistant of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; r.larionova@mail.ru.

Darya N. Krivogina, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; darya.krivogina@gmail.com.

Valery A. Kharitonov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Construction Engineering and Materials Science, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; cems@pstu.ru.

Статья поступила в редакцию 23.11.2022

The article was submitted 23.11.2022

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. Структура статьи:

До основного текста статьи приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- тип статьи: научная, обзорная, дискуссионная, персоналии, рецензия, краткое сообщение и т. п.;
- УДК;
- название (не более 12–15 слов);
- основные сведения об авторе (авторах):
 - имя, отчество, фамилия автора (полностью);
 - наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), где работает или учится автор;
 - электронный адрес автора (e-mail);
 - открытый идентификатор ученого (ORCID) при наличии в форме электронного адреса в сети Интернет;
- аннотация (200–250 слов),
- ключевые слова (словосочетания);
- благодарности (при наличии).

Основной текст статьи может состоять из следующих частей:

- введение;
- текст статьи (структурированный по разделам). Допускается деление основного текста статьи на тематические рубрики и подрубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);
- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

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

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования 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 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки); 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки); 2.3.4 – 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»
2023. Том 23, № 1

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 24.01.2023. Дата выхода в свет 30.01.2023. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 13,48. Тираж 500 экз. Заказ 1/6. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.