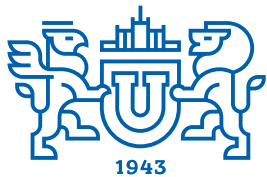


ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2024
Т.24, № 4

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);
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);
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

2024

Vol. 24, no. 4

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;

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;

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. Krasovsky Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;

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

Shiryaev 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

- БОЛОДУРИНА И.П., НЕФЕДОВ Д.А. Применение большой языковой модели для уменьшения ложнопозитивных срабатываний в задачах выявления аномалий в сетевом трафике ... 5

Управление в технических системах

- ТЕЛЕГИН А.И., ГУСЕВ Е.В., КОДКИН В.Л., ШИРЯЕВ В.И. X3D-прототипирование моделей тел манипуляционных роботов 16
- ИБРЯЕВА О.Л. Задача экспоненциального анализа – применения, методы, проблемы 31
- ЦИОПЛИАКИС Н.И. Блочный фильтр Калмана с линейной вычислительной сложностью для комплексированных с техническим зрением инерциальных навигационных систем 43

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

- ISAEV M.M., QURBANOV M.H., MAKHMUDBEYLI L.S., ISKENDEROVA S.A., QULIYEVA A.I. A method for the nonlinear approximation of complex shaped conversion functions 57

Управление в социально-экономических системах

- АВЕРИНА Т.А. Научно-техническое сопровождение при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства 66
- ФЕДОСЕЕВ С.А., МИНИН А.А. Определение уровня защищенности бренда застройщика 80
- БАРКАЛОВ С.А., КУРОЧКА П.Н., СЕРЕБРЯКОВА Е.А. Модели теории графов как инструмент моделирования организационных систем (задача о клике) 89

Автоматизированные системы управления технологическими процессами

- KAZARINOV L.S., BARBASOVA T.A., BAUMAN E.V., SAMOLETOVA P.A., CHEREPANOVA S.A. Automated information control system for optimal planning of blast-furnace ironmaking 103

Краткие сообщения

- БОРОДИН С.И., ГУСЕВ Е.В., КОРОВИН А.М., НЕКРАСОВ С.Г. Исследование вопроса связи информационной модели строительства объекта (BIM) и сметной стоимости объекта 113

CONTENTS

Informatics and computer engineering

BOLODURINA I.P., NEFEDOV D.A. The application of a large language model for reducing false positives in anomaly detection tasks in network traffic	5
--	---

Control in technical systems

TELEGIN A.I., GUSEV E.V., KODKIN V.L., SHIRIAEV V.I. X3D prototyping of manipulation robot body models	16
IBRYAEVA O.L. Exponential analysis task – applications, methods, problems	31
TSIOPLIAKIS N.I. Block Kalman filter with linear computational complexity for integrated visual-inertial navigation systems	43

Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

ISAEV M.M., QURBANOV M.H., MAKHMUDBEYLI L.S., ISKENDEROVA S.A., QULIYEVA A.I. A method for the nonlinear approximation of complex shaped conversion functions	57
---	----

Control in social and economic systems

AVERINA T.A. Scientific and technical support in life cycle management of capital construction projects	66
FEDOSEEV S.A., MININ A.A. Determining the level of protection of a developer's brand	80
BARKALOV S.A., KUROCHKA P.N., SEREBRYAKOVA E.A. Models of graph theory as a tool for modeling organizational systems (clique problem)	89

Automated process control systems

KAZARINOV L.S., BARBASOVA T.A., BAUMAN E.V., SAMOLETOVA P.A., CHEREPANOVA S.A. Automated information control system for optimal planning of blast-furnace ironmaking	103
--	-----

Brief reports

BORODIN S.I., GUSEV E.V., KOROVIN A.M., NEKRASOV S.G. Relationship between the building information model (BIM-model) and the estimated cost	113
--	-----

Информатика и вычислительная техника Informatics and computer engineering

Научная статья

УДК 004.056

DOI: 10.14529/ctcr240401

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛЬШОЙ ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЛОЖНОПОЗИТИВНЫХ СРАБАТЫВАНИЙ В ЗАДАЧАХ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ

И.П. Болодурина, ipbolodurina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0096-2587>

Д.А. Нефедов, namilaze@gmail.com

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Аннотация. С каждым годом сетевые угрозы становятся все более изощренными и сложными, что требует от исследователей сферы сетевой безопасности искать и разрабатывать новые и более совершенные методы по обнаружению угроз безопасности. Несмотря на то, что ведутся постоянные исследования в данной области и исследователи совершенствуют алгоритмы машинного обучения, значительной проблемой остаются ложноположительные срабатывания систем обнаружения вторжений. В связи с этим разработка способов и подходов по уменьшению количества ложноположительных срабатываний является одной из наиболее актуальных задач. **Цель исследования:** изучить эффективность и возможности применения больших языковых моделей для снижения ложноположительных срабатываний систем обнаружения вторжений. **Материалы и методы.** Основное внимание в статье уделяется обучению рекуррентных нейронных сетей для обнаружения аномалий с использованием обучающей выборки сетевого трафика CIS-IDS2017. Особое внимание уделялось алгоритмам выбора ключевых значений в обучающей выборке для повышения точности обучения модели. В работе изучается архитектура рекуррентных сетей, а также их преимущества и недостатки в специфике решаемой задачи. Дальнейшее исследование проводилось с использованием большой языковой модели, в результате которого было произведено сравнение количества ложнопозитивных срабатываний с данным решением и без него. **Результаты.** Построена базовая модель нейронной сети на основе алгоритма LSTM для изначальной классификации сетевых угроз, а также обучена большая языковая модель. Проводится сравнительный анализ результатов обнаружения аномалий с большой языковой моделью и без нее. Эксперименты подтверждают эффективность предложенного решения. **Заключение.** Полученные результаты исследования могут быть использованы при разработке новых, современных интеллектуальных систем обнаружения вторжений для повышения точности обнаружения угроз или повышения эффективности существующих алгоритмов обнаружения вторжений.

Ключевые слова: большие языковые модели, нейронные сети, системы обнаружения вторжений, сетевой трафик, машинное обучение

Для цитирования: Болодурина И.П., Нефедов Д.А. Применение большой языковой модели для уменьшения ложнопозитивных срабатываний в задачах выявления аномалий в сетевом трафике // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr240401

THE APPLICATION OF A LARGE LANGUAGE MODEL FOR REDUCING FALSE POSITIVES IN ANOMALY DETECTION TASKS IN NETWORK TRAFFIC

I.P. Bolodurina, ipbolodurina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0096-2587>

D.A. Nefedov, namilaze@gmail.com

Orenburg State University, Orenburg, Russia

Abstract. Every year, network threats become more sophisticated and complex, which requires researchers in the field of network security to seek and develop new and more advanced methods for detecting security threats. Despite the fact that constant research is being conducted in this area and researchers are improving machine learning algorithms, false positive triggers of intrusion detection systems remain a significant problem. In this regard, the development of methods and approaches to reduce the number of false positive positives is one of the most urgent tasks. **Aim.** The purpose of the study is to study the effectiveness and possibilities of using large language models to reduce false positive responses of intrusion detection systems. **Materials and methods.** The main focus of the article is on training recurrent neural networks to detect anomalies using a training sample of CIS-IDS2017 network traffic. Special attention was paid to algorithms for selecting key values in the training sample to improve the accuracy of the training model. The paper examines the architecture of recurrent networks, as well as their advantages and disadvantages in the specifics of the task being solved. Further research was conducted using a large language model, as a result of which a comparison was made of the number of false positives with and without this solution. **Results.** A basic neural network model based on the LSTM algorithm for the initial classification of network threats was built, and a large language model was trained. A comparative analysis of the results of anomaly detection with and without a large linguistic model is carried out. Experiments confirm the effectiveness of the proposed solution. **Conclusion.** The obtained research results can be used in the development of new, modern intelligent intrusion detection systems to improve the accuracy of threat detection or increase the effectiveness of existing intrusion detection algorithms.

Keywords: large language models, neural networks, intrusion detection systems, network traffic, machine learning

For citation: Bolodurina I.P., Nefedov D.A. The application of a large language model for reducing false positives in anomaly detection tasks in network traffic. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240401

Введение

За последнее десятилетие в интернете наблюдался экспоненциальный рост сетевого трафика и данных, чему способствовало распространение подключенных устройств, облачных вычислений и появление сервисов потокового видео, а также постепенное внедрение удаленной работы и дистанционного образования. Из-за совокупности этих, а также других неучтенных факторов вырос объем и ценность трафика, что и привело к увеличению количества и сложности сетевых атак [1]. В то же время сами вредоносные атаки стали более изощренными, поэтому сейчас основная задача заключается в выявлении неизвестных и запутанных вредоносных действий, так как злоумышленники начали использовать различные методы уклонения для сокрытия своих действий, чтобы предотвратить их обнаружение. Кроме того, наблюдается рост числа угроз безопасности, таких как атаки нулевого дня, нацеленные на пользователей Интернета. Следовательно, компьютерная безопасность приобрела важное значение, поскольку использование информационных технологий стало частью нашей повседневной жизни. В связи с этим вопросы обеспечения защиты данных и устойчивость информационных систем требуют особой проработки и внимания со стороны исследований.

Системы обнаружения вторжений (IDS) стали наиболее широко используемыми компонентами обеспечения безопасности современных компьютерных систем. Эти системы используют ряд

разнообразных механизмов реагирования для обнаружения уязвимостей, выявления незаконных действий и вторжений, а также принятия соответствующих мер для противодействия данным угрозам [2]. Данные системы могут использовать различные алгоритмы для обнаружения вторжений, например методы, основанные на статистических данных, методы, основанные на знаниях, а также методы, основанные на машинном обучении.

Однако на сегодняшний день не существует ни одной системы, которая обеспечивала бы 100%-ную защиту и надежность работы [3]. В большинстве случаев IDS подвержены ложнопозитивным и ложнонегативным срабатываниям, что создает определенные сложности для фирм и бизнеса, а также информационной инфраструктуры. Ложнонегативными срабатываниями называются события, когда реальная угроза не была замечена системой обнаружения вторжения и проникла в контур защищаемой системы. Ложнопозитивное срабатывание – это ситуация, когда система посчитала безопасную активность за вредоносную.

Основное негативное влияние ложнопозитивных срабатываний заключается в дополнительной нагрузке на бизнес и фирмы, вызванной постоянными прерываниями активности систем, дополнительной нагрузкой на персонал и потерей денежных ресурсов, поэтому уменьшение таких срабатываний является важной задачей для повышения эффективности и надежности систем обнаружения вторжений [4].

Цель исследования

Ложнопозитивные срабатывания приводят к проблемам с бесперебойной работой фирм и вызывают дополнительную финансовую нагрузку. В рамках данной статьи проведено исследование возможности использования быстро развивающихся и постоянно совершенствующихся больших языковых моделей (LLM) для задач обнаружения угроз и уменьшения ложнопозитивных срабатываний [5].

Особенность данной работы заключается в подходе к противодействию ложнопозитивным срабатываниям с использованием связки из рекуррентной нейронной сети с долговременной краткосрочной памятью (LSTM), которая позволяет быстро классифицировать входящий сетевой пакет как угрозу, а также большой языковой модели (LLM), которая подтверждает или отвергает результат классификации нейронной сети. LSTM эффективно анализирует временные последовательности данных [6], позволяя классифицировать данные, и находит в них аномалии, затем LLM используется для дополнительного анализа и проверки результатов классификации, обеспечивая дополнительный уровень точности и снижая количество ложнопозитивных срабатываний. Данный подход позволяет более эффективно противодействовать угрозам в реальном времени и минимизировать финансовые потери, связанные с ложными срабатываниями.

Обзор исследований по данному направлению

Исследованиями по созданию эффективных систем обнаружения вторжений занимаются ученые по всему миру. В последние пять лет благодаря бурному развитию больших языковых моделей (LLM) исследователи обратили активное внимание на эти модели и пытаются различными способами применять их для улучшения систем обнаружения вторжений. Основная причина этого интереса заключается в том, что LLM обладают значительными возможностями для обработки и анализа больших объемов данных, что критично для задач сетевой безопасности. Данные модели способны выявлять скрытые паттерны и аномалии в сетевом трафике, которые могут быть неочевидны при использовании традиционных методов анализа.

В данном исследовании [7] авторы рассмотрели возможность применения больших языковых моделей в кибербезопасности. Авторы рассмотрели используемые LLM и их уникальные свойства для каждой модели, возможность применения их в различных задачах безопасности, а также специализированные техники для этих задач. Особое внимание было уделено качественным данным. Авторы пришли к выводу, что использование больших языковых моделей – перспективная область, требующая тщательной проработки и анализа.

Команда исследователей в статье [8] рассмотрела эволюцию систем обнаружения вторжений (IDS) с момента их появления в 1980-х годах до современного использования совместно с методами искусственного интеллекта. Традиционные методы IDS, такие как сигнатурные и аномальные обнаружения, имеют ограничения перед новыми и сложными киберугрозами. Введение

AI-основанных IDS, использующих машинное обучение и модели, такие как ChatGPT, показало улучшение в адаптивности, распознавании паттернов и способности к реальному времени обнаружения и реагирования на атаки.

Авторы статьи [9] представили инновационную систему автоматического исправления программ с использованием больших языковых моделей (LLM), таких как GPT, в сочетании с формальной верификацией. Их инструмент демонстрирует значительные улучшения по сравнению с существующими работами, достигая 99,9 % компилируемости кода и успешно исправляя уязвимый код с буферными переполнениями и ошибками разыменования с успехом до 80 %. Интеграция LLM и формальной верификации является многообещающим направлением для будущих исследований, хотя требует решения проблем, таких как высокие вычислительные ресурсы и возможное введение непреднамеренных уязвимостей.

Авторы в исследовании [10] предложили CAN-BERT – систему обнаружения сетевых вторжений на основе глубокого обучения для обнаружения кибератак на протокол CAN в автомобильных системах. Модель BERT используется для изучения последовательностей арбитражных идентификаторов CAN и аномалий. Эксперименты на наборе данных “Car Hacking: Attack & Defense Challenge 2020” показали, что CAN-BERT превосходит существующие методы, обнаруживая вторжения в реальном времени с задержкой 0,8–3 мс и достигая F1-скорости от 0,81 до 0,99.

В статье [11] авторы исследуют использование больших языковых моделей (LLMs), таких как ChatGPT, для повышения эффективности защиты от киберугроз. Авторами рассматриваются различные уровни угроз – от простых атак с использованием доступных скриптов до сложных атак АPT-групп. Основное внимание в работе уделялось тому, как большие языковые модели могут помочь на различных этапах атаки, предлагая интеллектуальные команды, интерпретируя результаты и моделируя будущие решения злоумышленников. Исследование показывает, что эти модели могут значительно улучшить процесс обнаружения и реагирования на угрозы.

Исследователями работы [12] рассмотрена возможность использования языковой модели ChatGPT в фазе предварительной разведки при тестировании информационных систем на проникновение. В работе авторы анализируют, как ChatGPT может быть использован для получения различных типов разведывательных данных, необходимых для идентификации потенциальных уязвимостей в системах организаций. Типы данных, которые ChatGPT может предоставить для фазы разведки, – IP-адреса, технологические стеки, используемые вендорами, информация о доменных именах и протоколы сети, также авторами уделено особое внимание примерам конкретных запросов к данной модели и ожидаемые ответы для каждого типа информации.

Таким образом, анализ работ в области кибербезопасности показал, что использование больших языковых моделей является актуальной темой исследования. Кроме того, в настоящее время существует большое множество разных подходов по применению больших языковых моделей для повышения кибербезопасности, но для уменьшения ложнопозитивных срабатываний данные модели еще не использовались, поэтому в ходе данного исследования будет рассмотрено применение большой языковой модели для уменьшения ложнопозитивных срабатываний систем обнаружения вторжений.

Архитектура программного решения

Для реализации данного программного комплекса были разработаны отдельные модули, которые взаимодействуют между собой. Первый модуль – система, разработанная для отбора ключевых признаков и нормализации обучающей выборки [13]. Данный модуль обеспечивает улучшение качества данных, используемых в процессе обучения модели. Второй модуль – классификатор, в ядре которого находится обученная нейронная сеть, которая способна классифицировать сетевой трафик как вредоносный или безопасный. Нейронная сеть обладает высокой скоростью обнаружения аномалий в трафике и быстрой выдачей результатов распознавания. Результат работы данного модуля – отнесение каждого сетевого пакета к определенному классу – вредоносный или безопасный. Таким образом, второй модуль служит для первичного выявления аномалий в трафике.

Основой третьего модуля является система преобразования текста в векторное пространство для последующего использования его в большой языковой модели (LLM). Этот модуль преобразует текстовые данные в формат, удобный для обработки языковой моделью, что, в свою очередь,

позволяет эффективно использовать семантическую информацию о трафике. Четвёртый модуль – большая языковая модель, которая повторно анализирует сетевые пакеты, в которых была обнаружена угроза. Данная модель обрабатывает текстовые данные и выполняет задачи семантического анализа. На вход модель получает результаты классификации из второго модуля, текстовые команды и данные из семантического векторного пространства [14]. Семантическое векторное пространство представляет различные типы угроз и их характеристики. Это пространство строится на основе данных о вредоносном трафике и позволяет моделировать и понимать различные угрозы на семантическом уровне. LLM анализирует, соответствует ли результат классификации из второго модуля известным паттернам и характеристикам угроз для повышения точности и надёжности в обнаружении сетевых угроз.

Данный подход к построению системы обнаружения вторжений обеспечил комплексный анализ сетевого трафика, объединяя преимущества различных методов обработки данных и глубокого обучения, что значительно повышает эффективность и точность выявления угроз в сетевом трафике.

Архитектура LSTM-сетей

В качестве метода классификации угроз в исследовании используются рекуррентные нейронные сети (RNN), а именно рекуррентные сети с долговременной краткосрочной памятью (LSTM). Если сравнивать архитектуру рекуррентных сетей с архитектурой стандартных нейронных сетей, использующих одиночные входные данные, рекуррентные нейронные сети используют серию исторических данных в качестве входных значений [15]. Эта архитектура сети позволяет хранить извлеченную информацию о предыдущих входных данных в своей памяти для последующего использования в прогнозировании и классификации. В стандартных рекуррентных сетях есть только один слой активации, который обновляет состояние памяти на каждом шаге. Типовая архитектура развернутых рекуррентных сетей представлена на рис. 1. В стандартных RNN есть только один слой активации, который обновляет состояние памяти на каждом шаге.

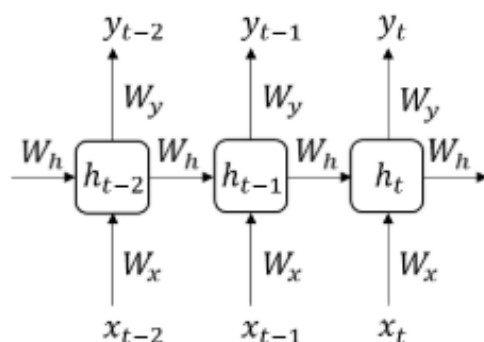


Рис. 1. Типовая архитектура рекуррентной нейронной сети
Fig. 1. Typical architecture of a recurrent neural network

Состояние пространства h_t в момент времени t можно рассматривать как память сети, вычисленную следующим образом:

$$h_t = f(W_h h_{t-1} + W_x x_t), \quad (1)$$

где x_t – входные данные; h_t – скрытое состояние; y_t – выходные данные; W_x , W_h , W_y – соответствующие веса.

Основное преимущество LSTM-сетей – во внутреннем строении повторяющихся ячеек памяти. Эти сети включают дополнительные компоненты, такие как «ячейки памяти» и различные «входные», «выходные» и «забывающие» гейты, которые помогают эффективно управлять градиентами и сохранять долгосрочные зависимости в данных. Также в данной архитектуре сетей добавляются состояния ячейки памяти, обозначаемые как c_t , которые взаимодействуют с четырьмя слоями:

$$c_t = f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \tanh(W_{ch} h_{t-1} + W_{cx} x_t + b_c), \quad (2)$$

слоем забывания f_t , используемым для принятия решения о том, какую информацию из предыдущей ячейки следует забыть:

$$f_t = \sigma(W_{fc} \circ c_{t-1} + W_{fh} h_{t-1} + W_{fx} x_t + b_f), \quad (3)$$

слоем входных данных i_t , который решает какую часть информации стоит сохранить:

$$i_t = \sigma(W_{ic} \circ c_{t-1} + W_{ih} h_{t-1} + W_{ix} x_t + b_i), \quad (4)$$

слоем гиперболического тангенса $\tanh$ для извлечения информации в новое состояние ячейки:

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)}, \quad (5)$$

слоем выходных данных o_t , который действует как фильтр для извлечения информации из состояния ячейки для формирования выходного сигнала:

$$o_t = \sigma(W_{oc} \circ c_t + W_{oh} h_{t-1} + W_{ox} x_t + b_o), \quad (6)$$

скрытым состоянием $h(t)$:

$$h_t = o_t \circ \tanh(c_t). \quad (7)$$

Архитектура LSTM сети представлена на рис. 2.

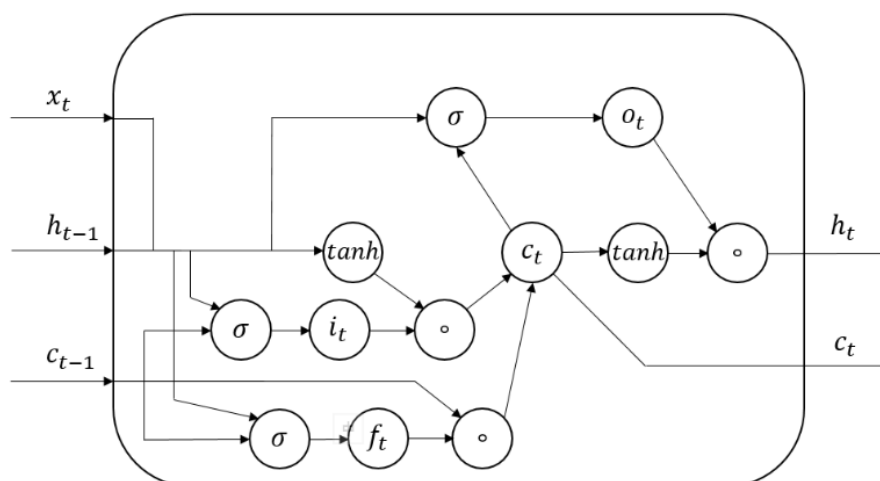


Рис. 2. Архитектура рекуррентной сети с долгой краткосрочной памятью
Fig. 2. Recurrent network architecture with long short-term memory

Благодаря этим особенностям LSTM-сети значительно превосходят стандартные RNN при работе с последовательными данными, делая их идеальным выбором для задач прогнозирования и классификации в условиях наличия длительных временных зависимостей. Таким образом, архитектура LSTM-сетей позволила в данной работе с высокой эффективностью классифицировать вредоносные сетевые пакеты, что является важным шагом для их последующей проверки с помощью большой языковой модели.

Большая языковая модель

В качестве большой языковой модели в данном исследовании используется Mixtral 8x7B. Особенность данной модели заключается в использовании архитектуры разреженного экспертного состава (Sparse Mixture of Experts). В отличие от классической архитектуры, основанной на трансформерах, данная модель разделяет прямую нейронную связь на набор экспертов [16]. Данная архитектура позволяет существенно снизить вычислительную нагрузку на систему. Вместо активации всех нейронов модель активирует только те нейроны, которые необходимы для выполнения конкретной задачи. Это приводит к уменьшению количества параметров, участвующих в вычислениях, что, в свою очередь, повышает скорость работы модели. Благодаря этому модель, имеющая 42 миллиарда параметров, функционирует со скоростью модели с 7 миллиардами параметров.

Общую модель архитектуры разряженного экспертного состава можно представить следующим образом:

$$y = \sum_{i \in S(x)} G_i(x) E_i(x), \quad (8)$$

где y – выход модели; $S(x)$ – подмножество выбранных экспертов для входного сигнала x_i ; $G(x)$ – функция гейта, которая определяет вес i -го эксперта для выходного сигнала x_i ; $E_i(x)$ – выход i -го эксперта для входного сигнала x .

Данные преимущества делают данную модель подходящим инструментом для обработки и анализа данных в задачах обнаружения сетевых угроз, обеспечивая высокую точность и скорость работы. Архитектура Mixtral 8x7B в рамках данной системы позволила с высокой эффективностью и наименьшими затратами ресурсов системы использовать все преимущества больших языковых моделей для обработки и анализа данных.

Подготовка данных и обучение системы

Для обучения модели LSTM использовалась выборка сетевого трафика CIC-IDS2017 [17]. Набор данных CICIDS2017 содержит как безопасные сетевые пакеты, так и современные распределенные атаки, собранные в течение длительного времени. Объем обучающей выборки составляет более трех миллионов сетевых пакетов. Данные представлены в формате CSV с разделителем и 78 полями, где каждое поле представляет определенную характеристику сетевого трафика. Этот набор данных также включает результаты анализа сетевого трафика с использованием CICFlowMeter и маркировкой потоков на основе отметки времени, IP-адресов источника и назначения, портов источника и назначения, протоколов и атак (файлы CSV) и др., а также присутствует текстовая метка для классификации трафика как вредоносного или безопасного.

Поскольку данная обучающая выборка содержит множество параметров, использование их всех для обучения нейронной сети приведет к перегрузке модели и снижению ее эффективности [18]. Для решения этой проблемы воспользуемся методами отбора признаков. Эти методы позволят выделить наиболее значимые поля в сетевой выборке, что, в свою очередь, улучшает качество обучения классификатора и помогает избежать перегрузки модели. Для отбора признаков мы применили три метода: метод взаимной информации, метод оценки важности признаков с помощью случайного леса, а также рекурсивное устранение признаков. Для получения окончательного набора признаков берется пересечение результатов всех трех методов с добавлением небольшого зазора в 0,05 % для учета погрешностей и возможных вариаций в данных.

В результате отбора были выделены и отобраны наиболее значимые характеристики сетевых пакетов, такие как заголовки, содержимое пакетов, временные метки и другие метаданные. Это позволило уменьшить размерность данных и улучшить качество классификации.

Обучение системы происходило с помощью алгоритма машинного обучения на Python с использованием библиотеки scikit-learn. Данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 75 % на обучение и 25 % – на тестирование модели. Для решения задачи распознавания угроз была построена модель рекуррентной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) с использованием следующих слоев:

Bidirectional(LSTM) – двунаправленный LSTM-слой, состоящий из двух LSTM-слоев, работающих в противоположных направлениях. Этот слой позволяет модели захватывать контекст из обеих сторон временной последовательности;

BatchNormalization – нормализует активации батчей, уменьшая внутренние ковариационные сдвиги и ускоряя обучение;

Dropout – слой регуляризации, обнуляющий часть входных нейронов с заданной вероятностью;

LSTM – слой, предназначенный для работы с временными последовательностями;

Dense – полносвязный слой.

Архитектура LSTM сети представлена на рис. 3.

```

model = Sequential()

model.add(Bidirectional(LSTM(256, return_sequences=True), input_shape=input_shape))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.3))
model.add(Bidirectional(LSTM(256, return_sequences=True)))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.3))
model.add(Bidirectional(LSTM(128, return_sequences=True)))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.4))

model.add(LSTM(128, return_sequences=True))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.4))
model.add(LSTM(64, return_sequences=False))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.4))

model.add(Dense(128, activation='relu'))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.5))
model.add(Dense(64, activation='relu'))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.5))
model.add(Dense(32, activation='relu'))
model.add(BatchNormalization())
model.add(Dropout(0.5))

model.add(Dense(num_classes, activation='softmax'))
model.compile(loss='categorical_crossentropy', optimizer=Adam(learning_rate=0.001), metrics=['accuracy'])

```

Рис. 3. Архитектура сети
Fig. 3. Network architecture

Функция активации softmax преобразует необработанные выходные данные нейронной сети в вектор вероятностей, по сути выполняя распределение вероятностей по входным классам:

$$\text{softmax}(z)_i = \left(\frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^N e^{z_j}} \right)^i, \quad (9)$$

где z – вектор необработанных выходных данных нейронной сети; N – количество выходных классов; $\text{softmax}(z)_i$ – прогнозируемая вероятность того, что тестовый вход принадлежит классу i .

Обучение модели заняло 8 часов при количестве 50 эпох обучения.

Потери при обучении, а также точность обучения представлена на рис. 4.

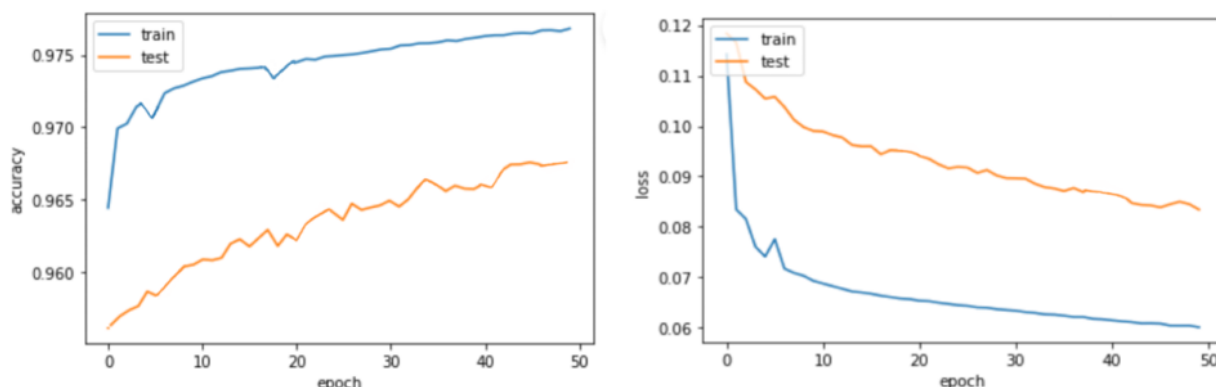


Рис. 4. Потери при обучении и точность
Fig. 4. Learning losses and accuracy

Из результата обучения можно сделать вывод: LSTM-сеть демонстрирует высокую точность и низкие потери на обучающей и тестовой выборках, что указывает на её эффективность в классификации сетевых пакетов как вредоносных или безопасных. Из графика на рис. 4 можно увидеть, что точность модели составила 0,9689. Наблюдается небольшое переобучение, выражающееся в небольшом расхождении точности и потерь между обучающими и тестовыми данными, однако это расхождение незначительно и некритично. В целом обученная модель показывает хорошие результаты и обладает способностью к обобщению.

Результаты экспериментального исследования

Для проверки возможности снижения количества ложнопозитивных срабатываний проведен эксперимент, в котором сравнивалась работа классической архитектуры нейронной сети LSTM (Long Short-Term Memory) с добавлением модуля большой языковой модели (LLM). Коэффициент ложнопозитивных срабатываний (FP rate) вычислялся по формуле

$$\text{FP rate} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{TN}}, \quad (10)$$

где FP – количество ложнопозитивных срабатываний; TN – количество верно классифицированных вредоносных пакетов.

Эксперимент проведен пять раз, и усредненные значения по пяти экспериментам представлены в таблице.

Результат сравнения
The result of the comparison

Модель	Входящие пакеты	Верно классифицированные пакеты	Ложнопозитивные срабатывания	Коэффициент ложнопозитивных срабатываний
LTSM	150 000	14 879	843	0,05361
LTSM + LLM	150 000	15 124	514	0,03286

Результаты показывают, что использование большой языковой модели в качестве дополнительного этапа проверки срабатываний системы обнаружения вторжений действительно позволяет снизить количество ложноположительных срабатываний на 38,64 %. Это значительное улучшение позволяет повысить надёжность системы обнаружения вторжений, уменьшая количество ложных тревог и, соответственно, снижая нагрузку на аналитиков безопасности. Проверено, может ли большая языковая модель улучшить работу системы обнаружения вторжений.

Заключение

В рамках данного исследования проведено экспериментальное исследование возможности использования больших языковых моделей (LLM) для снижения ложнопозитивных срабатываний в системах обнаружения вторжений (IDS). Важность данной темы продиктована стремительным ростом объема и сложности сетевых атак, что обусловлено экспоненциальным ростом сетевого трафика и данных в последние годы.

В ходе эксперимента построена и обучена базовая модель нейронной сети для быстрой классификации пакетов в сетевом трафике на вредоносные и безопасные. Особое внимание уделено архитектуре и работе LSTM-сетей, а также особенностям использования большой языковой модели Mixtral 8x7B, основанной на архитектуре разряженного экспертного состава. Для подготовки данных и обучения системы использовался набор данных CIC-IDS2017. Для улучшения обучения модели проведен отбор ключевых признаков из данной выборки. В ходе обучения LSTM-сети достигнуты высокие показатели точности и низкие потери, что свидетельствует об эффективности модели в классификации сетевых пакетов как вредоносных или безопасных.

Экспериментальные исследования подтвердили, что добавление модуля большой языковой модели позволяет значительно снизить количество ложнопозитивных срабатываний. Коэффициент ложнопозитивных срабатываний снизился на 38,64 %, что свидетельствует о существенном улучшении надежности системы обнаружения вторжений. Однако существенным недостатком является долгий ответ модели, который необходимо будет уменьшать в будущих исследованиях.

Список литературы/References

1. Odlyzko A.M. Internet Traffic Growth: Sources and Implications. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2003;5247. DOI: 10.1117/12.512942
2. Khraisat A., Gondal I., Vamplew P., Kamruzzaman J. Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges. *Cybersecurity*. 2019;2:20. DOI: 10.1186/s42400-019-0038-7
3. Ho C.Y., Lin Y.R., Lai Y.C., Chen I.W., Wang F.Y., Tai W.H. False Positives and Negatives from Real Traffic with Intrusion Detection/Prevention Systems. *International Journal of Future Computer and Communication*. 2012;1(2):87–90. DOI: 10.7763/IJFCC.2012.V1.23
4. Naveed H., Khan A.U., Qiu S., Saqib M., Anwar S., Usman M., Akhtar N., Barnes N., Mian A. *A Comprehensive Overview of Large Language Models*. Preprint submitted to Elsevier, 2024.
5. Wan X., Liu H., Xu H., Zhang X. Network Traffic Prediction Based on LSTM and Transfer Learning. *IEEE Access*. 2022;10:86181–86193. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3199372
6. Xu H., Wang S., Li N., Wang K., Zhao Y., Chen K. et al. Large Language Models for Cyber Security: A Systematic Literature Review. arXiv preprint arXiv:2405.04760, 2024.
7. Markevych M., Dawson M. A Review of Enhancing Intrusion Detection Systems for Cybersecurity Using Artificial Intelligence (AI). *International Conference Knowledge-Based Organization*. 2023;29(3). DOI: 10.2478/kbo-2023-0072
8. Charalambous Y., Tihanyi N., Jain R., Sun Y., Ferrag M.A., Cordeiro L.C. A New Era in Software Security: Towards Self-Healing Software via Large Language Models and Formal Verification. arXiv:2305.14752 [cs.SE], 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.14752
9. Alkhatib N., Mushtaq M., Ghauch H., Danger J.L. CAN-BERT do it? Controller Area Network Intrusion Detection System based on BERT Language Model. arXiv:2210.09439 [cs.LG], 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2210.09439
10. Moskal S., Laney S., Hemberg E., O'Reilly U.M. LLMs Killed the Script Kiddie: How Agents Supported by Large Language Models Change the Landscape of Network Threat Testing. arXiv preprint arXiv:2310.06936v1 [cs.CR], 2023.
11. Temara S. Maximizing Penetration Testing Success with Effective Reconnaissance Techniques using ChatGPT. arXiv preprint arXiv:2307.06391 [cs.CR], 2023.
12. Pudjihartono N., Fadason T., Kempa-Liehr A.W., O'Sullivan J.M. A Review of Feature Selection Methods for Machine Learning-Based Disease Risk Prediction. *Front Bioinform*. 2022;2:927312. DOI: 10.3389/fbinf.2022.927312
13. Xu S., Wu Z., Zhao H., Shu P., Liu Z., Liao W., Li S., Sikora A., Liu T., Li X. Reasoning Before Comparison: LLM-Enhanced Semantic Similarity Metrics for Domain Specialized Text Analysis. arXiv preprint arXiv:2402.11398v2 [cs.CL], 2024.
14. Van Houdt G., Mosquera C., Nápoles G. A Review on the Long Short-Term Memory Model. *Artificial Intelligence Review*. 2020;53(1). DOI: 10.1007/s10462-020-09838-1
15. Staudemeyer R.C., Morris E.R. Understanding LSTM – a tutorial into Long Short-Term Memory Recurrent Neural Networks. arXiv preprint arXiv:1909.09586v1, 2019.
16. Jiang A.Q., Sablayrolles A., Roux A., Mensch A., Savary B., Bamford C., Chaplot D.S., de las Casas D., Bou Hanna E., Bressand F., Lengyel G., Bour G., Lample G., Lavaud L.R., Saulnier L., Lachaux M.-A., Stock P., Subramanian S., Yang S., Antoniak S., Le Scao T., Gervet T., Lavril T., Wang T., Lacroix T., El Sayed W. Mixtral of Experts. arXiv preprint arXiv:2401.04088 [cs.LG], 2024.
17. Intrusion Detection Evaluation Dataset (CIC-IDS2017). Available at: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html/> (accessed 12.04.2023).
18. Cai J., Luo J., Wang S., Yang S. Feature selection in machine learning: A new perspective. *Neurocomputing*. 2018;300:70–79.

Информация об авторах

Болодурина Ирина Павловна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной математики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; ipbolodurina@yandex.ru.

Нефедов Дмитрий Алексеевич, аспирант кафедры прикладной математики, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; namilaze@gmail.com.

Information about the authors

Irina P. Bolodurina, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; ipbolodurina@yandex.ru.

Dmitry A. Nefedov, Postgraduate student of the Department of Applied Mathematics, Orenburg State University, Orenburg, Russia; namilaze@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

The article was submitted 19.06.2024

Управление в технических системах Control in technical systems

Научная статья

УДК 004.92

DOI: 10.14529/ctcr240402

Х3D-ПРОТОТИПИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТЕЛ МАНИПУЛЯЦИОННЫХ РОБОТОВ

А.И. Телегин¹, teleginai@susu.ru

Е.В. Гусев², gusevev@susu.ru

В.Л. Кодкин², kodkinvl@susu.ru

В.И. Ширяев², shiriaevvi@susu.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Целью является исследование возможностей и способов отдельного Х3D-моделирования структуры манипуляционных роботов и внешнего Х3D-прототипирования моделей их тел, не требующих для их практического использования знаний Х3D-программирования виртуальных миров. **Методы исследования** относятся к трехмерному моделированию, кинематике систем тел и робототехнике. Рассматриваются типовые ангулярные манипуляционные роботы, состоящие из поворотной платформы, плеча, предплечья и трехзвенной кисти, на конце которой установлен схват с двумя пальцами. **Результаты исследования** содержат описание разработанных способов разметки структуры и геометрии манипуляционных роботов и трех способов (простейшего, простого и типового) создания цифрового кода, на основе которого автоматически генерируется Х3D-модель тела. Для каждого из этих способов отмечаются достоинства, недостатки и ограничения, а также рекомендуются случаи их эффективного использования. Практически применять подробно описанные способы сможет любой пользователь, освоивший цифровое кодирование моделей тел. Это особенно актуально для тех, кто не владеет декларативным xml-программированием и в частности расширяемым языком разметки Х3D, для изучения которого книг и статей на русском языке очень мало. Для желающих углубить свои знания Х3D на практике здесь представлены и описаны разработанные Х3D- и JS-коды моделирования манипуляционных роботов и их тел. Приведены примеры Х3D-разметки структуры типовых манипуляционных роботов с шестью вращательными кинематическими параметрами, которые охватывают большинство ангулярных промышленных роботов. **Заключение.** Полученные результаты используются для внешнего Х3D-прототипирования манипуляционных роботов и их схватов в составе Х3D-моделей роботизированных технологических комплексов межоперационного транспортирования, покраски, сварки, сборки с целью симуляции выполнения соответствующих технологических процессов.

Ключевые слова: xml, Х3D, JS, внешнее Х3D-прототипирование, симуляция, манипуляционный робот, Х3D-модели тел, РТК

Для цитирования: Х3D-прототипирование моделей тел манипуляционных роботов / А.И. Телегин, Е.В. Гусев, В.Л. Кодкин, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 16–30. DOI: 10.14529/ctcr240402

X3D PROTOTYPING OF MANIPULATION ROBOT BODY MODELS

A.I. Telegin¹, teleginai@susu.ru
E.V. Gusev², gusevev@susu.ru
V.L. Kodkin², kodkinvl@susu.ru
V.I. Shiriaev², shiriaevvi@susu.ru

¹ South Ural State University, Miass, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The aim is to investigate the possibilities and methods for separate X3D modeling of the structure of manipulation robots and external X3D prototyping of their body models, without requiring knowledge of X3D programming of virtual worlds for their practical use. The research methods are related to 3D modeling, body system kinematics and robotics. Typical angular manipulative robots consisting of a rotating platform, a shoulder, a forearm, and a three-linked hand with a two-fingered grip at the end are considered. **The results of the study** contain a description of the developed ways of marking up the structure and geometry of manipulation robots and three ways (simple, simple and typical) of creating a digital code, based on which an X3D model of the body is automatically generated. For each of these methods, advantages, disadvantages and limitations are noted, and cases of their effective use are recommended. Practical application of the methods described in detail will be possible for any user who has mastered digital coding of body models. This is especially important for those who do not know declarative xml-programming and in particular the extensible markup language X3D, for the study of which books and articles in Russian are very few. For those who wish to deepen their knowledge of X3D in practice here are presented and described developed X3D and JS-codes for modeling manipulation robots and their bodies. Examples of X3D layout of the structure of typical manipulation robots with six rotational kinematic pairs, which cover most angular industrial robots, are given. **Conclusion.** The obtained results are used for external X3D prototyping of manipulation robots and their grippers as part of X3D models of robotic technological complexes of inter-operational transportation, painting, welding, assembly in order to simulate the performance of the corresponding technological processes.

Keywords: xml, X3D, JS, external X3D prototyping, simulation, manipulation robot, X3D body models, RTC

For citation: Telegin A.I., Gusev E.V., Kodkin V.L., Shiriaev V.I. X3D prototyping of manipulation robot body models. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):16–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240402

Введение

Исследования проведены в рамках разработки прототипа Программной Системы (ПС) для создания цифровых моделей Роботизированных Технологических Комплексов (РТК) с адаптивным управлением. Цифровые Модели (ЦМ) РТК предназначены для симуляции процессов проектирования (расчета и конструирования) РТК, в частности, создания и выполнения с заданным качеством различных технологических процессов, например, межоперационного транспортирования, покраски, сварки, сборки. ПС «СисТелРТК» разрабатывается на основе теоретической, прикладной и вычислительной механики Систем Тел [1]. Цель использования этой ПС – снизить затраты на разработку, изготовление опытного образца и его испытания, производство, обслуживание, настройку параметров и минимизировать отказы в работе опытного образца, сокращая количество тестирований программ управления физически реализованных РТК. Подобные ПС эксплуатируются на всем жизненном цикле РТК, т. е. от его проектирования до утилизации [2, 3].

Предшествующие версии ПС «СисТел» имели недостатки. Например, описанная в работах [4, 5] версия ПС имела примитивные графические возможности. Однако реализованные на Фортране программы решения задач механики и управления успешно использовались миасскими специалистами в разработках Манипуляционного Робота (МР) «Кобра» и РТК-600 [6, 7]. Продвинутые графические возможности появились в версии ПС, написанной на языке Паскаль

с использованием открытой графической системы OpenGL [8]. Упрощение процесса разработки ПС «СисТел» с реализацией возможностей ее аддитивного функционального наполнения появилось с переходом на XML-технологии [9, 10]. Единственный недостаток такого перехода связан с уменьшением быстродействия анимации. Однако быстродействие имеет практическое значение в основном для программ управления приводами МР. Поэтому разработка функций кодогенерации управляющих программ на языках низкого уровня, например, для систем команд конкретных электроприводов, снимает этот недостаток [11, 12].

Близкий аналог предлагаемого способа моделирования МР применяется в робототехническом симуляторе Gazebo, в котором используется URDF (Unified Robot Description Format) – унифицированный формат описания робота [13]. Для того чтобы создать, изменить или дополнить модель робота в симуляторе Gazebo, используется xml-файл. Он содержит детальное описание робота, т. е. всех его элементов и связей между ними. Например, тег `<joint>` описывает сочленения, т. е. связи элементов (фиксированные, вращающиеся, призматические и т. д.). Тег `<gazebo>` содержит информацию, необходимую для описания сенсоров, параметров трения и взаимодействия элементов робота между собой.

В отличие от универсальных робототехнических симуляторов [13–15], например, RoboDK (ПС для моделирования промышленных роботов и создания программ управления роботизированными системами), Gazebo, V-REP (симуляторы манипуляционных, плавающих, ползающих, ходящих, летающих роботов и их совокупностей), предлагаемый здесь подход является предметно-ориентированным с возможностями расширения. ПС «СисТелРТК» ориентирована на разработку симуляторов РТК. Она создается путем расширения ПС «СисТелМР» и, в свою очередь, может быть расширена до ПС «СисТелГПС», предназначенной для создания ЦМ гибкой производственной системы с целью ее симуляции. Из ПС «СисТелМР» путем расширения можно создать ПС «СисТелША» (для построения ЦМ двуногих шагающих аппаратов для их симуляции), из которых создать ПС «СисТелШМ» (для построения ЦМ 4-, 6- и многоногих шагающих машин с целью их симуляции). Перечисленные здесь типы систем тел имеют определенные особенности в их математических моделях, в постановках и решениях задач механики и управления. Более того, процессы симуляции их функционирования имеют существенные различия. Поэтому «валить все в одну кучу» неразумно и противоречит методологии XML.

Постановка задачи: разработать способы независимого X3D-моделирования структуры МР и моделей его тел, не требующих для их практического использования знаний декларативного языка разметки трехмерных миров, и продемонстрировать их на примерах моделирования типовых МР с шестью степенями подвижности и двухпальцевым хватом; обосновать эффективность предлагаемых способов описания входной информации для идентификации параметров моделей тел МР.

1. Правила описания МР

Для формального описания МР в первую очередь необходимо по кинематической схеме и/или внешнему виду (фотографии, картинке, мысленному воображению) МР занумеровать тела числами 0, 1, 2, 3, ..., N. Здесь приняты следующие обозначения: 0 – номер неподвижного тела (стойки, станины, основания); 1 – первое по порядку тело, образующее с неподвижным телом Кинематическую Пару (КП), т. е. подвижное сочленение (шарнир или связь, допускающую движение этого тела относительно неподвижного тела); 2 – второе тело, образующее КП с первым телом и т. д.; ...; N – номер последнего по порядку тела (не считая пальцы схвата), образующего КП с предшествующим (N–1)-м телом. В ангулярных МР с шестью степенями свободы подвижные тела имеют, как правило, следующие названия (имена): 1 – поворотная платформа; 2 – плечо; 3 – локоть (предплечье); 4, 5, 6 – тела кисти. В таких МР первые три тела переносят точку подвеса схвата в целевое положение, а тела кисти обеспечивают целевую ориентацию схвата. В ПС «СисТел» для идентификации тел МР используется обобщенное имя – "тело_i", где i – порядковый номер тела. Например, тела кисти имеют имена "тело_4", "тело_5", "тело_6".

В дальнейшем номер или обозначение (i, j, k) номера в скобках после аббревиатуры указывает на номер тела МР. Например, КП(i) – КП, связывающая i-е тело с его базой, т. е. с предшествующим по порядку телом. ВКП(i) – Вращательная КП(i), в которой i-е тело может вращаться вокруг оси, жестко связанной с предшествующим телом. ПКП(i) – Поступательная КП(i), в которой i-е тело может двигаться поступательно вдоль оси, жестко связанной с предшествующим телом.

После нумерации тел и их КП необходимо в каждом теле выбрать полюс, т. е. с i -м телом ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) жестко связать точку O_i , соблюдая следующее правило. Для ВКП(i) точка O_i должна лежать на оси относительного вращения i -го тела. На этой оси выбрать орт $\bar{q}_i$ (вектор единичной длины), определяющий положительное направление вращения по правилу. Если смотреть навстречу орту $\bar{q}_i$, то поворот на угол q_i против хода стрелки часов считается положительным. По умолчанию в ПС «СисТел» углы поворота измеряются в радианах.

Для формального (математического) описания МР необходимо выбрать исходное (начальное) положение тел МР, в котором для ВКП(i) считать, что $q_i = 0$. В этом положении с i -м телом необходимо мысленно связать правую Систему Координат Тела (СКТ) по правилу. Ось $O_i X_i$ направить горизонтально вправо, ось $O_i Y_i$ – вертикально вверх. Это правило позволяет не изображать СКТ на Кинематических Схемах (КС) МР, что уменьшает их громоздкость. Важно отметить, что выбранный способ введения СКТ обеспечивает (в исходном положении тел ВКП) параллельность их осей соответствующим осям (OX , OY , OZ) правой Системы Координат (СК) ХЗD-сцены с началом в центре экрана монитора, где ось OX направлена горизонтально вправо, ось OY – вертикально вверх.

В исходном положении всех тел МР, т. е. когда $q_i = 0$ для всех i , необходимо определять Относительные Координаты Полюса (ОКП) O_i в СК базы i -го тела, т. е. в СКТ($i-1$).

С целью упрощения формального описания МР и его математических моделей (уравнений кинематики, статики и динамики) желательно совмещать полюса тел. Например, если оси вращения соседних тел пересекаются, то полюса этих тел желательно совместить. Как правило, оси вращения трех последних тел типового МР (тела кисти) пересекаются. Поэтому можно положить $O_4 = O_5 = O_6$. В случае ПКП($i-1$) и ВКП(i) можно положить $O_{i-1} = O_i$, так как полюс поступательного тела можно выбирать в любом месте этого тела. Для ВКП(1) полюса неподвижного и первого тела условимся совмещать, т. е. $O_0 = O_1$.

Для упрощения процесса геометрической и кинематической параметризации МР рекомендуется на КС МР изображать полюса тел и орты $\bar{q}_i$ или положительные направления обобщенных координат q_i , описывающих относительные положения тел. Многочисленные примеры построения КС МР приведены в учебном пособии [1]. В ПС «СисТелМР» для автоматической svg-генерации КС типовых МР используется JS-функция "генераторКС типовых МР.js".

Остальные правила и рекомендации формального описания МР относятся к параметризации структурных, массо-инерционных, динамических и физических свойств, которые выходят за пределы заявленной темы статьи.

2. Кинематические схемы типовых ангулярных МР

Большинство ангулярных МР имеют КС, изображенную на рис. 1, или являются ее частным случаем, соответствующим нулевым значениям геометрических параметров L_1 и/или L_3 [1]. Например, КС в случае $L_1 = L_3 = 0$ имеют следующие МР: Motoman SIA20F (Fanuc, Япония); PUMA; Кобра (г. Миасс, Россия). Случаю $L_3 = 0$ соответствуют КС, например, следующих МР: Kawasaki RS03N (Япония); Staubli RX170L (Швейцария); Reis RV10-6 (Германия). Случаю $L_1 = 0$ соответствуют КС, например, следующих МР: Россия – TUR 15, Япония – Toshiba TV 800, Германия – Kuka KR 210-2. КС, в которой $L_1 > 0$, $L_3 > 0$, назовем типовой. В следующих строках перечислены примеры МР с типовыми КС и приведены числовые значения (в мм) их геометрических параметров L_i , где $i = 0, 1, 2, \dots, 5$.

Motoman MA1440:	$L_0 = 450, L_1 = 155, L_2 = 614, L_3 = 200, L_4 = 640, L_5 = 100.$
ROBOTOX_P6A-750-6:	$L_0 = 327, L_1 = 150, L_2 = 300, L_3 = 146, L_4 = 370, L_5 = 110.$
CR-35iA:	$L_0 = 1180, L_1 = 150, L_2 = 790, L_3 = 150, L_4 = 860, L_5 = 100.$
HIWIN RA605:	$L_0 = 434, L_1 = 30, L_2 = 281, L_3 = 40, L_4 = 338, L_5 = 86.$

В рекламных проспектах МР их схемы содержат, как правило, не только перечисленные геометрические размеры, но и диапазоны изменения углов поворота тел. В ПС «СисТелМР» для типовых ангулярных МР эти диапазоны привязываются к исходному положению на рис. 1, в котором считается, что $q_i = 0$ для всех i . Методика учета кинематических параметров и их ограниче-

ний рассматривается в кинематическом прототипировании МР, что выходит за рамки заявленной темы статьи.

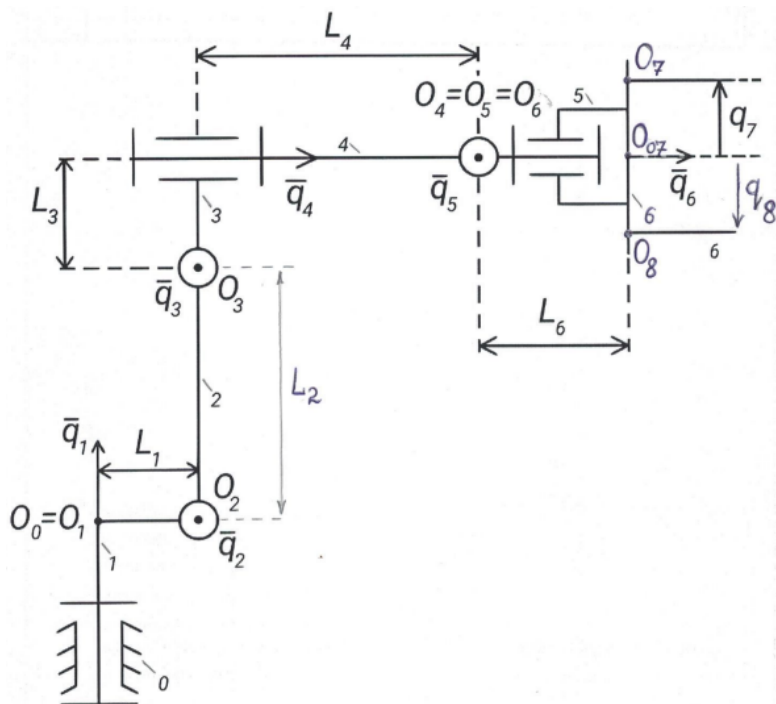


Рис. 1. КС типовых ангулярных МР
Fig. 1. Kinematic diagrams (KD) of typical angular manipulation robots (MR)

Учитывая, что математические модели ангулярных МР в виде аналитических формул с явно выраженными параметрами имеют минимальное число арифметических операций для КС, в которых $L_1 = L_3 = 0$, назовем такие МР простыми [1]. Очевидно, что с геометрической точки зрения простые МР отличаются друг от друга только длинами плеча и предплечья (локтя). Их КС с двухпальцевым схватом изображена на рис. 2.

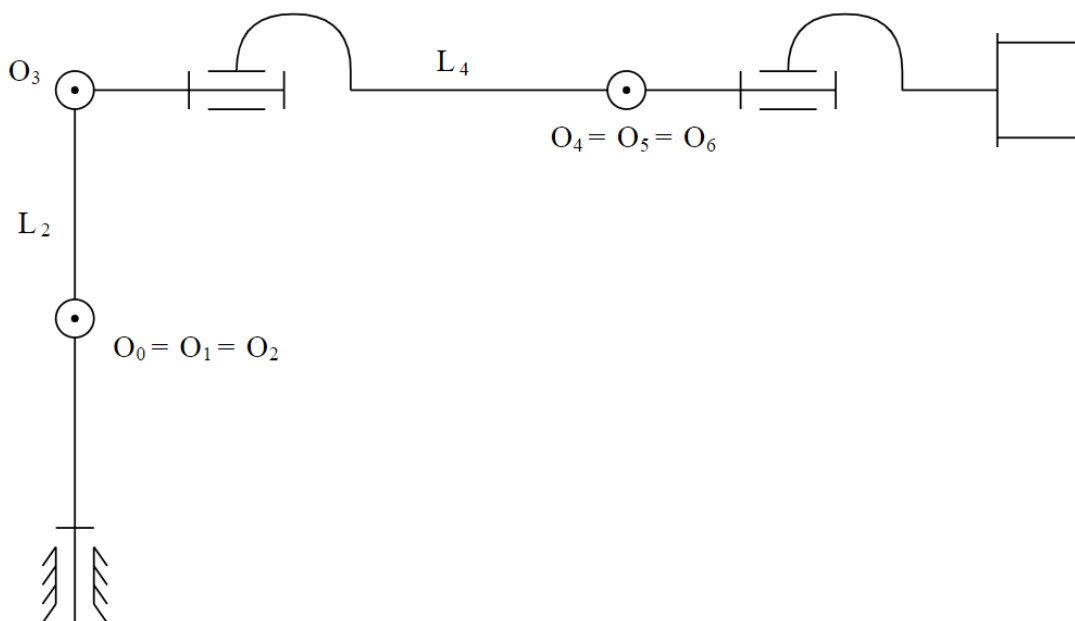


Рис. 2. КС простых ангулярных МР
Fig. 2. KD of simple angular MR

В текущей версии ПС «СисТелРТК» и ее предка «СисТелМР» тела моделируются Графическими Объектами (ГО) бокс (прямоугольный параллелепипед), цилиндр, конус и шар, а также их всевозможными деформациями. Это обеспечивает близкие к реалистичным изображения тел типовых МР и тел других механических подсистем РТК. Для целей построения программных движений тел МР с заданной точностью и их анимации существующих возможностей текущей версии ПС твердотельного 3D-моделирования достаточно. Следует заметить, что более реалистичные изображения тел МР замедляют процесс их рендеринга, не влияя на точность построения программных движений тел. Для максимально реалистичных видов МР в статике, которые используются, как правило, в презентационных и рекламных целях, рекомендуется использовать возможности Inline-подключения фотографических изображений тел, которые натянуты на их формы (узлы <Shape>).

3. Моделирование структуры и геометрии МР

В листинге 1 представлена Х3D-разметка структуры простого ангулярного МР, КС которого изображена на рис. 2. Здесь ОКП размечены в полях translation узлов <Transform> и используются Inline-подключения моделей тел, которые хранятся в файлах "тело_i.x3d", где i – порядковый номер тела. Процесс формирования содержимого этих файлов рассматривается в следующих разделах.

Если модель тела представляется одним боксом, то, открыв Х3D-плеером файл "простойМРсПростейшимиМТ.js", увидим на экране монитора Х3D-модель, представленную на рис. 3.

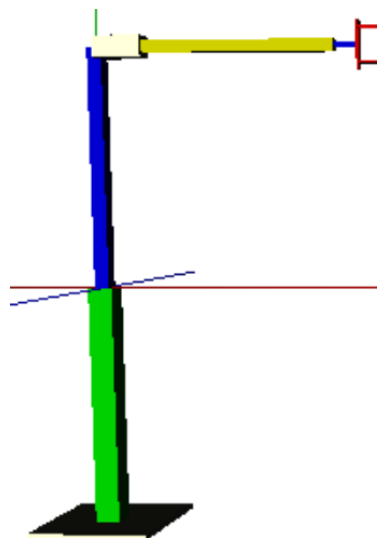


Рис. 3. Х3D-модель простого МР с простейшими МТ

Fig. 3. X3D model of a simple MR with simple body models (BM)

Листинг 1. Х3D-разметка простого ангулярного МР (хранится в файле "простойМРсПростейшимиМТ.js").

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- простойМРсПростейшимиМТ.x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="0 0 5" />

<Transform translation = "-2, 0, 0" showProxyGeometry = "true"> <Inline url = "тело_0.x3d"/>
  <Transform> <Inline url = "тело_1.x3d"/>
    <Transform> <Inline url = "тело_2.x3d"/>
      <Transform translation = "0, 1, 0"> <Inline url = "тело_3.x3d"/>
        <Transform translation = "1, 0, 0"> <Inline url = "тело_4.x3d"/>
          <Transform> <Inline url = "тело_5.x3d"/>
            <Transform> <Inline url = "тело_6.x3d"/>
              <Transform translation = "0.1, 0.07, 0"> <Inline url = "тело_7.x3d"/> </Transform>
              <Transform translation = "0.1, -0.07, 0"> <Inline url = "тело_7.x3d"/> </Transform>
            </Transform>
          </Transform>
        </Transform>
      </Transform>
    </Transform>
  </Transform>
</Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform>

</Scene></X3D>
```

В этом и следующем примерах показано, как структура МР размечается Узлами <Transform> (УТ), и ОКП описываются в полях translation, т. е. в Полях Перемещения (ПП).

Из Х3D-кода в листинге 1 видно, что структура вложенности УТ друг в друга соответствует структуре МР – это система тел с одной открытой ветвью [1]. Исключение составляет схват, в котором базой пальцев является "тело_6". Поэтому два последних УТ вложены в УТ шестого тела. Видно, что текущее расстояние между пальцами равно $2 \cdot 0.07 = 0.14$ м, так как в ПП пальцев указаны ОКП, в которых модули ординат равны 0.07 м. Координаты полюсов пальцев на оси абсцисс СКТ(6) совпадают и равны длине кисти. Координату на оси O_6Y_6 верхнего пальца ("тело_7") обозначим через q_7 . Видно, что $q_7 = 0.07$. Координату на оси O_6Y_6 нижнего пальца обозначим через q_8 . Здесь считается, что $q_8 = -q_7$, т. е. при анимации движений подвижных тел МР пальцы

будут синхронно сходиться (сжиматься) для захвата и удержания груза и расходиться (разжиматься) для его освобождения. Разметка каждого пальца одинакова. Поэтому вместо файла "тело_8.x3d" используется файл "тело_7.x3d".

Из X3D-кода в листинге 1 видно, что "тело_0" сдвинуто на два метра влево от центра экрана монитора и показана СКТ. Если showProxyGeometry = "false", то оси X, Y, Z в виде тонких красной, зеленой и синей линий изображаться не будут.

В ПП фактически описывается геометрия МР, т. е. расстояния между полюсами тел и их длины. Из этих параметров следует вылет руки МР, т. е. расстояние от полюса первого тела до центра схвата. Из X3D-кода в листинге 1 видно, что длины плеча, предплечья и кисти равны соответственно 1, 1 и 0.1 м, т. е. вылет руки – 2.1 м.

В процессе прототипирования МР ПП переносятся в интерфейсную часть прототипа.

В качестве второго примера в листинге 2 представлена X3D-разметка структуры и геометрии типового ангулярного МР, КС которого изображена на рис. 1.

Листинг 2. X3D-разметка типового ангулярного МР
(хранится в файле "типовойМРсПростымиМТ. x3d").

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- типовойМРсПростымиМТ. x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="0 0 3" />

<Transform translation="-2, 0, 0" showProxyGeometry="true"> <Inline url="тело_0.x3d"/>
<Transform> <Inline url="тело_1.x3d"/>
  <Transform translation="0.155, 0, 0"> <Inline url="тело_2.x3d"/>
    <Transform translation="0, 0.614, 0"> <Inline url="тело_3.x3d"/>
      <Transform translation="0.64, 0.2, 0"> <Inline url="тело_4.x3d"/>
        <Transform> <Inline url="тело_5.x3d"/>
          <Transform> <Inline url="тело_6.x3d"/>
            <Transform translation="0.1, 0.07, 0"> <Inline url="тело_7.x3d"/> </Transform>
            <Transform translation="0.1, -0.07, 0"> <Inline url="тело_7.x3d"/> </Transform>
          </Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform> </Transform>
        </Transform>
      </Transform>
    </Transform>
  </Transform>
</Transform>

</Scene></X3D>
```

Здесь в отличие от листинга 1 точка наблюдения за сценой находится на расстоянии 3 м от ее центра. Структура МР осталась прежней. Геометрия изменилась. ОКП(2) в СКТ(1) имеют значение $(L_1, 0, 0)$, где горизонтальный сдвиг (вылет) оси качания плеча (тело_2) относительно оси вращения поворотной платформы (тело_1) $L_1 = 0.155$ м. ОКП(3) в СКТ(2) имеют значение $(0, L_2, 0)$, где длина плеча $L_2 = 0.614$ м. ОКП(4) в СКТ(3) имеют значение $(L_4, L_3, 0)$, где $L_3 = 0.2$ м, $L_4 = 0.64$ м. ОКП(7) в СКТ(6) имеют значение $(L_5, 0.07, 0)$, где $L_5 = 0.1$ м. Приведенные расстояния соответствуют МР Motoman MA1440.

Следует отметить, что разметка структуры всех универсальных МР (с шестью степенями свободы) одинакова. Поэтому в процессе прототипирования универсальных МР в интерфейсную часть относят только ПП.

Перед представлением внешнего вида X3D-модели типового ангулярного МР с разметкой в листинге 2 рассмотрим способы моделирования тел.

4. Простейшие модели тел

Опыт моделирования типовых МР показывает, что для эффективного (простого, быстрого и достаточно точного) моделирования тел МР достаточно использовать боксы и цилиндры. Здесь предлагается обобщенный способ моделирования тел, основанный на внешнем X3D-прототипировании, в котором в качестве интерфейса выступает список вещественных чисел, кодирующих геометрические свойства тел (внешний вид, размеры, положение и ориентацию, цвет). В частности, подробно описываются три возможных способа (простейшего, простого и типового) цифрового кодирования входной информации для построения X3D-моделей тел. Любой пользо-

ватель, владеющий основами Х3D и JS-программирования, сможет разработать и программно реализовать свой (собственный, уникальный, корпоративный) способ моделирования тел.

Простейшая Модель Тела (МТ) состоит из одного бокса. Его размеры и положение в СКТ описываются (кодируются) шестью числами. Первые три положительных числа являются размерами (в метрах) бокса вдоль осей (X, Y, Z) СКТ. Три следующих числа являются декартовыми координатами геометрического центра бокса в СКТ. Последние три числа описывают цвет бокса в RGB-коде.

Для записи разметки экземпляра бокса введем следующие обозначения перечисленных девяти параметров. p_0, p_1, p_2 – размеры бокса. p_3, p_4, p_5 – координаты бокса в СКТ. p_6, p_7, p_8 – код цвета бокса. Тогда для разметки экземпляра бокса с заданным положением в СКТ необходимо форму (узел <Shape>) бокса (узел <Box>) поместить в УТ, т. е. разметка экземпляра бокса может иметь вид:

```
<Transform scale = ' p0/2, p1/2, p2/2 ' translation = ' p3, p4, p5 ' >
  <Shape> <Box/>
  <Appearance> <Material diffuseColor = ' p6, p7, p8 ' /> </Appearance>
</Shape>
</Transform>
```

где вместо обозначений p_i должны стоять конкретные числа. Согласно Х3D-спецификации в классической разметке бокса поле scale не используется и вместо записи <Box/> с размерами бокса по умолчанию (с длинами сторон по два метра) используется запись <Box size = ' p₀, p₁, p₂ ' />. Здесь используется поле scale по двум причинам. Во-первых, это поле имеет произвольный тип доступа, что позволит в следующих версиях ПС учитывать деформации тел. Во-вторых, уже в текущей версии ПС при использовании в МТ цилиндров, конусов и шаров поле scale позволяет расширить виды ГО до произвольных эллипсоидов, а также цилиндрических и конических поверхностей с эллиптическим основанием.

В листинге 3 приведен JS-код функции initialize(), генерирующей приведенную разметку бокса, если этой функции доступен список параметров конкретного бокса.

Листинг 3. JS-код функции, генерирующей Х3D-разметку простейших МТ (хранится в файле "генераторПростейшейМТ.js").

```
function initialize() { if ( параметры[0] > 0 ) { var ГО, сцена = Browser.currentScene;
  СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Box");
  СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[0]/2, параметры[1]/2, параметры[2]/2);
  СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[3], параметры[4], параметры[5]);
  if ( параметры.length > 6 ) { var форма = сцена.createNode("Shape"),
    вид = сцена.createNode("Appearance"), материал = сцена.createNode("Material");
    материал.diffuseColor = new SFCOLOR(параметры[6], параметры[7], параметры[8]);
    вид.addChild(материал); форма.addChild(ГО, вид); СКТ.addChild(форма);
    сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ); }
  else { СКТ.addChild(ГО); сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ); }; }
}
```

Из этого JS-кода видно, что если единственное число в списке параметров МТ равно нулю, то рассматриваемое тело не имеет изображения. Такая ситуация характерна для простейших моделей 4-го и 5-го тел МР, т. е. двух первых тел кисти. Если параметры p_6, p_7, p_8 в описании МТ отсутствуют, то используется цвет бокса по умолчанию, т. е. серый цвет.

В генераторах МТ используются следующие функции (методы объектов), реализованные в Х3D3.0:

createNode(String nodetype) – создает и возвращает новый узел данного типа узла. Тип возвращаемого значения SFNode;

getNamedNode(String nodeName) – возвращает именованный узел, идентифицированный заданным именем. Тип возвращаемого значения SFNode;

addChild(SFNode node) – добавляет указанный узел или узлы (SFNode или MFNode) к вызывающему узлу.

Теперь достаточно сконструировать разметку протодекларации прототипа тела, в которой в качестве интерфейса выступает список параметров МТ. Такая разметка представлена в листинге 4.

Листинг 4. Разметка внешней протодекларации прототипа произвольной МТ, параметры которой передаются через список вещественных чисел. Разметка хранится в файле "прототипТела.x3d".

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- прототипТела.x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene>
  <ProtoDeclare name="прототипТела">
    <ProtoInterface>
      <field name="код" type="MFFloat" accessType="initializeOnly"
        appinfo="Параметрами Модели Тела (МТ) является список вещественных чисел,
        интерпретация которых зависит от выбранного способа кодирования МТ и определяет
        JS-код генератора МТ. Подробности изложены в файле 'способыКодированияМТ.txt'"/>
    </ProtoInterface>
    <ProtoBody>
      <Transform DEF="тело" showProxyGeometry="true"/>
      <Script url="генераторПростейшихМТ.js">
        <field name='параметры' type='MFFloat' accessType='initializeOnly'/>
        <IS> <connect nodeField="параметры" protoField="код"/> </IS>
      </Script>
    </ProtoBody>
  </ProtoDeclare> </Scene> </X3D>
```

Важно отметить, что эта протодекларация позволяет использовать любой способ кодирования МТ в форме списка вещественных чисел. Для каждого способа необходимо разработать свой JS-генератор экземпляров МТ. JS-генератор для простейшей МТ представлен в листинге 3. В следующем листинге представлена разметка экземпляра простейшей МТ, которая хранится в файле "тело_1.x3d", т. е. это модель первого по порядку тела МР.

Листинг 5. Экземпляр простейшей МТ (хранится в файле "тело_1.x3d").

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- тело_1.x3d -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="0 0 5" />
<ExternProtoDeclare name="прототипТела" url="прототипТела.x3d"/>
<ProtoInstance name="прототипТела"> <fieldValue name="код" value="
  0.1, 1, 0.1, 0, -0.5, 0, 0, 1, 0

"/> </ProtoInstance> </Scene> </X3D>
```

Этот X3D-код специально оформлен (отформатирован) так, чтобы выделить отдельной строкой его уникальную часть, т. е. Цифровой Код (ЦК), на основе которого генерируется простейшая МТ. Для этого использованы пробельные символы (один или несколько пробелов, один или несколько символов табуляции, один или несколько символов возврата каретки и т. д.). Если открыть файл "тело_1.x3d", например, плеером InstantReality Player, то в центре экрана монитора ПЭВМ появится СКТ в виде трех тонких взаимно перпендикулярных линий, под которыми расположен (вертикально вниз) бокс зеленого цвета высотой 1 м с квадратным поперечным сечением (0.1×0.1 м).

С целью сокращения записей условимся типовые строки в X3D-разметке экземпляра МТ не приводить в текстах листингов, т. е. вместо полных текстов листингов для экземпляров МТ ограничимся только их ЦК, которые будем построчно записывать после обобщенных имен тел (тело_0, тело_1, тело_2, ...) и двоеточия. Например, в следующих строках представлены имена тел и следующие за ними (после двоеточия) ЦК простейших МТ простого МР, КС которого изображена на рис. 2, а X3D-модель представлена на рис. 3:

тело_0:	0.5,	0.02,	0.5,	0,	-1,	0			
тело_1:	0.1,	1,	0.1,	0,	-0.5,	0	0,	1,	0
тело_2:	0.06,	1,	0.06,	0,	0.5,	0	0,	0,	1
тело_3:	0.2,	0.09,	0.09,	0.1,	0,	0			
тело_4:	0.8,	0.5,	0.5,	-0.4,	0,	0	1,	1,	0
тело_5:	0.1,	0.02,	0.02,	0.05,	0,	0	0,	0,	1
тело_6:	0.01,	0.2,	0.04,	0.1,	0,	0	1,	0,	0
тело_7:	0.1,	0.01,	0.04,	0.05,	0,	0	1,	0,	0

Из этих строк ЦК видно, что неподвижное тело и третье тело имеют цвет по умолчанию и боксы имеют квадратные сечения, кроме двух последних.

5. Простые модели тел

В МТ типовых ангулярных МР достаточно использовать один цилиндр (для моделирования ВКП) и боксы. Будем считать, что цвет всех ГО в разметке одного тела одинаков. Тогда эффективным (коротким и простым в интерпретации) будет следующий способ цифрового кодирования МТ, который назовем простым. Если ЦК начинается с числа ноль, то цилиндр в модели МР не используется и следующие за нулем три числа кодируют цвет боксов, параметры которых следуют за кодом их цвета. Если первое число в ЦК не нулевое, то оно равно радиусу цилиндра, за которым записывается его высота и код оси цилиндра, т. е. 1 – для оси X, 2 – для оси Y, 3 – для оси Z. Следующие шесть чисел описывают положение цилиндра в СКТ и цвет всех ГО в МТ. Таким образом, если первое число в ЦК не нулевое, то первые девять чисел описывают размеры, ориентацию и положение геометрического центра цилиндра в СКТ, а также цвет всех ГО. Остальные числа (по шесть чисел на бокс) описывают размеры и положения боксов в СКТ. Если такие числа отсутствуют, то в МТ используется только цилиндр.

На рис. 4 приведен пример простой Х3D-модели типового ангулярного МР, КС которого приведена на рис. 1. Согласно принятому соглашению уникальные части в разметках экземпляров МТ МР на рис. 4 имеют следующие ЦК:

тело_0:	0	1	0	0,	0.5,	0.02,	0.5,	0,	-0.45,	0											
тело_1:	0.1,	0.2,	2,	0,	-0.35,	0,	1,	0,	0,	0.02,	0.3,	0.02,	0,	-0.15,	0,	0.155,	0.02,	0.02,	0.077,	0,	0
тело_2:	0.05,	0.1,	3,	0,	0,	0,	0,	1,	0,	0.02,	0.614,	0.02,	0,	0.307,	0						
тело_3:	0.05,	0.1,	3,	0,	0,	0,	0,	0,	1,	0.02,	0.2,	0.02,	0,	0.1,	0						
тело_4:	0.05,	0.1,	1,	-0.64,	0,	0,	1,	1,	0,	0.64,	0.02,	0.02,	-0.32,	0,	0						
тело_5:	0.05,	0.1,	3,	0,	0,	0,	1,	0,	1												
тело_6:	0.05,	0.1,	1,	0.05,	0,	0,	0,	1,	1,	0.004,	0.2,	0.04,	0.1,	0,	0						
тело_7:	0	1,	0,	0	0.1,	0.01,	0.04,	0.05,	0,	0											

Из этих ЦК видно, что в моделях основания и пальцев схвата цилиндры не используются. Цилиндр в модели первого тела имеет радиус 0.1 м, высоту 0.2 м и его ось вертикальна. Цилиндры в моделях остальных тел одинаковы ($r = 0.05$ м, $h = 0.1$ м) и их оси ориентированы горизонтально. Оси тел с номерами 2, 3, 5 параллельны оси OZ. Оси тел с номерами 4, 6 – параллельны оси OX. Боксы в моделях всех тел кроме пальцев схвата имеют квадратные сечения.

JS-код генератора экземпляров простых МТ представлен в листинге 6.

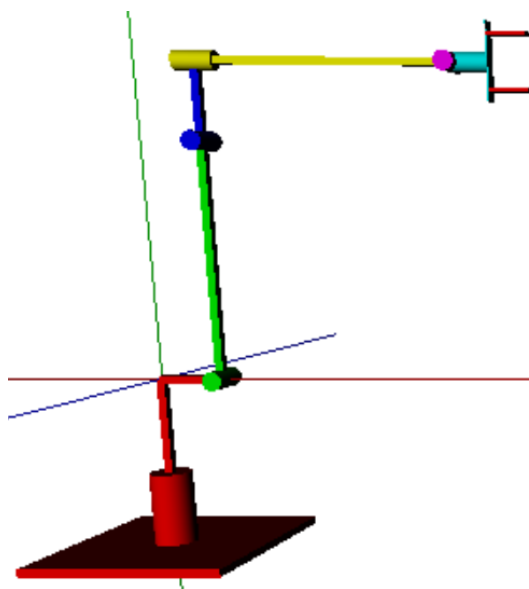


Рис.4. Х3D-модель типового МР
с простыми МТ
Fig. 4. X3D model of a typical MR
with simple BM

Листинг 6. JS-код функции, генерирующей X3D-разметку простой МТ (хранится в файле "генераторПростойМТ.js").

```
function initialize() { var ГО, СКТ, сцена = Browser.currentScene, N=параметры.length; //
if ( параметры[0] > 0 ) { i=6;
    СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Cylinder");
    СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[0]/2, параметры[1]/2, параметры[0]/2);
    if (параметры[2]==1) СКТ.rotation = new SFRotation(0, 0, 1, Math.PI/2);
    if (параметры[2]==3) СКТ.rotation = new SFRotation(1, 0, 0, Math.PI/2);
    СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[3], параметры[4], параметры[5]); }
else { i=1; СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Box");
    СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[i+3]/2, параметры[i+4]/2, параметры[i+5]/2);
    СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[i+6], параметры[i+7], параметры[i+8]); };
var форма = сцена.createNode("Shape"),
вид = сцена.createNode("Appearance"), материал = сцена.createNode("Material");
материал.diffuseColor = new SFColor(параметры[i], параметры[i+1], параметры[i+2]);
вид.addChild(материал); форма.addChild(ГО, вид); СКТ.addChild(форма);
сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ);

if ( N > 10 ) { j = 8; for ( var i=0; i<N; i++) {
    СКТ = сцена.createNode("Transform"); ГО = сцена.createNode("Box");
    СКТ.scale = new SFVec3f(параметры[j+1]/2, параметры[j+2]/2, параметры[j+3]/2);
    СКТ.translation = new SFVec3f(параметры[j+4], параметры[j+5], параметры[j+6]);
    var форма = сцена.createNode("Shape"),
        вид = сцена.createNode("Appearance"), материал = сцена.createNode("Material");
    материал.diffuseColor = new SFColor(параметры[6], параметры[7], параметры[8]);
    вид.addChild(материал); форма.addChild(ГО, вид); СКТ.addChild(форма);
    сцена.getNamedNode("тело").addChild(СКТ); j+=6; } }
```

6. Типовые модели тел и их цифровое кодирование в одном x3d-файле

Рассмотрим еще один способ кодирования входной информации для МТ, который назовем типовым. В нем для моделирования тела используются боксы, цилиндры, конусы, шары, а также их всевозможные деформации. В ЦК типовой МТ перечисленные ГО могут следовать в любом порядке. Для кодирования каждого из перечисленных ГО используются следующие 14 чисел:

кодГО, x , y , z , X , Y , Z , c_x , c_y , c_z , q , R , G , B ,

где кодГО – число от 0 до 3 (0 – бокс, 1 – цилиндр, 2 – конус, 3 – шар); x , y , z – деформируемые размеры ГО по осям СКТ; X , Y , Z – декартовы координаты геометрического центра ГО в СКТ; c_x , c_y , c_z , q – параметры Эйлера поворота ГО (c_x , c_y , c_z – направляющие косинусы оси поворота в СКТ, q – угол поворота); R , G , B – код цвета ГО. Если в ЦК 11 чисел, то используется цвет тел по умолчанию.

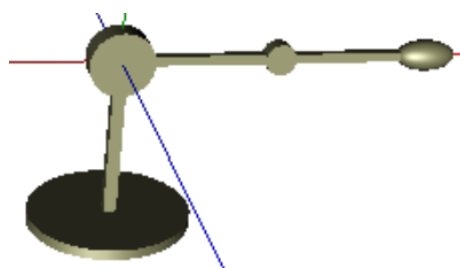


Рис. 5. X3D-модель трехзвенного МР с типовыми МТ

Fig. 5. X3D model of a three-link MR with typical BM

До сих пор ЦК каждой МТ хранился в отдельном x3d-файле. Недостаток такого подхода начинает проявляться, когда необходимо разработать несколько десятков МТ, например, в процессе X3D-моделирования РТК. Для таких случаев рекомендуется использовать второй способ X3D-моделирования структуры и геометрии МР, который представлен в листинге 7, на примере модели трехзвенного МР, в котором используются типовые МТ и схват с грузом моделируется эллипсоидом. Единственный x3d-файл, содержащий ЦК типовых МТ, представлен в листинге 8 и в листинге 9 представлен JS-код генератора X3D-разметки типовых МТ. Пользователю рассматриваемого подхода в моделировании МР достаточно менять только ЦК МТ и ПП в УТ структурной разметки. Внешний вид рассматриваемой модели МР изображен на рис. 5. Важно отметить, что в X3D-коде внешнего

моделирования МР достаточно менять только ЦК МТ и ПП в УТ структурной разметки. Внешний вид рассматриваемой модели МР изображен на рис. 5. Важно отметить, что в X3D-коде внешнего

прототипирования МТ (см. листинг 10) по сравнению с листингом 3 изменен только тип доступа к ЦК МТ. В дальнейшем это позволит динамически (на лету) менять геометрию МТ.

Листинг 7. Х3D-код структуры и геометрии трехзвенного МР, для которого ЦК МТ хранится в файле "данные. js".

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- храниться в файле "MP111.x3d" -->
<X3D version="3.2"> <Scene> <Background skyColor="1 1 1"/> <Viewpoint position="1 1 6" />
<ExternProtoDeclare name="прототипТела" url="прототипТела.x3d"/>

<Transform showProxyGeometry = "true">
  <ProtoInstance DEF="тело_0" name="прототипТела">
    <fieldValue name="код"/>
  </ProtoInstance>
  <Transform>
    <ProtoInstance DEF="тело_1" name="прототипТела">
      <fieldValue name="код"/>
    </ProtoInstance>
  </Transform>
  <Transform>
    <ProtoInstance DEF="тело_2" name="прототипТела">
      <fieldValue name="код"/>
    </ProtoInstance>
  </Transform>
  <Transform translation="1, 0, 0">
    <ProtoInstance DEF="тело_3" name="прототипТела">
      <fieldValue name="код"/>
    </ProtoInstance>
  </Transform> </Transform> </Transform> </Transform>

  <Script url="данные.js"/>
</Scene> </X3D>
```

Листинг 8. JS-код, в котором ЦК типовых МТ хранятся в одном файле "данные.js"

```
function initialize() { сцена = Browser.currentScene;
  сцена.getNamedNode('тело_0').код = new MFFloat(0, 0.04, 0.5, 0.04, 0, -0.5, 0, 0, 0, 1, 0,
    1, 0.5, 0.03, 0.5, 0, -1, 0, 0, 0, 1, 0);

  сцена.getNamedNode('тело_1').код = new MFFloat(1, 0.2, 0.08, 0.2, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1.57);

  сцена.getNamedNode('тело_2').код = new MFFloat(0, 0.5, 0.03, 0.03, 0.5, 0, 0, 0, 0, 1, 0);

  сцена.getNamedNode('тело_3').код = new MFFloat(1, 0.1, 0.05, 0.1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1.57,
    0, 0.5, 0.03, 0.03, 0.5, 0, 0, 0, 1, 0, 3, 0.2, 0.1, 0.1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
}
```

Листинг 9. JS-код генератора типовых МТ (хранится в файле "генераторТиповойМТ.js")

```
var N, j = 0, ГО, видыФорм=[], поляФорм=[], translation=[], rotation=[],
  сцена = Browser.currentScene;
function Параметры(параметры) { N = параметры.length/11;
  for(var i=0; i<N; i++) { видыФорм[i] = параметры[j];
    поляФорм[i] = new SFVec3f(параметры[j+1],параметры[j+2],параметры[j+3]);
    translation[j] = new SFVec3f(параметры[j+4], параметры[j+5], параметры[j+6]);
    rotation[i]=new SFRotation(параметры[j+7],параметры[j+8],параметры[j+9],параметры[j+10]);
    j+=11;
  };
  for (var i=0; i<N; i++) { var трасформатор = сцена.createNode("Transform");
    трасформатор.translation = translation[i]; трасформатор.rotation = rotation[i];
    трасформатор.scale= new SFVec3f(поляФорм[i][0], поляФорм[i][1], поляФорм[i][2]);
```

```
var форма = сцена.createNode("Shape");  
switch(видыФорм[i]) {  
    case 0: ГО=сцена.createNode("Box"); break; case 1: ГО=сцена.createNode("Cylinder"); break;  
    case 2: ГО=сцена.createNode("Cone"); break; case 3: ГО=сцена.createNode("Sphere"); break;  
};  
трасформатор.addChild(ГО); сцена.getNamedNode("тело").addChild(трасформатор); } }
```

Листинг 10. X3D-код внешнего прототипирования МТ.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?> <!-- прототипТела.x3d -->  
<X3D version="3.2"> <Scene>  
<ProtoDeclare name="прототипТела">  
  <ProtoInterface>  
    <field name="код" type="MFFloat" accessType="inputOutput"/>  
  </ProtoInterface>  
  <ProtoBody>  
    <Transform DEF="тело" showProxyGeometry = "false"/>  
    <Script url="генераторТиповойМТ.js">  
      <field name='Параметры' type='MFFloat' accessType='inputOutput'/>  
      <IS> <connect nodeField="Параметры" protoField="код"/> </IS>  
    </Script>  
  </ProtoBody>  
</ProtoDeclare> </Scene> </X3D>
```

Заключение

Методика раздельного моделирования структуры МР и внешнего вида X3D-моделей тел с использованием подключения МТ в файл структуры обеспечивает следующие преимущества. Во-первых, внешний вид МР можно последовательно (итерационно) доводить до совершенства независимо от решения других задач моделирования МР. Во-вторых, разные версии внешнего вида МР эффективно использовать в различных задачах X3D-моделирования МР и РТК. Например, для обеспечения максимально быстрой анимации МР в составе функционирующей РТК рекомендуется использовать простейшие МТ. Для анализа возможных столкновений тел МР с телами внешней среды желательно моделировать тела МР боксами, которые охватывают все выступающие части реальных конструкций тел МР. Для целей подробного изображения геометрии тел, шарниров, орт осей вращения тел рекомендуется использовать типовые МТ, где конусы указывают положительные направления осей вращения управляемых тел и т. д.

Кроме предложенных трех способов моделирования тел МР, для использования которых не обязательно знать язык разметки трехмерных миров, остается возможность создавать файлы "тело_i.x3d" путем X3D-программирования.

Список литературы

1. Телегин А.И. Основы теоретической механики систем тел. С приложениями в робототехнике: учеб. пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023. 252 с. ISBN 978-5-507-45089-3.
2. ГОСТ Р 60.0.7.3–2020. Роботы и робототехнические устройства. Метод математического моделирования показателей надёжности и виртуализации испытаний на надёжность базовых элементов робототехнических комплексов при проектировании. М.: Стандартинформ, 2021.
3. ГОСТ Р 60.0.7.2–2020. Роботы и робототехнические устройства. Технология математического моделирования и виртуализации испытаний базовых элементов робототехнических комплексов на внешние воздействующие факторы на всех этапах жизненного цикла. М.: Стандартинформ, 2021.
4. Мелентьев Ю.И., Телегин А.И. Динамика манипуляционных систем роботов. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1984. 360 с.
5. Бутырин С.А. Разработка алгоритмов управления манипулятором с компенсацией взаимовлияния движений и программного обеспечения численных экспериментов с моделями роботов на ЭВМ: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1982. 144 с.

6. Войнов И.В. Транспортные и манипуляционные системы мобильных робототехнических комплексов для экстремальных условий: дис. ... д-ра. техн. наук. Челябинск, 1998. 301 с.
7. Войнов И.В. Синтез алгоритма быстрой адаптации ПИД-регулятора программного движения четырехзвенного манипулятора // Информационные технологии искусственного интеллекта: сб. М.: ИФТП РАН, 1994. С. 93–100.
8. Телегин А.И. Уравнения математических моделей механических систем. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. 182 с.
9. Телегин А.И., Тимофеев Д.Н., Читалов Д.И. Х3D-моделирование механических систем: опыт использования Х3D в моделировании механических систем. Южно-Уральский государственный университет, 2014. 66 с. URL: <http://elibraru.ru/item.asp?id=22585700>.
10. Пудовкина С.Г., Тимофеев Д.Н., Читалов Д.И. Моделирование и анимация роботизированных технологических комплексов // Наука ЮУрГУ: материалы 70-й научной конференции. Секции технических наук. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2018. С. 776–784.
11. Web Application for Х3D-Model Creation of the Robotic Technological Complex / I.V. Voynov, S.G. Pudovkina, A.I. Telegin, D.N. Timofeev // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 2. С. 5–18. DOI: 10.14529/ctcr180201
12. Роботизация торговли / А.И. Телегин, Д.Н. Тимофеев, С.Г. Пудовкина, В.А. Телегин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. Т. 19, № 4. С. 84–98. DOI: 10.14529/ctcr190408
13. Feature and Performance Comparison of the V-REP, Gazebo and ARG0s Robot Simulators / L. Pitonakova, M. Giuliani, A. Pipe, A. Winfield // Proceedings of the 19th Towards Autonomous Robotic Systems Conference (TAROS 2018). 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-967228-8_30
14. Development of a Khepera IV Library for the V-REP Simulator / E. Peralta, E. Fabregas, G. Farias et al. // IFAC-PapersOnLine – 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education. 2016. P. 81–86. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.157
15. On 3D simulators for multi-robot systems in ROS: MORSE or Gazebo? / F.M. Noori, D. Portugal, R. Rocha, M. Couceiro // 2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR). 2017. P. 19–24. DOI: 10.1109/SSRR.2017.8088134

References

1. Telegin A.I. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki sistem tel. S prilozheniyami v robototekhnike: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Fundamentals of theoretical mechanics of body systems. With applications in robotics: textbook for universities]. St. Petersburg: Lan; 2023. 252 p. (In Russ.) ISBN 978-5-507-45089-3.
2. *GOST R 60.0.7.3–2020*. [Robots and robotic devices. Method of mathematical modeling of reliability indices and virtualization of reliability tests of basic elements of robotic complexes during design]. Moscow: Standartinform; 2021. (In Russ.)
3. *GOST R 60.0.7.2.2–2020*. [Robots and robotechnical devices. The technology of mathematical modeling and virtualization of tests of basic elements of robotic complexes on external influencing factors at all stages of the life cycle]. Moscow: Standartinform; 2021. (In Russ.)
4. Melent'ev Yu.I., Telegin A.I. *Dinamika manipulyatsionnykh sistem robotov* [Dynamics of manipulation systems of robots]. Irkutsk: Irkutsk University Publ.; 1984. 360 p. (In Russ.)
5. Butyrin S.A. [Development of the manipulator control algorithms with the motion mutual influence compensation and the software for the numerical experiments with the robot models on the computer. Cand. sci. diss.]. Tomsk; 1982. 144 p. (In Russ.)
6. Voynov I.V. [Transport and manipulation systems of the mobile robotic complexes for the extreme conditions. Doct. sci. diss.]. Chelyabinsk; 1998. 301 p. (In Russ.)
7. Voynov I.V. [Synthesis of the algorithm for the fast adaptation of the PID-regulator of the program motion of the four-link manipulator]. In: *Information Technologies of Artificial Intelligence: Collection*. Moscow: Institute of Physical and Technical Problems RAS; 1994. P. 93–100. (In Russ.)
8. Telegin A.I. *Uravneniya matematicheskikh modeley mekhanicheskikh sistem* [Equations of mathematical models of mechanical systems]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 1999. 182 p. (In Russ.)
9. Telegin A.I., Timofeev D.N., Chitalov D.I. *Х3D-modeling of mechanical systems: experience in using Х3D modeling of mechanical systems*. South Ural State University; 2014. 66 p. (In Russ.) Available at: <http://elibraru.ru/item.asp?id=22585700>.

10. Pudovkina C.G., Timofeev D.N., Chitalov D.I. [Modeling and animation of robotic technological complexes]. In: *Science of SUSU: proceedings of the 70th scientific conference. Sections of technical sciences*. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2018. P. 776–784. (In Russ.)
11. Voynov I.V., Pudovkina S.G., Telegin A.I., Timofeev D.N. Web Application for X3D-Model Creation of the Robotic Technological Complex. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2018;18(2):5–18. DOI: 10.14529/ctcr180201
12. Telegin A.I., Timofeev D.N., Pudovkina S.G., Telegin V.A. The Trade Robotization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2019;19(4):84–98. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190408
13. Pitonakova L., Giuliani M., Pipe A., Winfield A. Feature and Performance Comparison of the V-REP, Gazebo and ARG0s Robot Simulators. In: *Proceedings of the 19th Towards Autonomous Robotic Systems Conference (TAROS 2018)*. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-967228-8_30
14. Peralta E., Fabregas E., Farias G. et al. Development of a Khepera IV Library for the V-REP Simulator. In: *IFAC-PapersOnLine – 11th IFAC Symposium on Advances in Control Education*. 2016. P. 81–86. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.157
15. Noori F.M., Portugal D., Rocha R., Couceiro M. On 3D simulators for multi-robot systems in ROS: MORSE or Gazebo? In: *2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*. 2017. P. 19–24. DOI: 10.1109/SSRR.2017.8088134

Информация об авторах

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

Гусев Евгений Васильевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gusevev@susu.ru.

Кодкин Владимир Львович, д-р техн. наук, проф. кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kodkinvl@susu.ru.

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

Information about the authors

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

Evgeny V. Gusev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gusevev@susu.ru.

Vladimir L. Kodkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kodkinvl@susu.ru.

Vladimir I. Shiryaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatic Control Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shiriaevvi@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 27.05.2024

The article was submitted 27.05.2024

ЗАДАЧА ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА – ПРИМЕНЕНИЯ, МЕТОДЫ, ПРОБЛЕМЫ

О.Л. Ибряева, ibriaevaol@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0125-1069>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В настоящей статье обзорного характера представлена задача экспоненциального анализа, ее применения, ограничения и проблемы, актуальные, несмотря на более чем двухсотлетнюю историю. За это время разработано множество методов решения задачи, но наибольшую популярность и эффективность демонстрируют Прони-подобные методы: метод Паде – Лапласа, Прони и метод матричных пучков, которые и являются предметом исследования в данной работе. **Цель исследования:** представить современное состояние задачи экспоненциального анализа, ее основные проблемы и методы их решения. Основными проблемами указанных методов являются вопрос определения числа экспонент, выбор оптимальной частоты дискретизации сигнала и уменьшение вычислительных затрат. В статье представлены решения этих проблем. **Материалы и методы.** Для решения проблем проведен анализ научной литературы и использованы методы линейной алгебры. **Результаты.** Описаны модификации методов с целью решения их проблем. Алгоритм вычисления аппроксимации Паде со знаменателем минимальной степени решает проблему дуплетов Фруассара в методе Паде – Лапласа. Для повышения точности вычислений коэффициентов Тейлора в этом же методе используются сплайны. Для выбора оптимальной частоты дискретизации сигнала служит оценка числа обусловленности матрицы в методе Прони. Для метода матричных пучков решена проблема вычислительных затрат за счет его рекуррентной и многоканальной версий. **Заключение.** Представлены различные постановки данной задачи, находящие свои многочисленные приложения. Описаны ограничения, проблемы задачи экспоненциального анализа и их решения. Рассмотрены три параметрических метода: Прони, Паде – Лапласа и метод матричных пучков.

Ключевые слова: экспоненциальный анализ, метод Паде – Лапласа, аппроксимации Паде, дуплеты Фруассара, метод Прони, оптимальная частота дискретизации, метод матричных пучков

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание на выполнение фундаментальных научных исследований № FENU-2023-0010 (2023010ГЗ)).

Для цитирования: Ибряева О.Л. Задача экспоненциального анализа – применения, методы, проблемы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 31–42. DOI: 10.14529/ctcr240403

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240403

EXPONENTIAL ANALYSIS TASK – APPLICATIONS, METHODS, PROBLEMS

O.L. Ibryaeva, ibriaevaol@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0125-1069>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This review article presents the problem of exponential analysis, its applications, limitations and problems that are relevant despite its more than two hundred years of history. During this time, many methods for solving the problem have been developed, but the greatest popularity and efficiency are demonstrated by Prony-like methods: the Padé–Laplace method, Prony method and the matrix pencil method, which are the subject of research in this work. **The purpose of the study:** to present the current state of the problem of exponential analysis, its main problems and methods for solving them. The main problems of these methods are: the issue of determining the number of exponents, choosing the optimal signal sampling

frequency and reducing computational costs. The article presents solutions to these problems. **Materials and methods.** To solve problems, an analysis of scientific literature was carried out and linear algebra methods were used. **Results.** Modifications of the methods to solve their problems are described. The algorithm for calculating the Padé approximation with a minimum degree denominator solves the problem of Froissart doublets in the Padé–Laplace method. To increase the accuracy of calculations of Taylor coefficients, splines are used in the same method. To select the optimal signal sampling frequency, use the estimation of the matrix condition number in the Prony method. For the matrix pencil method, the problem of computational costs is solved due to its recurrent and multichannel versions. **Conclusion.** Various formulations of this problem are presented, which find their numerous applications. The limitations, problems of the exponential analysis problem, and their solutions are described. Three parametric methods are considered: Prony, Padé–Laplace and the matrix pencil method.

Keywords: exponential analysis, Padé–Laplace method, Padé approximations, Froissart doublets, Prony method, optimal sampling frequency, matrix pencil method

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment for the implementation of fundamental scientific research No. FENU-2023-0010 (2023010GZ)).

For citation: Ibryaeva O.L. Exponential analysis task – applications, methods, problems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2024;24(4):31–42. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240403

Введение

Экспоненциальный анализ или аппроксимация суммой экспонент является темой активных исследований уже более 200 лет. Традиционно зарождение этой задачи связывают с бароном Гаспаром Рише де Прони, который в 1795 году пришел к выводу, что законы, определяющие расширение различных газов, могут быть представлены с помощью сумм затухающих экспонент [1].

Предложенный им метод подгонки экспоненциальной модели к измеренным эквидистантным значениям был позднее обобщен и на модели, состоящие из суммы синусоид [2, 3].

Задача экспоненциального анализа заключается в нахождении числа экспонент N и комплексных параметров A_j, λ_j модели

$$f(t) = \sum_{j=1}^N A_j e^{\lambda_j t} \quad (1)$$

по ее заданным дискретным отсчетам $f_k = f(t_k)$, $k = 1, \dots, M$. Для подгонки экспоненциальной модели (1) с $2N$ параметрами A_j, λ_j используется $M \geq 2N$ значений f_k .

Модель (1) описывает сумму как действительных экспонент, так и затухающих синусоид:

$$f(t) = \sum_{k=1}^l a_k e^{-\sigma_k t} \sin(2\pi f_k t + \varphi_k), \quad (2)$$

поскольку одна синусоида соответствует двум комплексно-сопряженным экспонентам.

Сумма вида (2) используется, например, в [4] для моделирования аудиосигналов, в [5] – для моделирования отфильтрованного сигнала тока с двигателя. Сумма двух незатухающих синусоид в [6] моделирует сигналы напряжения с катушек кориолисового расходомера. Сумма действительных экспонент в работе [7] описывает процесс выделения газа из нелегированного аланата натрия при его деформации. Широкий класс функций, описываемых моделью (2), обуславливает ее многочисленные приложения в биомедицине [8, 9], инженерии [10], пищевой науке [11], нефтехимической промышленности [12] и во многих других областях [13, 14].

Естественным обобщением (2) для предельного случая бесконечного числа экспонент является модель

$$f(t) = \int_0^\infty A(\lambda) e^{\lambda t} d\lambda, \quad (3)$$

где $A(\lambda)$ – непрерывная функция (спектр), которую нужно найти по известным значениям f_k .

Модель (3) используется в спектроскопии [14, 15] и часто оказывается предпочтительнее модели (1). Например, в задаче моделирования кинетики затухания собственной флуоресценции сывороточного альбумина [16] модель (3) в отличие от (1) позволила проанализировать процессы изменения структуры и динамики макромолекулы при денатурации или нагревании.

При $\lambda = i\omega$ модель бесконечного числа экспонент имеет вид обратного преобразования Фурье:

$$f(t) = \int_0^\infty A(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (4)$$

Формула (4) фактически описывает физический смысл преобразования Фурье – правая часть есть бесконечная сумма гармонических колебаний $e^{i\omega t}$ с частотами ω , амплитудами $|A(\omega)|$ и фазовыми сдвигами $\arg A(\omega)$. Как и в случае модели (3), требуется найти спектральную плотность $A(\omega)$ по известным отсчетам сигнала f_k .

Функция спектральной плотности наряду с плотностью вероятности, корреляционными функциями, математическим ожиданием и дисперсией относится к характеристикам, с помощью которых анализируются основные свойства стационарных случайных процессов. Она применяется для фильтрации, определения свойств систем по входным и выходным процессам, идентификации источников энергии и шума, оценки соотношения между периодическими и шумовыми составляющими случайного процесса и т. д.

Известно, что появление неисправности в двигателях, подшипниках и других вращающихся механизмах изменяет спектральную плотность снимаемых с них сигналов. На этом основано множество методов диагностики состояния промышленного оборудования. Так, например, в работах [17–19] предложены методы диагностики состояния подшипников качения на основе признаков выделенных из спектральной плотности сигналов вибрации. В работе [5] предложен метод диагностики асинхронного двигателя на основе рекуррентного метода матричных пучков, который отслеживает амплитуду дефектной гармоники в спектре сигнала тока.

Дополнительной трудностью в [5] является близость дефектной гармоники к основной частоте питания в спектре сигнала тока. Аналогично, близкие значения экспоненциальных постоянных λ_j в модели (1) являются серьезной проблемой для их различения, и уже сам Прони отметил это как одно из фундаментальных ограничений задачи экспоненциального анализа. Как было показано позднее [14], существует предел максимальной разрешающей способности в задаче экспоненциального анализа. Это ограничение заложено в самой проблеме и усугубляется шумом.

1. Методы решения и проблема вычислительных затрат

Существует множество методов решения задачи экспоненциального анализа [14]. Некоторые из них уже устарели, так как появились еще во времена, когда не было компьютеров, и сильно уступают современным методам. Это, например, метод графического анализа [20], со временем эволюционировавший в метод наименьших квадратов, который используется до сих пор.

Фактически при решении задачи (1) требуется минимизировать функцию

$$\sum_{k=1}^M (f(t_k) - \sum_{j=1}^N A_j e^{\lambda_j t_k})^2 \rightarrow \min_{A_j, \lambda_j} \quad (5)$$

от $2N$ переменных $A_j, \lambda_j, j = 1, \dots, N$. Это можно сделать методом градиентного спуска. Основными недостатками такого метода являются высокие вычислительные затраты, проблема выбора начального приближения и застревание в локальном минимуме. К тому же разрешающая способность такого метода различить экспоненты с близкими постоянными времени невелика [14].

Более устойчивыми методами с высокой разрешающей способностью являются так называемые Прони-подобные (Prony-like) параметрические методы: Паде – Лапласа, Прони, матричных пучков и др. [14]. Здесь речь идет не о первоначальных вариантах методов, они не столь сильны, а об их усовершенствованных модификациях.

В отчете рабочей группы IEEE [21] о выявлении электромеханических режимов в энергосистемах методы Прони и матричных пучков отнесены в число основных методов в решении данной задачи. Методы используют построение ганкелевой матрицы из отсчетов сигнала. В методе Прони формируется одна матрица Ганкеля и далее находятся ее собственные значения. В методе матричных пучков формируются две «сдвинутые» матрицы Ганкеля и решается проблема обобщенных собственных значений пучка этих матриц. В конечном счете оба метода используют процедуру сингулярного разложения матрицы, дорогую с вычислительной точки зрения.

Проблема высоких вычислительных затрат приводит к невозможности оценки параметров сигнала в режиме реального времени, необходимой во многих приложениях. Для решения этой проблемы исследователями предлагаются различные варианты методов, например, рекуррентный метод Прони [22].

Нами был разработан ряд модификаций метода матричных пучков. Рекуррентный метод матричных пучков [23] позволяет отслеживать параметры сигнала в режиме скользящего окна. Когда новый отсчет данных попадает в окно наблюдения, матрица данных изменяется незначительно, и для нахождения сингулярного разложения новой матрицы применяется эффективная процедура [24], требующая нахождения SVD матрицы более низкого ранга. Таким образом, в рекуррентном методе матричных пучков сингулярное разложение новой матрицы данных реализуется на каждом шаге не напрямую, а на основе сингулярного разложения старой матрицы. Данная модификация позволяет значительно сократить время вычислений.

В статье [25] нами предложен векторный метод матричных пучков, способный оценивать параметры сразу нескольких входных сигналов с одинаковыми полюсами. Метод уменьшает время вычислений и дисперсию оценок параметров по сравнению с классическим методом матричных пучков. Рекуррентный векторный метод матричных пучков [26] является комбинацией двух вышеупомянутых модификаций и позволяет эффективно отслеживать параметры нескольких сигналов с одинаковыми полюсами в режиме скользящего окна.

При большом или бесконечном числе экспонент для моделей (3), (4) нахождение параметров A_j , λ_j требует еще больше вычислительных ресурсов и становится затруднительным в режиме реального времени. На помощь приходят методы машинного обучения, которые требуют один раз провести процедуру обучения модели на размеченных данных, после чего ее можно легко использовать в реальном времени для обработки новых данных.

Например, в работе [17] анализируются сигналы вибрации с подшипников качения с целью диагностики их состояния. Такие сигналы имеют богатый спектр, искать параметры всех гармонических составляющих и отслеживать их изменения в реальном времени невозможно. По этой причине в работе предложен простой и эффективный подход к выделению информативных признаков из спектров сигналов для дальнейшего обучения простой нейронной сети. Метод дал 100%-ную точность в задаче определения состояния подшипника на наборе данных IMS [27]. В нашей работе [19] предложена гибридная нейросетевая модель диагностики неисправностей подшипников, обрабатывающая одновременно входные данные разного типа – изображения спектров Гильберта сигналов вибрации и числовые векторы признаков. За счет такого учета разнородных данных получена эффективная модель, способная работать в нестационарных условиях.

2. Некорректность задачи и проблема определения числа экспонент

Уравнение (3) для нахождения функции $A(\lambda)$ относится к интегральным уравнениям Фредгольма первого рода, решение которых представляет собой некорректно поставленную задачу [28]. Таким образом, решение задачи экспоненциального анализа может не существовать, быть не единственным и неустойчивым.

Ланцош в своем знаменитом примере [29] приблизил сумму трех экспонент

$$y(t) = 0,0951e^{-t} + 0,8607e^{-3t} + 1,5576e^{-5t}$$

по ее 24 равноотстоящим отсчетам суммой двух экспонент

$$f(t) = 2,202e^{-4,45t} + 0,305e^{-1,58t}.$$

На рис. 1 построены графики $y(t)$, $f(t)$ на промежутке от 0 до 1,5 часа. Отличие между значениями $y(t)$, $f(t)$ начинается в третьем знаке после запятой и вполне «укладывается» в шум эксперимента. Однако число экспонент и их параметры у данных функций сильно отличаются.

Сразу отметим, что проблема Ланцоша с «неразличимыми» функциями решается увеличением интервала наблюдения (рис. 2). По этой причине при анализе суммы затухающих экспонент рекомендуется брать интервал до полного затухания функции.

Во многих случаях решить проблему плохой обусловленности задачи экспоненциального анализа и найти нужное решение из нескольких возможных удастся за счет дополнительной информации о сигнале, например, числе экспонент. Часто удается оценить это число, используя различные приемы (построение последовательности аппроксимаций Паде в методе Паде – Лапласа [30, 31], сингулярное разложение в методе Прони [32, 33], методе матричных пучков [34, 35]), которые могут рассматриваться как регуляризация этой плохо обусловленной задачи.

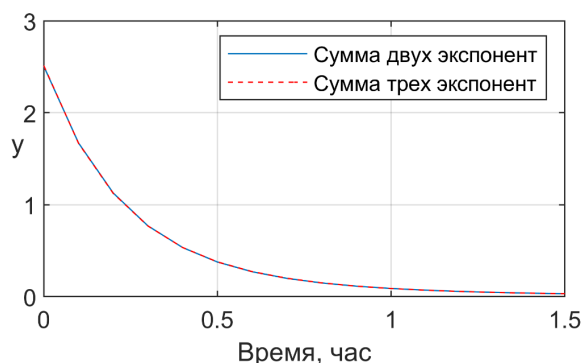


Рис. 1. Графики «неразличимых» функций Ланцоша на промежутке от 0 до 1,5 часа
Fig. 1. Graphs of “indistinguishable” Lanczos functions on the interval from 0 to 1.5 hours

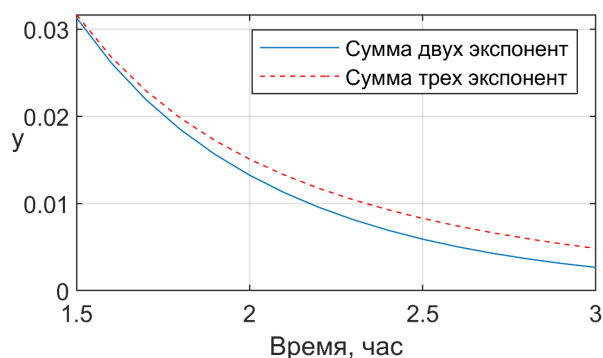


Рис. 2. Графики «неразличимых» функций Ланцоша при дальнейшем наблюдении на промежутке от 1,5 до 3 часов
Fig. 2. Graphs of “indistinguishable” Lanczos functions with further observation on the interval from 1.5 to 3 hours

При определении числа экспонент в методе Паде – Лапласа возникает проблема появления так называемых дуплетов Фруассара. Из-за вычислительных погрешностей и неединственности знаменателя аппроксимации Паде лишние нули и полюсы аппроксимаций не совпадают и не сокращаются. Это приводит к появлению ложных полюсов сигнала, которые нужно каким-то образом выявлять.

В нашей работе [36] предложен алгоритм нахождения аппроксимаций Паде со знаменателем минимальной степени, тем самым устранена причина появления дуплетов, связанная с неединственностью знаменателя аппроксимации Паде. Экспериментально показано, что предложенный алгоритм дает меньшую дисперсию ошибки в определении истинных полюсов сигнала, чем классический метод Паде – Лапласа. Также модифицированный метод Паде – Лапласа применен к отслеживанию частоты синусоидального сигнала с измерительной катушки кориолисова расходомера [37]. При этом для увеличения точности оценки частоты используется завышенный порядок аппроксимации Паде и предложенный метод сам определяет число экспонент и их параметры.

3. Проблема оптимальной дискретизации сигнала

Как мы видели, при увеличении интервала наблюдения в задаче экспоненциального анализа достигается улучшение разрешающей способности. В примере Ланцоша с «неразличимыми» функциями стоит продолжить наблюдение на большем промежутке времени, когда они полностью затухнут, и разница между ними становится очевидна.

Отметим, что важно не только количество точек (отсчетов сигнала), по которым будут восстанавливаться параметры, но и то, как они расположены. Например, в статье [38] показано, что выбор эквидистантных отсчетов затухающей экспоненты по логарифмическому масштабу более целесообразен, чем по линейному.

В случае хорошо обусловленных задач, чем больше точек данных берется на кривой, тем точнее ее можно «подогнать». При экспоненциальном анализе это не всегда так. Процедура дискретизации представляет собой своего рода фильтр нижних частот. В соответствии с теоремой Котельникова будут оцифрованы только гармоники с частотой ниже половины частоты дискретизации. При увеличении частоты дискретизации мы увеличиваем содержание связанных с шумом высокочастотных компонентов в спектре, тем самым делая проблему еще более некорректной. В конечном итоге увеличение количества точек данных приводит к увеличению времени вычислений и, возможно, даже к ухудшению разрешения.

В связи с этим особую важность имеет выбор частоты дискретизации сигнала при его экспоненциальном анализе. В работе [39], где предложен комплекс программ G-Maple, реализующий метод Паде – Лапласа, автор говорит о встроенной возможности в его программе и необходимости попробовать несколько разных значений частоты дискретизации, поскольку ее значение влияет на точность вычисления коэффициентов ряда Тейлора в методе Паде – Лапласа.

Возможность передискретизации сигнала в [39] появляется за счет использования сплайнов, интерполирующих исходные отсчеты сигнала. Имея непрерывную функцию – сплайн, можно выбрать ее отсчеты с любой другой частотой дискретизации. В работе [40] мы получили явную формулу для коэффициентов Тейлора через коэффициенты кубического сплайна. Это позволило уменьшить погрешность определения коэффициентов ряда Тейлора в методе Паде – Лапласа примерно в 4 раза.

В работе [41] нами было показано, что значение частоты дискретизации сигнала влияет на число обусловленности матрицы в методе Прони, использующейся для нахождения параметров сигналов, и, как следствие, на точность определения этих параметров. В статье [42] мы предложили алгоритм нахождения оптимальной частоты дискретизации в методе Прони, дающий минимальное значение числа обусловленности этой матрицы и уже успешно примененный другими исследователями в ряде работ [43–46]. В частности, для случая одной частоты и, соответственно, двух полюсов оптимальная частота дискретизации будет в 4 раза больше этой частоты.

Заключение

Статья посвящена классической задаче аппроксимации функции суммой экспонент. Представлены различные постановки данной задачи, находящие свои многочисленные приложения. Описаны ограничения, проблемы задачи экспоненциального анализа и их решения.

Для решения проблемы определения числа экспонент в методе Прони и методе матричных пучков используется сингулярное разложение матриц. В случае незначительного шума сингулярные числа, отвечающие полезному сигналу, значительно больше чисел, соответствующих шумовым компонентам, что и дает возможность определить число экспонент. В методе Паде – Лапласа для этой же цели используется прием построения последовательности аппроксимаций Паде. При достаточно большом порядке они будут иметь стабильные полюсы, соответствующие полюсам сигнала, и ложные нестабильные полюсы с соответствующими близкими им нулями числителя (дуплеты Фруассара). Можно выделить две причины появления дуплетов: погрешности вычислений и неединственность знаменателя аппроксимации Паде. И если с первой причиной трудно что-то сделать, то для устранения второй служит алгоритм нахождения знаменателя аппроксимации Паде минимальной степени [36].

Проблема выбора оптимальной частоты дискретизации актуальна для всех рассматриваемых методов, поскольку все они направлены на решение некорректной задачи экспоненциального анализа. Как уже сказано ранее, при увеличении частоты дискретизации мы увеличиваем содержание связанных с шумом высокочастотных компонентов в спектре, тем самым делая задачу еще более некорректной. Достаточно рассмотреть вопрос определения оптимальной частоты дискретизации на примере одного из методов, поскольку она зависит не от метода, а от самой задачи и автоматически будет являться оптимальной для всех рассматриваемых методов. Для этой цели больше всего подходит метод Прони. Для нахождения полюсов сигнала в методе Прони требуется решить систему линейных уравнений, матрица которой составлена из отсчетов сигнала и определяет точность нахождения его полюсов. В методе матричных пучков следовало бы рассматривать пучок из двух матриц, составленных из отсчетов сигнала. Метод Паде – Лапласа тоже не очень подходит для этой цели, так как матрица, используемая в нем для нахождения полюсов сигнала, составлена не из его отсчетов, а из приближенно найденных коэффициентов Тейлора преобразования Лапласа интересующего нас сигнала. Для решения вопроса выбора оптимальной частоты дискретизации на основе метода Прони необходимо оценить число обусловленности матрицы, определяющей точность нахождения полюсов сигнала в методе Прони и найти оптимальную частоту дискретизации, дающую минимальное значение этой оценки числа обусловленности. Это сделано в работах [41, 42].

Проблема уменьшения вычислительных затрат наиболее актуальна для методов матричных пучков и Прони, использующих дорогую с вычислительной точки зрения процедуру сингулярного разложения матриц. Эти матрицы составлены из отсчетов сигнала и при отслеживании его параметров в режиме скользящего окна меняются незначительно. Возникает разумная необходимость не вычислять заново сингулярное разложение соответствующих матриц, а воспользоваться уже найденным разложением очень похожей матрицы на предыдущем шаге. В статье [22] разработан рекуррентный метод Прони, позволяющий отслеживать параметры сигнала в режиме

скользящего окна, не находя заново сингулярное разложение для каждого окна. Также для метода Прони еще в 1999 году была предложена так называемая многоканальная модификация [47] на случай набора сигналов с одинаковыми полюсами, которая уменьшает время вычислений и дисперсию оценки параметров по сравнению с одноканальным методом Прони, примененным для каждого сигнала отдельно. Таким образом, для метода Прони существуют модификации, отчасти решающие проблему высоких вычислительных затрат. Аналогичные модификации для метода матричных пучков созданы автором данной работы. В работе [23] разработан рекуррентный метод матричных пучков для оценки параметров сигнала в режиме скользящего окна. Векторный (или многоканальный) метод матричных пучков для оценки параметров сразу нескольких сигналов с одинаковыми полюсами предложен в [25]. Наконец, на случай отслеживания параметров такого набора сигналов в режиме скользящего окна разработан рекуррентный векторный метод матричных пучков [26], являющийся синтезом двух предыдущих модификаций.

Список литературы

1. Prony G.R. Essai experimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité des fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alcool, à différentes températures // Journal Polytechnique ou Bulletin du Travail fait à l'Ecole Centrale des Travaux Publics. 1795. Vol. 1, cahier 22. P. 24–76.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1977.
3. Marple L. Spectral line analysis by Pisarenko and Prony methods // ICASSP '79. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1979. P. 159–161. DOI: 10.1109/ICASSP.1979.1170707
4. Hermus K. Perceptual audio modeling with exponentially damped sinusoids // Signal Process. 2005. Vol. 85, no. 1. P. 163–176. DOI: 10.1016/j.sigpro.2004.09.010
5. The Detection of Rotor Bar Faults in Induction Motors Using the Recursive Matrix Pencil Method / V. Sinitsin, A. Shestakov, O. Ibryaeva, V. Eremeeva // Proceedings of the 19th IMEKO TC10 International Conference on Measurement for Diagnostics, Optimization and Control on Measurement in Testing, Inspection and Certification. 2023. DOI: 10.21014/tc10-2023.015
6. Ibryaeva O., Semenov A., Henry M. Measurement validation for ICPS: Matrix pencil method for coriolis metering with liquid/gas flow // 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). IEEE, 2018. P. 15–18. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8390745
7. Tribochemically driven dehydrogenation of undoped sodium alanate under room temperature / E. Muñoz-Cortés, O. Ibryaeva, M. Manso-Silván et al. // Physical Chemistry Chemical Physics. 2022. Vol. 25, no. 1. P. 494–508. DOI: 10.1039/D2CP04681D
8. Multicomponent T2 relaxation analysis in cartilage / D.A. Reiter, P. Lin, K. Fishbein, R. Spencer // Magn. Reson. Med. 2009. Vol. 61, no. 4. P. 803–809. DOI: 10.1002/mrm.21926
9. In vivo measurement of T2 distributions and water contents in normal human brain / K.P. Whittall, A.L. MacKay, D.A. Graeb et al. // Magn. Reson. Med. 1997. Vol. 37, no. 1. P. 34–43. DOI: 10.1002/mrm.1910370107
10. Monitoring of Hydration of White Cement Paste with Proton NMR Spin–Spin Relaxation / J. Greener, H. Peemoeller, R. Holly et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2000. Vol. 83, no. 3. P. 623–627. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01242.x
11. Kirtil E., Oztop M. ¹H Nuclear Magnetic Resonance Relaxometry and Magnetic Resonance Imaging and Applications in Food Science and Processing // Food Eng. Rev. 2015. Vol. 8, no. 1. DOI: 10.1007/s12393-015-9118-y
12. T1–T2 Correlation Spectra Obtained Using a Fast Two-Dimensional Laplace Inversion / Y.-Q. Song, L. Venkataramanan, M.D. Hürlimann et al. // J. Magn. Reson. 2002. Vol. 154, no. 2. P. 261–268. DOI: 10.1006/jmre.2001.2474
13. Pereyra V., Scherer G. Exponential Data Fitting and its Applications. Bentham Science Publishers, 2010. DOI: 10.2174/978160805048211001010001
14. Istratov A.A., Vyvenko O.F. Exponential analysis in physical phenomena // Rev. Sci. Instrum. 1999. Vol. 70, no. 2. P. 1233–1257. DOI: 10.1063/1.1149581

15. Analysis of fluorescence decay kinetics measured in the frequency domain using distributions of decay times / J.R. Lakowicz, H. Cherek, I. Gryczynski et al. // *Biophys. Chem.* 1987. Vol. 28, no. 1. P. 35–50. DOI: 10.1016/0301-4622(87)80073-X
16. Маскевич А. Моделирование кинетики собственной флуоресценции сывороточного альбумина человека // *Вестник Гродненского университета имени Янки Купалы. Серия 2: Математика.* 2022. Т. 12, № 1. С. 57–66.
17. Ибряева О.Л., Мохаммад М.Н. Диагностика неисправностей подшипников качения с использованием пиков спектра и нейронных сетей // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика».* 2022. Т. 11, № 2. С. 59–71. DOI: 10.14529/cmse220205
18. Шестаков А., Ибряева О., Мохаммад М. Нейросетевая модель диагностики неисправностей подшипников качения на основе метода линейного предсказания // *Приборы.* 2022. Т. 6, № 264. Р. 1–7.
19. Intelligent bearing fault diagnosis method combining mixed input and hybrid CNN-MLP model / V. Sinitsin, O. Ibryaeva, V. Sakovskaya, V. Ereemeeva // *Mech. Syst. Sig. Process.* 2022. Vol. 180. P. 109454. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109454
20. Van Liew H.D. Graphic analysis of aggregates of linear and exponential processes // *J. Theor. Biol.* 1967. Vol. 16, no. 1. P. 43–53. DOI: 10.1016/0022-5193(67)90052-5
21. Crow M., Gibbard M., Messina A. Identification of electromechanical modes in power systems // *IEEE Task Force Report, Special Publication TP462.* 2012.
22. Recursive Prony's Method for Improving the Monitoring of Electrical Machines / F.F. Costa, L.A.L. de Almeida, F.A. Wegelin, E.G. da Costa // *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings.* P. 16–19. DOI: 10.1109/IMTC.2005.1604401
23. Ibryaeva O. Recursive matrix pencil method // *2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon).* Chelyabinsk, Russia, 2017. P. 378–383. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120739
24. Brand M. Fast low-rank modifications of the thin singular value decomposition // *Linear Algebra Appl.* 2006. Vol. 415, no. 1. P. 20–30. DOI: /10.1016/j.laa.2005.07.021
25. Метод матричных пучков для оценки параметров векторных процессов / М. Генри, О.Л. Ибряева, Д.Д. Салов, А.С. Семенов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование».* 2017. Т. 10, № 4. С. 92–104. DOI: 10.14529/mmp170409
26. Ибряева О.Л., Шестаков А.Л., Федосов И.И. Рекуррентный векторный метод матричных пучков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование».* 2019. Т. 12, № 2. С. 97–111. DOI: 10.14529/mmp190208
27. Prognostics Center of Excellence Data Set Repository – NASA. 03.2024. URL: <https://www.nasa.gov/intelligent-systems-division/discovery-and-systems-health/pcoe/pcoe-data-set-repository> (дата обращения: 18.03.2024).
28. Калиткин Н., Корякин П. Численные методы: в 2 кн. Кн. 2: Методы математической физики. М.: Академия, 2013. 304 с.
29. Lanczos C. *Applied analysis.* USA: Prentice Hall, 1956. 539 p.
30. Pade-Laplace method for analysis of fluorescence intensity decay / Z. Bajzer, A. Myers, S. Sedarous, F. Prendergast // *Biophys. J.* 1989. Vol. 56, no. 1. P. 79–93. DOI: 10.1016/S0006-3495(89)82653-0
31. Ibryaeva O.L., Adukov V.M. On removal of Froissart doublets in Pade – Laplace method // *2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP).* 2012. DOI: 10.1109/TSP.2012.6256375
32. Марпл С. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.
33. Шестаков А.Л., Семенов А.С., Ибряева О.Л. Оценка несущей частоты случайной последовательности импульсов методом Прони // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование».* 2009. Вып. 4, № 37 (170). С. 106–115.
34. Ибряева О.Л., Салов Д.Д. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика».* 2017. Т. 6, № 1. С. 26–37. DOI: 10.14529/cmse170102
35. Hua Y., Sarkar T.K. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise // *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1990. Vol. 38, no. 5. P. 814–824. DOI: 10.1109/29.56027

36. Ibryaeva O.L., Adukov V.M. An algorithm for computing a Pade approximant with minimal degree denominator // J. Comput. Appl. Math. 2013. Vol. 237, no. 1. P. 529–541. DOI: 10.1016/j.cam.2012.06.022
37. Ибряева О.Л., Тараненко П.А., Телегин Д.В. Модификация метода Паде – Лапласа и его применение к анализу сигналов с кориолисова расходомера // Автоматизация в промышленности. 2023. № 9. С. 34–37. DOI: 10.25728/avtprom.2023.09.06
38. Exponential Sampling Method for Light Scattering Polydispersity Analysis / N. Ostrowsky, D. Sornette, P. Parker, E.R. Pike // Journal of Modern Optics. 1981. Vol. 28, no. 8. P. 1059–1070. DOI: 10.1080/713820704
39. Tannous C. Generalised Modal Analysis with the Pade-Laplace transform. URL: <https://arxiv.org/abs/physics/0304107v1>. DOI: 10.48550/arXiv.physics/0304107
40. Ibryaeva O.L. Evaluation of Taylor coefficients in Pade-Laplace method using cubic splines // 14th IMEKO TC10 Workshop Technical Diagnostics New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for system's reliability, maintainability and safety. Milan, Italy, 2016. P. 145–150.
41. Ибряева О. Оценка числа обусловленности матрицы в методе Прони // Известия Челябинского научного центра. 2010. Т. 2, № 48. С. 1–5.
42. Bushuev O.Y., Ibryaeva O.L. Choosing an optimal sampling rate to improve the performance of signal analysis by Prony's method // 2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. 2012. DOI: 10.1109/TSP.2012.6256374
43. Underwater material recognition based on laser-induced acoustic source / J. Ye, Y. Zhu, W. Lv et al. // OCEANS 2014 – TAIPEI. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964544
44. Alfieri L., Carpinelli G., Bracale A., Caramia P. Advanced methods for the assessment of time varying waveform distortions caused by wind turbine systems. Part II: Numerical applications // 2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). IEEE. P. 1–3. DOI: 10.1109/EEEIC-2.2013.6737899
45. Emam A.S., Azmy A.M., Rashad E.M. Enhanced Model Predictive Control-Based STATCOM Implementation for Mitigation of Unbalance in Line Voltages // IEEE Access. 2020. Vol. 8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3044982
46. Duda K., Zielinski T. The Polyphase Prony Method [Tips & Tricks] // IEEE Signal Processing Magazine. 2022. Vol. 39, no. 3. P. 115–120. DOI: 10.1109/MSP.2022.3148712
47. Trudnowski D., Johnson J., Hauer J. Making Prony Analysis More Accurate using Multiple Signals // IEEE Transactions on Power Systems. 1999. Vol. 14, no. 1. P. 226–231. DOI: 10.1109/59.744537

References

1. Prony G.R. Essai experimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité des fluides élastique et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alcool, à différentes températures. *Journal Polytechnique ou Bulletin du Travail fait à l'Ecole Centrale des Travaux Publics*. 1795;1(22):24–76.
2. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. Dover Publications, 2013.
3. Marple L. Spectral line analysis by Pisarenko and Prony methods. In: *ICASSP '79. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1979. P. 159–161. DOI: 10.1109/ICASSP.1979.1170707
4. Hermus K. Perceptual audio modeling with exponentially damped sinusoids. *Signal Process.* 2005;85(1):163–176. DOI: 10.1016/j.sigpro.2004.09.010
5. Sinitsin V., Shestakov A., Ibryaeva O., Ereemeeva V. The Detection of Rotor Bar Faults in Induction Motors Using the Recursive Matrix Pencil Method. In: *Proceedings of the 19th IMEKO TC10 International Conference on Measurement for Diagnostics, Optimization and Control on Measurement in Testing, Inspection and Certification*. 2023. DOI: 10.21014/tc10-2023.015
6. Ibryaeva O., Semenov A., Henry M. Measurement validation for ICPS: Matrix pencil method for coriolis metering with liquid/gas flow. In: *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. IEEE; 2018. P. 15–18. DOI: 10.1109/ICPHYS.2018.8390745

7. Muñoz-Cortés E., Ibryaeva O., Manso-Silván M., Zabala B., Flores E., Gutierrez A., Ares J., Nevshupa R. Tribochemically driven dehydrogenation of undoped sodium alanate under room temperature. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2022;25(1):494–508. DOI: 10.1039/D2CP04681D
8. Reiter D.A., Lin P., Fishbein K., Spencer R. Multicomponent T2 relaxation analysis in cartilage. *Magn. Reson. Med.* 2009;61(4):803–809. DOI: 10.1002/mrm.21926
9. Whittall K.P., MacKay A.L., Graeb D.A., Nugent R.A., Li D.K., Paty D.W. In vivo measurement of T2 distributions and water contents in normal human brain. *Magn. Reson. Med.* 1997;37(1):34–43. DOI: 10.1002/mrm.1910370107
10. Greener J., Peemoeller H., Holly R., Reardon E., Hansson C., Pintar M. Monitoring of Hydration of White Cement Paste with Proton NMR Spin–Spin Relaxation. *J. Am. Ceram. Soc.* 2000;83(3):623–627. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01242.x
11. Kirtil E., Oztup M. 1H Nuclear Magnetic Resonance Relaxometry and Magnetic Resonance Imaging and Applications in Food Science and Processing. *Food Eng. Rev.* 2015;8(1). DOI: 10.1007/s12393-015-9118-y
12. Song Y.-Q., Venkataramanan L., Hürlimann M.D., Flaum M., Frulla P., Straley C. T1–T2 Correlation Spectra Obtained Using a Fast Two-Dimensional Laplace Inversion. *J. Magn. Reson.* 2002;154(2):261–268. DOI: 10.1006/jmre.2001.2474
13. Pereyra V., Scherer G. *Exponential Data Fitting and its Applications*. Bentham Science Publishers; 2010. DOI: 10.2174/978160805048211001010001
14. Istratov A.A., Vyvenko O.F. Exponential analysis in physical phenomena. *Rev. Sci. Instrum.* 1999;70(2):1233–1257. DOI: 10.1063/1.1149581
15. Lakowicz J.R., Cherek H., Gryczynski I., Joshi N., Johnson M. Analysis of fluorescence decay kinetics measured in the frequency domain using distributions of decay times. *Biophys. Chem.* 1987;28(1):35–50. DOI: 10.1016/0301-4622(87)80073-X
16. Maskevich A.A. [Modeling of the intrinsic fluorescence decay kinetics of the human serum albumin]. *Bulletin of the Yanka Kupala State University of Grodno. Series 2: Mathematics*. 2022;12(1):57–66. (In Russ.)
17. Ibryaeva O.L., Mohammad M.N. Fault Diagnosis of Rolling Bearings Using Spectral Peaks and Neural Networks. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*. 2022;11(2):59–71. (In Russ.) DOI: 10.14529/cmse220205
18. Shestakov A., Ibryaeva O., Mohammad M. [Neural network model for diagnosing faults in rolling bearings based on the linear prediction method]. *Pribory*. 2022;6(264):1–7. (In Russ.)
19. Sinitsin V., Ibryaeva O., Sakovskaya V., Ereemeeva V. Intelligent bearing fault diagnosis method combining mixed input and hybrid CNN-MLP model. *Mech. Syst. Sig. Process.* 2022;180:109454. DOI: 10.1016/j.ymsp.2022.109454
20. Van Liew H.D. Graphic analysis of aggregates of linear and exponential processes. *J. Theor. Biol.* 1967;16(1):43–53. DOI: 10.1016/0022-5193(67)90052-5
21. Crow M., Gibbard M., Messina A. Identification of electromechanical modes in power systems. In: *IEEE Task Force Report, Special Publication TP462*. 2012.
22. Costa F.F., de Almeida L.A.L., Wegelin F.A., da Costa E.G. Recursive Prony’s Method for Improving the Monitoring of Electrical Machines. In: *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. P. 16–19. DOI: 10.1109/IMTC.2005.1604401
23. Ibryaeva O. Recursive matrix pencil method. In: *2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*. Chelyabinsk, Russia, 2017. P. 378–383. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120739
24. Brand M. Fast low-rank modifications of the thin singular value decomposition. *Linear Algebra Appl.* 2006;415(1):20–30. DOI: 10.1016/j.laa.2005.07.021
25. Henry M.P., Ibryaeva O.L., Salov D.D., Semenov A.S. Matrix pencil method for estimation of parameters of vector processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2017;10(4):92–104. (In Russ.) DOI: 10.14529/mmp170409
26. Ibryaeva O.L., Shestakov A.L., Fedosov I.I. Recursive multi-channel matrix pencil method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2019;12(2):97–111. (In Russ.) DOI: 10.14529/mmp190208

27. Prognostics Center of Excellence Data Set Repository – NASA. 03.2024. Available at: <https://www.nasa.gov/intelligent-systems-division/discovery-and-systems-health/pcoe/pcoe-data-set-repository> (accessed 18. Mar. 2024).

28. Kalitkin H., Koryakin P. *Chislennyye metody: v 2 kn. Kn. 2: Metody matematicheskoy fiziki* [Numerical Methods: in 2 books. Book 2: Methods of mathematical physics]. Moscow: Akademiya Publ.; 2013. 304 p. (In Russ.)

29. Lanczos C. *Applied analysis*. USA: Prentice Hall; 1956. 539 p.

30. Bajzer Z., Myers A., Sedarous S., Prendergast F. Pade-Laplace method for analysis of fluorescence intensity decay. *Biophys. J.* 1989;56(1):79–93. DOI: 10.1016/S0006-3495(89)82653-0

31. Ibryaeva O.L., Adukov V.M. On removal of Froissart doublets in Pade – Laplace method. In: *2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2012. DOI: 10.1109/TSP.2012.6256375

32. Marple S. *Digital Spectral Analysis with Applications*. Prentice Hall; 1987. 492 p.

33. Shestakov A.L., Semenov A.S., Ibryaeva O.L. Carrier frequency estimation for random pulse train using Prony's method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2009;4(37(170)):106–115. (In Russ.)

34. Ibryaeva O.L., Salov D.D. Modification of the matrix pencil method using a combined evaluation of signal poles and their inverses. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017;6(1):26–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/cmse170102

35. Hua Y., Sarkar T.K. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1990;38(5):814–824. DOI: 10.1109/29.56027

36. Ibryaeva O.L., Adukov V.M. An algorithm for computing a Pade approximant with minimal degree denominator. *J. Comput. Appl. Math.* 2013;237(1):529–541. DOI: 10.1016/j.cam.2012.06.022

37. Ibryaeva O.L., Taranenko P.A., Teleghin D.V. Modification of Padé-Laplace method and its application in the analysis of Coriolis flowmeter readings. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2023;(9):34–37. (In Russ.) DOI: 10.25728/avtprom.2023.09.06

38. Ostrowsky N., Sornette D., Parker P., Pike E.R. Exponential Sampling Method for Light Scattering Polydispersity Analysis. *Journal of Modern Optics*. 1981;28(8):1059–1070. DOI: 10.1080/713820704

39. Tannous C. Generalised Modal Analysis with the Pade-Laplace transform. Available at: <https://arxiv.org/abs/physics/0304107v1>. DOI: 10.48550/arXiv.physics/0304107

40. Ibryaeva O.L. Evaluation of Taylor coefficients in Pade-Laplace method using cubic splines. In: *14th IMEKO TC10 Workshop Technical Diagnostics New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for system's reliability, maintainability and safety*. Milan, Italy; 2016. P. 145–150.

41. Ibryaeva O. [Estimation of the condition number of a matrix in the Prony method]. *News of the Chelyabinsk Scientific Center*. 2010;2(48):1–5. (In Russ.)

42. Bushuev O.Y., Ibryaeva O.L. Choosing an optimal sampling rate to improve the performance of signal analysis by Prony's method. In: *2012 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. 2012. DOI: 10.1109/TSP.2012.6256374

43. Ye J., Zhu Y., Lv W., Qu K., Jin X., Xu Y., Zhang J., Li S., Chen Y. Underwater material recognition based on laser-induced acoustic source. In: *OCEANS 2014 – TAIPEI*. 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964544

44. Advanced methods for the assessment of time varying waveform distortions caused by wind turbine systems. Part II: Numerical applications / L. Alfieri, G. Carpinelli, A. Bracale, P. Caramia // 2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). IEEE. P. 1–3. DOI: 10.1109/EEEIC-2.2013.6737899

45. Emam A.S., Azmy A.M., Rashad E.M. Enhanced Model Predictive Control-Based STATCOM Implementation for Mitigation of Unbalance in Line Voltages. *IEEE Access*. 2020;8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3044982

46. Duda K., Zielinski T. The Polyphase Prony Method [Tips & Tricks]. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2022;39(3):115–120. DOI: 10.1109/MSP.2022.3148712

47. Trudnowski D., Johnson J., Hauer J. Making Prony Analysis More Accurate using Multiple Signals. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1999;14(1):226–231. DOI: 10.1109/59.744537

Информация об авторе

Ибряева Ольга Леонидовна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории технической самодиагностики и самоконтроля приборов и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ibryevaol@susu.ru.

Information about the author

Olga L. Ibryaeva, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher at the Research Laboratory of Technical Self-Diagnostics and Self-Monitoring of Devices and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ibryevaol@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 30.03.2024

The article was submitted 30.03.2024

БЛОЧНЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА С ЛИНЕЙНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТЬЮ ДЛЯ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ С ТЕХНИЧЕСКИМ ЗРЕНИЕМ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Н.И. Циоплиакис, ntsiopliakis@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0530-0500>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В условиях роста применения технического зрения в навигационных системах подвижных объектов возникает необходимость в исследовании численно-эффективных алгоритмов оптимальной фильтрации, адаптированных для совместной обработки измерений инерциальных датчиков и данных большого числа визуальных источников информации. В статье предложена новая модификация фильтра Калмана (блочный фильтр Калмана), имеющая линейную вычислительную сложность от числа источников измерительной информации; получена численно-устойчивая версия фильтра, использующая LDL-факторизацию матриц ковариаций. **Цель исследования:** получить алгоритм LDL-факторизованного блочного фильтра Калмана, имеющего линейную вычислительную сложность относительно числа входящих в измерительную систему источников информации; показать возможность применения такого алгоритма в комплексированной инерциальной навигационной системе с техническим зрением. **Материалы и методы.** Доказывается алгебраическая эквивалентность блочного фильтра Калмана классическому в специальном случае; предлагается способ приближения оценок блочного фильтра к оценкам классического с требуемой точностью за счет расширения вектора состояния. Вычислительная сложность блочного фильтра Калмана сравнивается с вычислительной сложностью классического фильтра Калмана в рамках численного эксперимента. Проводится численное моделирование работы блочного фильтра в составе навигационной системы для сравнения с классическим фильтром. **Результаты.** Получены уравнения блочного LDL-факторизованного фильтра Калмана; проверена его линейная вычислительная сложность от числа источников информации. Предложен и проверен в рамках моделирования работы навигационной системы способ приближения оценок блочного фильтра Калмана к оценкам классического фильтра за счет расширения вектора состояния. **Заключение.** Основные теоретические свойства блочного фильтра Калмана были подтверждены в рамках численных экспериментов. В ходе дальнейших исследований будут рассмотрены альтернативные способы формирования расширенного вектора состояния фильтра; будет проведено тестирование блочного фильтра Калмана в рамках более сложных сценариев.

Ключевые слова: фильтр Калмана, численная эффективность, техническое зрение, комплексированная навигационная система

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России FENU-2024-0004 от 17.01.2024.

Для цитирования: Циоплиакис Н.И. Блочный фильтр Калмана с линейной вычислительной сложностью для комплексированных с техническим зрением инерциальных навигационных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 43–56. DOI: 10.14529/ctcr240404

BLOCK KALMAN FILTER WITH LINEAR COMPUTATIONAL COMPLEXITY FOR INTEGRATED VISUAL-INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

N.I. Tsiopliakis, ntsiopliakis@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0530-0500>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. As the use of computer vision in vehicle navigation systems increases, there is a growing need for computationally efficient optimal filtering algorithms that can jointly process measurements from inertial sensors and a large number of visual information sources. **Contribution.** This paper proposes a new modification of the Kalman filter (the block Kalman filter) with linear computational complexity in the number of measurement information sources. A numerically stable version of the algorithm is derived using LDL-factorization of covariance matrices. **Purpose of the study.** The aim is to develop an LDL-factorized block Kalman filter algorithm with linear computational complexity with respect to the number of information sources in the measurement system and demonstrate its applicability in an integrated visual-inertial navigation system. **Materials and Methods.** This research demonstrates the algebraic equivalence of the block Kalman filter to the standard one in a specific case. A method is proposed for approximating the estimates of the block filter to those of the standard one with desired accuracy by expanding the state vector. The computational complexity of the block Kalman filter is compared to the computational complexity of standard one within a numerical experiment. Numerical modeling of the block filter operation within a navigation system is conducted for comparison with the standard filter. **Results.** The equations of the block LDL-factorized Kalman filter are obtained. Its linear computational complexity with respect to the number of information sources is verified. A method for approximating the estimates of the block Kalman filter to those of the standard filter by expanding the state vector is proposed and verified within the framework of navigation system simulation. **Conclusion.** The main theoretical properties of the block Kalman filter were confirmed in numerical experiments. Further research will explore alternative methods of forming the extended state vector of the filter; the Kalman block filter will be tested within more complex scenarios.

Keywords: Kalman filter, numerical efficiency, computer vision, integrated navigation system

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FENU-2024-0004 dated 01/17/2024.

For citation: Tsiopliakis N.I. Block Kalman filter with linear computational complexity for integrated visual-inertial navigation systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):43–56. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240404

Введение

Внедрение мобильных роботизированных систем в такие отрасли современной экономики, как транспорт, логистика и диагностика сопровождается повышением требований к надежности их навигационного обеспечения, что обуславливает использование визуальных источников корректирующей информации (техническое зрение) наряду с классическими (приемниками спутниковых сигналов, дальномерами).

Специфика использования технического зрения в навигации заключается в необходимости совместной обработки данных большого и переменного числа отслеживаемых визуальных признаков, которые выступают в качестве источников навигационной информации. В современных комплексированных с техническим зрением инерциальных навигационных системах для получения оптимальных оценок положения и ориентации подвижного объекта применяются рекурсивные фильтры, такие как фильтр Калмана [1–3], фильтр частиц [4, 5] и их модификации, а также методы нелинейной оптимизации (по окну, включающему некоторое число измерений) [6]. При этом, несмотря на развитие альтернативных подходов, калмановская фильтрация продолжает широко использоваться в данной области [7].

Для работы навигационной системы в реальном времени важно обеспечить быстрое функционирование комплексированного фильтра, тогда как для улучшения характеристик точности и

надежности оценок требуется обрабатывать большее число визуальных признаков. Степенная вычислительная сложность от числа источников информации, характерная для многих оптимальных фильтров (в частности, кубическая сложность классического фильтра Калмана [8]), усугубляет противоречие между этими требованиями, заставляя искать субоптимальные алгоритмы фильтрации с меньшими затратами на вычисления.

Для задачи комплексирования инерциальных данных и данных технического зрения известен класс фильтров с линейной вычислительной сложностью, называемых Multi-State Constraint Kalman filters (MSCKF, фильтры Калмана с ограничениями на множественные состояния системы) [9]. В рамках данных фильтров оценки расположения неподвижных визуальных признаков рассчитываются однократно на этапе их инициализации вне фильтра Калмана, векторы ошибок расположения признаков не включаются в вектор состояния фильтра и не оцениваются. Ряд последовательных наблюдений одного и того же визуального признака объединяется в общее уравнение измерений, после чего данное уравнение проецируется на левое нуль-пространство матрицы измерений вектора ошибок расположения визуального признака; таким образом, он исключается из общего уравнения измерения. В результате в уравнение измерений входят лишь векторы ошибок оценок положения и ориентации навигационной системы в последовательные моменты времени [7, 9].

Среди недостатков MSCKF можно назвать то, что векторы состояния визуальных признаков не оцениваются, что не позволяет его применять в системах, где у данных векторов имеется динамика (например, если расположение визуальных признаков задается в подвижной системе координат). Также это вызывает повышенную погрешность от линеаризации, так как матрицы измерений рассчитываются путем линеаризации в точке, соответствующей начальной оценке расположения визуального признака. Кроме того, несмотря на линейную сложность от числа визуальных признаков, объем требуемых вычислений и затрат памяти довольно велик в связи с необходимостью построения общих матриц измерения фильтра, объединяющих уравнения измерения в последовательные моменты времени.

В данной статье предложен фильтр, также обладающий линейной вычислительной сложностью относительно числа источников информации, но позволяющий оценивать полный вектор состояния, включая векторы состояния источников информации. В отличие от MSCKF данный фильтр на каждой своей итерации использует только текущие уравнения измерения (как классический фильтр Калмана), снижение вычислительной сложности достигается за счет упрощения структуры фильтра при принятии некоторых допущений, что созвучно с подходами, применяемыми в распределенных фильтрах Калмана (Distributed Kalman Filters).

Различные алгоритмы распределенных фильтров известны и для фильтра Калмана, и для фильтра частиц [10]. Они рассматривались как способ понижения вычислительной сложности до квадратичной, способ параллелизации вычислений [11], а также как способ организации обработки данных мультисенсорных сетей [12–15]. Данные алгоритмы оперируют отдельными блоками, выделенными из матриц классического фильтра Калмана, позволяя «развязать» уравнения, связанные с каждым из источников информации. Однако распределенные фильтры из работ [12–14] эффективны только в случае, когда измерители не имеют своего вектора состояния (связанного только с данным измерителем); таким образом, они не подходят для использования в комплексированных с техническим зрением инерциальных навигационных системах.

1. Структура уравнений измерения и принятые статистические допущения

В данной статье рассматривается система со следующей структурой уравнения измерений:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{v} - \mathbf{H} \mathbf{X}, \quad \mathbf{v} \sim (0, \mathbf{R}), \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{12} & \mathbf{H}_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \mathbf{H}_{13} & 0 & \mathbf{H}_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{1N} & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{H}_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{R}_N \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{Y}$ – вектор невязки измерений; $\mathbf{X}$ – вектор состояния; $\mathbf{X}_1$ – общий вектор состояния системы; $\mathbf{X}_i$ – вектор состояния i -го измерителя, $i = 2 \dots N$; $\mathbf{H}$ – матрица измерений; $\mathbf{H}_{1i}$ – матрица

измерений общего вектора состояния системы i -м измерителем; $\mathbf{H}_i$ – матрица измерений вектора состояния i -го измерителя; $\mathbf{v}$ – вектор шумов измерений; $\mathbf{v}_i$ – вектор шумов измерений i -го измерителя; $\mathbf{X}_1 \sim (0, \mathbf{P}_{11})$ – общий вектор состояния системы; $\mathbf{X}_i \sim (0, \mathbf{P}_{ii})$ – вектор состояния i -го измерителя.

Уравнения блочного фильтра Калмана получим, приняв в качестве допущения, что векторы состояния измерителей статистически связаны друг с другом лишь посредством общего вектора состояния системы, т. е. выполнены условия (2).

Статистически связанными посредством $\mathbf{X}_1$ будем называть такие векторы $\mathbf{X}_i$, $\mathbf{X}_j$, для которых выполняется:

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_i &= \mathbf{A}_{i1}\mathbf{X}_1 + \boldsymbol{\gamma}_i, \quad i = 2 \dots N, \\ \mathbf{X}_j &= \mathbf{A}_{j1}\mathbf{X}_1 + \boldsymbol{\gamma}_j, \quad j = 2 \dots N, \quad j \neq i, \\ \text{cov}(\boldsymbol{\gamma}_i, \mathbf{X}_1) &= \text{cov}(\boldsymbol{\gamma}_j, \mathbf{X}_1) = \text{cov}(\boldsymbol{\gamma}_i, \boldsymbol{\gamma}_j) = 0.\end{aligned}\quad (2)$$

В специальном случае, когда условия (2) выполнены, блочный фильтр Калмана будет алгебраически эквивалентен классическому. Этот случай интересен тем, что матрицы взаимной корреляции $\mathbf{P}_{ij}$ между векторами состояния любых двух различных измерителей $\mathbf{X}_i$, $\mathbf{X}_j$ выражаются через матрицы $\mathbf{P}_{i1}$, $\mathbf{P}_{1j}$ их взаимной корреляции с $\mathbf{X}_1$ и его ковариационную матрицу $\mathbf{P}_{11}$:

$$\mathbf{P}_{ij} = \text{cov}(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) = \mathbf{P}_{i1}\mathbf{P}_{11}^{-1}\mathbf{P}_{1j},$$

где $\mathbf{P}_{i1} = \text{cov}(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_1)$, $\mathbf{P}_{11} = \text{cov}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_1)$, $\mathbf{P}_{1j} = \text{cov}(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_j)$.

Следовательно, в описываемом случае матрицы взаимной корреляции между векторами состояния измерителей $\mathbf{P}_{ij}$ не несут дополнительной информации, что указывает на возможность их исключения из алгоритма фильтра Калмана, существенно упростив его структуру.

2. Редукция порядка фильтра Калмана, получение блочных уравнений этапа коррекции

Запишем уравнение невязки измерений i -го измерителя:

$$\begin{aligned}\mathbf{Y}_i &= \mathbf{v}_i - \mathbf{H}_{i1}\mathbf{X}_1 - \mathbf{H}_i\mathbf{X}_i, \\ \mathbf{v}_i &\sim (0, \mathbf{R}_i), \quad \text{cov}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j) = 0, \quad i = 2 \dots N, \quad j = 2 \dots N, \quad j \neq i.\end{aligned}\quad (3)$$

В силу условий (2) вектор состояния i -го измерителя $\mathbf{X}_i$ можно разложить на составляющую, пропорциональную вектору состояния $\mathbf{X}_1$, и остаток $\boldsymbol{\gamma}_i$, некоррелированный с векторами состояния остальных измерителей:

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{P}_{i1}\mathbf{P}_{11}^{-1}\mathbf{X}_1 + \boldsymbol{\gamma}_i, \quad \mathbf{X}_i \sim (0, \mathbf{P}_{ii}^\gamma), \quad \boldsymbol{\gamma}_i \sim (0, \mathbf{P}_{ii}^\gamma), \quad i = 2 \dots N, \quad (4)$$

где $\mathbf{P}_{ii}^\gamma = \mathbf{P}_{ii} - \mathbf{P}_{i1}\mathbf{P}_{11}^{-1}\mathbf{P}_{1i}$.

В (3) выделим из $\mathbf{X}_i$ коррелированную с $\mathbf{X}_1$ составляющую, сгруппируем остаток $\boldsymbol{\gamma}_i$ с $\mathbf{v}_i$:

$$\mathbf{Y}_i = (\mathbf{v}_i - \mathbf{H}_i\boldsymbol{\gamma}_i) - (\mathbf{H}_{i1} + \mathbf{H}_i\mathbf{P}_{i1}\mathbf{P}_{11}^{-1})\mathbf{X}_1, \quad i = 2 \dots N. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\hat{\mathbf{v}}_i = (\mathbf{v}_i - \mathbf{H}_i\boldsymbol{\gamma}_i), \quad \hat{\mathbf{v}}_i \sim (0, \hat{\mathbf{R}}_i), \quad i = 2 \dots N, \quad (6)$$

где $\hat{\mathbf{R}}_i = \mathbf{R}_i + \mathbf{H}_i\mathbf{P}_{ii}^\gamma\mathbf{H}_i^T$.

По построению $\hat{\mathbf{v}}_i$ не коррелирован с $\hat{\mathbf{v}}_j$ при $i \neq j$ и может рассматриваться как приведенный шум измерений i -го измерителя, тогда $\hat{\mathbf{R}}_i$ – матрица ковариаций приведенного шума i -го измерителя.

Тогда невязку измерений i -го измерителя можно переписать в виде

$$\mathbf{Y}_i = \hat{\mathbf{v}}_i - \hat{\mathbf{H}}_{i1}\mathbf{X}_1, \quad i = 2 \dots N, \quad (7)$$

где $\hat{\mathbf{H}}_{i1} = \mathbf{H}_{i1} + \mathbf{H}_i\mathbf{P}_{i1}\mathbf{P}_{11}^{-1}$ – приведенная матрица измерений.

Таким образом, из всех уравнений измерений были исключены векторы состояния измерителей; вектор состояния новой системы равен общему вектору состояния $\mathbf{X}_1$ исходной системы.

Тогда для расчета апостериорной матрицы ковариаций оптимальной оценки общего вектора состояния $\mathbf{X}_1$ можно воспользоваться ее выражением в информационной форме [16]:

$$\bar{\mathbf{P}}_{11} = \left(\mathbf{P}_{11}^{-1} + \sum_{i=2}^N \hat{\mathbf{H}}_{1i}^T \hat{\mathbf{R}}_i^{-1} \hat{\mathbf{H}}_{1i} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Зная апостериорную матрицу ковариаций оптимальной оценки общего вектора состояния $\mathbf{X}_1$, матрицы оптимальных коэффициентов Калмана для него можно выразить как

$$\mathbf{K}_{1i} = \bar{\mathbf{P}}_{11} \hat{\mathbf{H}}_{1i}^T \hat{\mathbf{R}}_i^{-1}, \quad i = 2 \dots N. \quad (9)$$

Таким образом, порядок фильтра Калмана удалось редуцировать, исключив векторы состояния измерителей, и на основе редуцированной модели были получены оптимальные коэффициенты Калмана для общего вектора состояния $\mathbf{X}_1$. Тогда оптимальная апостериорная оценка $\mathbf{X}_1$ выражается как

$$\bar{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{X}_1 + \sum_{i=2}^N \mathbf{K}_{1i} \mathbf{Y}_i, \quad (10)$$

где $\bar{\mathbf{X}}_1$ – оптимальная апостериорная оценка общего вектора состояния.

Далее необходимо рассчитать коэффициенты Калмана для всех векторов $\mathbf{X}_i$, используя знание $\bar{\mathbf{X}}_1$.

Оптимальную апостериорную оценку $\bar{\mathbf{X}}_i$ можно записать в виде

$$\bar{\mathbf{X}}_i = \mathbf{P}_{i1} \mathbf{P}_{11}^{-1} \bar{\mathbf{X}}_1 + \gamma_i + \hat{\mathbf{K}}_i (\mathbf{v}_i - \hat{\mathbf{H}}_{i1} \bar{\mathbf{X}}_1 - \mathbf{H}_i \gamma_i), \quad i = 2 \dots N, \quad (11)$$

где $\hat{\mathbf{K}}_i$ – матрица оптимальных коэффициентов усиления по невязке i -го уравнения измерения.

Сгруппируем в (11) члены, содержащие $\bar{\mathbf{X}}_1$, и введем обозначения:

$$\bar{\mathbf{X}}_i = \mathbf{M}_i \bar{\mathbf{X}}_1 + \bar{\gamma}_i, \quad i = 2 \dots N, \quad (12)$$

где $\mathbf{M}_i = \mathbf{P}_{i1} \mathbf{P}_{11}^{-1} - \hat{\mathbf{K}}_i \hat{\mathbf{H}}_{i1}$, $\bar{\gamma}_i = (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{H}_i) \gamma_i + \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{v}_i$.

Таким образом, оптимальная апостериорная оценка $\bar{\mathbf{X}}_i$ состоит из двух частей: части, линейно зависящей от $\bar{\mathbf{X}}_1$, и остатка $\bar{\gamma}_i$. Поскольку оценка $\bar{\mathbf{X}}_1$ уже оптимальна, $\hat{\mathbf{K}}_i$ можно определить из условия минимизации следа матрицы ковариации остатка $\bar{\gamma}_i$:

$$\hat{\mathbf{K}}_i = \mathbf{P}_{ii}^* \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_{ii}^* \mathbf{H}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1}, \quad i = 2 \dots N. \quad (13)$$

Условия (2) требуют, чтобы апостериорные оценки векторов состояния измерителей $\bar{\mathbf{X}}_i$ были статистически связаны посредством $\bar{\mathbf{X}}_1$, иначе условия применения блочного алгоритма фильтра Калмана не будут выполнены на следующей итерации фильтра:

$$\text{cov}(\bar{\gamma}_i, \bar{\mathbf{X}}_1) = 0, \quad i = 2 \dots N, \quad (14)$$

$$\text{cov}(\bar{\gamma}_i, \bar{\gamma}_j) = 0, \quad i = 2 \dots N, \quad j \neq i. \quad (15)$$

Вычислим $\text{cov}(\bar{\gamma}_i, \bar{\gamma}_j)$ и покажем, что это условие (15) выполнено:

$$\begin{aligned} \text{cov}(\bar{\gamma}_i, \bar{\gamma}_j) &= \langle \bar{\gamma}_i \cdot \bar{\gamma}_j^T \rangle = \\ &= \left\langle \left[(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{H}_i) \gamma_i + \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{v}_i \right] \cdot \left[(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}_j \mathbf{H}_j) \gamma_j + \hat{\mathbf{K}}_j \mathbf{v}_j \right]^T \right\rangle = 0, \quad i = 2 \dots N, \quad j \neq i. \end{aligned} \quad (16)$$

Вычислим $\text{cov}(\bar{\gamma}_i, \bar{\mathbf{X}}_1)$:

$$\begin{aligned} \text{cov}(\bar{\gamma}_i, \bar{\mathbf{X}}_1) &= \langle \bar{\gamma}_i \cdot \bar{\mathbf{X}}_1^T \rangle = \\ &= \left\langle \left[(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{H}_i) \gamma_i + \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{v}_i \right] \cdot \left[\left(\mathbf{I} - \sum_{k=2}^N \mathbf{K}_{1k} \hat{\mathbf{H}}_{1k} \right) \bar{\mathbf{X}}_1 + \sum_{k=2}^N \mathbf{K}_{1k} (\mathbf{v}_k - \mathbf{H}_k \gamma_k) \right]^T \right\rangle = \\ &= \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{R}_i \mathbf{K}_{1i}^T - (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_{ii}^{\gamma} \mathbf{H}_i^T \mathbf{K}_{1i}^T = \left[\hat{\mathbf{K}}_i (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_{ii}^{\gamma} \mathbf{H}_i^T + \mathbf{R}_i) - \mathbf{P}_{ii}^{\gamma} \mathbf{H}_i^T \right] \mathbf{K}_{1i}^T, \quad i = 2 \dots N. \end{aligned} \quad (17)$$

Нетрудно видеть, что подстановка в (17) выражения (13) для оптимального коэффициента $\hat{\mathbf{K}}_i$ обращает (17) в 0, то есть (14) выполнено.

Таким образом, условия (2) не нарушаются в результате введения оптимальных поправок, и алгоритм блочного фильтра может быть применен и на следующих итерациях.

Осталось рассчитать матрицы ковариаций для апостериорных оценок $\bar{\mathbf{X}}_i$:

$$\bar{\mathbf{P}}_{i1} = \mathbf{M}_i \bar{\mathbf{P}}_{11}, \quad \bar{\mathbf{P}}_{ii}^{\gamma} = (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{P}_{ii}^{\gamma}, \quad \bar{\mathbf{P}}_{ii} = \mathbf{M}_i \bar{\mathbf{P}}_{11} \mathbf{M}_i^T + \bar{\mathbf{P}}_{ii}^{\gamma}. \quad (18)$$

В соответствии с (11) получаем, что рассчитать коэффициенты Калмана вектора состояния i -го измерителя $\mathbf{X}_i$ можно по следующим формулам:

$$\mathbf{K}_{ij} = \begin{cases} \mathbf{M}_i \mathbf{K}_{1j}, & j \neq i \\ \mathbf{M}_i \mathbf{K}_{1i} + \hat{\mathbf{K}}_i, & j = i \end{cases}. \quad (19)$$

В соответствии с (11) и (19) оптимальную апостериорную оценку $\bar{\mathbf{X}}_i$ вектора состояния i -го измерителя можно получить как

$$\bar{\mathbf{X}}_i = \mathbf{X}_i + \sum_{j=2}^N \mathbf{M}_i \mathbf{K}_{1j} \mathbf{Y}_j + \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{Y}_i = \mathbf{M}_i \Delta \bar{\mathbf{X}}_1 + \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{Y}_i, \quad (20)$$

где $\Delta \bar{\mathbf{X}}_1 = \sum_{j=2}^N \mathbf{K}_{1j} \mathbf{Y}_j$ – оптимальная поправка к оценке общего вектора состояния системы $\mathbf{X}_1$.

Таким образом, с учетом статистических взаимосвязей между оценкой общего вектора состояния системы $\mathbf{X}_1$ и оценками векторов состояния измерителей $\mathbf{X}_i$, $i = 2 \dots N$, заданных условиями (2), получены упрощенные выражения для расчета оптимальных оценок. Сложность алгоритма линейна относительно числа измерителей. Графически отобразить отличие предложенных уравнений от используемых в классическом алгоритме фильтра Калмана позволяют схемы на рис. 1 и 2.

Поправки к оценкам
векторов состояния блоков

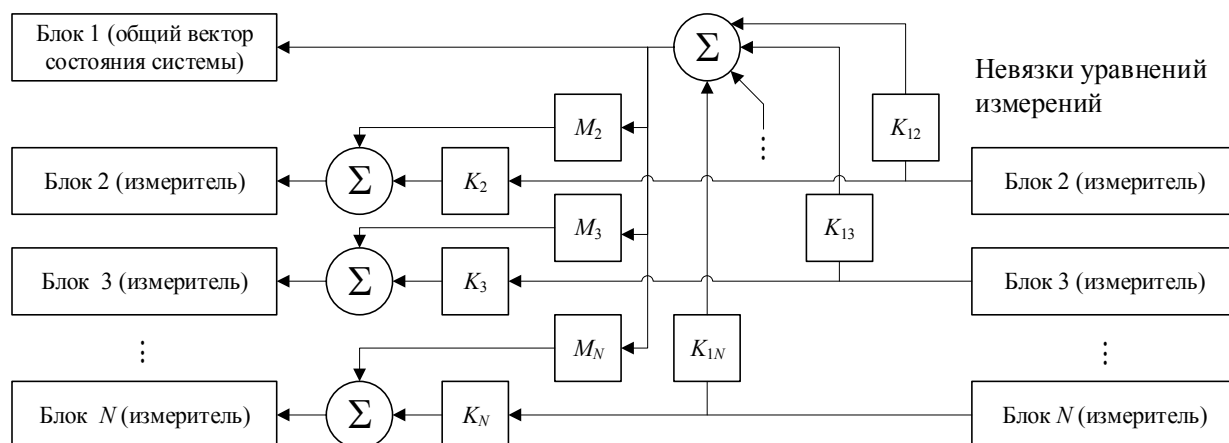


Рис. 1. Схема расчета оптимальных корректирующих поправок блочного фильтра Калмана
Fig. 1. The scheme for calculating optimal corrections of the block Kalman filter

Поправки к оценкам
векторов состояния блоков

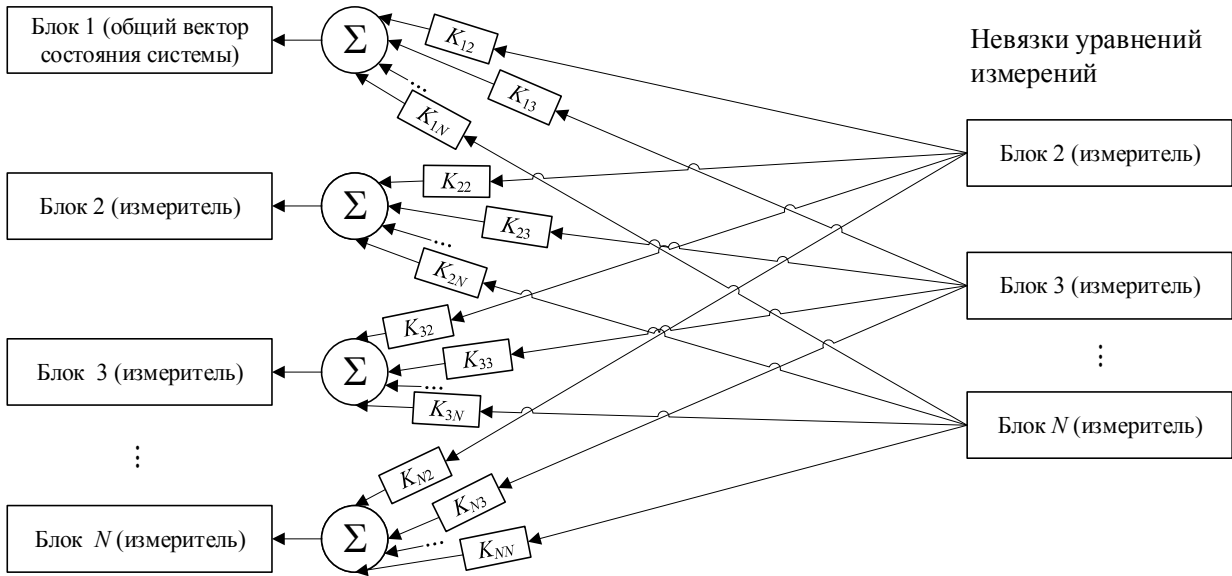


Рис. 2. Схема расчета оптимальных корректирующих поправок классического фильтра Калмана
Fig. 2. The scheme for calculating optimal corrections of the standard Kalman filter

3. Этап прогноза

Блочные уравнения этапа прогноза получены на основе уравнения прогноза для матрицы ковариаций (21).

$$\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{F}\mathbf{P}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} & \cdots & \mathbf{F}_{1N} \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ \mathbf{F}_{N1} & 0 & 0 & \mathbf{F}_{NN} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{11} & \mathbf{Q}_{12} & \cdots & \mathbf{Q}_{1N} \\ \mathbf{Q}_{21} & \mathbf{Q}_{22} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ \mathbf{Q}_{N1} & 0 & 0 & \mathbf{Q}_{NN} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

где $\bar{\mathbf{P}}$ – новое значение матрицы ковариаций; $\mathbf{F}$ – переходная матрица динамики ФК; $\mathbf{Q}$ – матрица ковариаций шумов динамики ФК.

Уравнения прогноза для матриц ковариаций фильтра можно записать как

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{P}}_{11} &= \hat{\mathbf{F}}_{11}\mathbf{P}_{11}\hat{\mathbf{F}}_{11}^T + \hat{\mathbf{Q}}_{11}, \\ \bar{\mathbf{P}}_{ii} &= (\mathbf{F}_{i1}\mathbf{P}_{i1} + \mathbf{F}_{ii}\mathbf{P}_{ii}) \cdot \mathbf{F}_{ii}^T + (\mathbf{F}_{i1}\mathbf{P}_{11} + \mathbf{F}_{ii}\mathbf{P}_{i1}) \cdot \mathbf{F}_{i1}^T + \mathbf{Q}_{ii}, \\ \bar{\mathbf{P}}_{i1} &= (\mathbf{F}_{i1}\mathbf{P}_{i1} + \mathbf{F}_{ii}\mathbf{P}_{11})\mathbf{F}_{11}^T + (\mathbf{F}_{ii}\mathbf{P}_{i1}\mathbf{P}_{11}^{-1} + \mathbf{F}_{i1}) \cdot \sum_{j=2}^N [\mathbf{P}_{1j}\mathbf{F}_{1j}^T] + \mathbf{Q}_{i1}, \end{aligned}$$

$$\text{где } \hat{\mathbf{F}}_{11} = \mathbf{F}_{11} + \left[\sum_{i=2}^N \mathbf{F}_{1i}\mathbf{P}_{i1} \right] \cdot \mathbf{P}_{11}^{-1}; \quad \hat{\mathbf{Q}}_{11} = \mathbf{Q}_{11} + \sum_{i=2}^N \mathbf{F}_{1i} \left(\mathbf{P}_{ii} - \mathbf{P}_{i1}\mathbf{P}_{11}^{-1}\mathbf{P}_{1i} \right) \mathbf{F}_{1i}^T.$$

Динамика общего вектора состояния системы $\mathbf{X}_1$ в общем случае приводит к нарушению условий (2), даже если в начальный момент они были выполнены, так как векторы состояния измерителей $\mathbf{X}_i$, $\mathbf{X}_j$ становятся статистически связаны не только посредством текущего значения общего вектора состояния системы, но и посредством его значений в прошлом:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i^k &= \mathbf{A}_{i1}^k \mathbf{X}_1^k + \mathbf{A}_{i1}^{k-1} \mathbf{X}_1^{k-1} + \dots + \mathbf{A}_{i1}^0 \mathbf{X}_1^0 + \gamma_i, \quad i = 2 \dots N, \\ \mathbf{X}_j^k &= \mathbf{A}_{j1}^k \mathbf{X}_1^k + \mathbf{A}_{j1}^{k-1} \mathbf{X}_1^{k-1} + \dots + \mathbf{A}_{j1}^0 \mathbf{X}_1^0 + \gamma_j, \quad j \neq i, \\ \text{cov}(\gamma_i, \mathbf{X}_1^s) &= \text{cov}(\gamma_j, \mathbf{X}_1^s) = \text{cov}(\gamma_i, \gamma_j) = 0, \quad s = 0 \dots k. \end{aligned} \quad (22)$$

В системах без шума динамики общего вектора состояния системы ($\mathbf{Q}_{11} = 0$) с невырожденными переходными матрицами динамики $\mathbf{F}_{11}$ и при $\mathbf{F}_{li} = 0$, $i = 2 \dots N$ текущее значение общего вектора состояния системы определяет все его состояния в прошлом:

$$\mathbf{X}_1^{k-1} = \mathbf{A}_{11}^{k-1} \mathbf{X}_1^k, \quad \mathbf{X}_1^{k-2} = \mathbf{A}_{11}^{k-2} \mathbf{X}_1^k, \quad \dots, \quad \mathbf{X}_1^0 = \mathbf{A}_{11}^0 \mathbf{X}_1^k. \quad (23)$$

Подставив (23) в (22), получаем, что в этом случае условия (2) выполнены:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i^k &= \mathbf{A}_{i1} \mathbf{X}_1^k + \boldsymbol{\gamma}_i, \quad i = 2 \dots N, \\ \mathbf{X}_j^k &= \mathbf{A}_{j1} \mathbf{X}_1^k + \boldsymbol{\gamma}_j, \quad j \neq i, \quad j = 2 \dots N, \\ \text{cov}(\boldsymbol{\gamma}_i, \mathbf{X}_1^k) &= \text{cov}(\boldsymbol{\gamma}_j, \mathbf{X}_1^k) = \text{cov}(\boldsymbol{\gamma}_i, \boldsymbol{\gamma}_j) = 0, \end{aligned} \quad (24)$$

где $\mathbf{A}_{i1} = \mathbf{A}_{i1}^k + \mathbf{A}_{i1}^{k-1} \mathbf{A}_{11}^{k-1} + \dots + \mathbf{A}_{i1}^0 \mathbf{A}_{11}^0$, $\mathbf{A}_{j1} = \mathbf{A}_{j1}^k + \mathbf{A}_{j1}^{k-1} \mathbf{A}_{11}^{k-1} + \dots + \mathbf{A}_{j1}^0 \mathbf{A}_{11}^0$.

При малых $\mathbf{Q}_{11}$ условия (2) выполнены приближенно. Чтобы повысить точность выполнения условий (2), можно расширить общий вектор состояния, выбрав переходные матрицы дополнительных переменных состояния таким образом, чтобы «запоминать» больше информации о прошлых состояниях системы.

Например, для навигационной системы с техническим зрением можно прибегнуть к расширению вектора состояния набором из нескольких НЧ-фильтрованных оценок ошибок координат и углов ориентации, выбрав различные постоянные времени:

$$\tilde{\mathbf{X}}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^T & \mathbf{X}_{T_1}^{r\varphi T} & \mathbf{X}_{T_2}^{r\varphi T} & \dots & \mathbf{X}_{T_n}^{r\varphi T} \end{bmatrix}^T,$$

где $\tilde{\mathbf{X}}_1$ – расширенный общий вектор состояния системы; $\mathbf{X}_{T_i}^{r\varphi}$ – вектор состояния НЧ-фильтрованной с постоянной времени T_i оценки ошибок координат и углов ориентации.

Оценки $\mathbf{X}_{T_i}^{r\varphi}$ подчиняются следующим уравнениям динамики:

$$\mathbf{X}_{T_i}^{r\varphi k+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{T_i}\right) \cdot \mathbf{X}_{T_i}^{r\varphi k} + \frac{\Delta t}{T_i} \cdot \mathbf{X}_k^{r\varphi}, \quad i = 1 \dots n, \quad (25)$$

где $\mathbf{X}^{r\varphi}$ – вектор состояния ошибок оценок координат и углов ориентации НС; Δt – шаг по времени между итерациями фильтра Калмана.

Предварительные численные эксперименты показывают, что для получения оценок навигационных параметров с СКО, эквивалентной СКО оценок классического фильтра Калмана, число n можно выбрать небольшим: $n = 1 \dots 3$.

4. LDL-факторизация уравнений блочного фильтра Калмана

В настоящее время разработаны алгоритмы калмановской фильтрации, алгебраически эквивалентные классическому фильтру Калмана, но обладающие значительно большей вычислительной устойчивостью: квадратноокорневой фильтр Поттера, UD-фильтр Бирмана и др. [8, 17, 18]. Данные алгоритмы используют различные приемы факторизации ковариационных матриц для устранения опасности потери ими положительной определенности и симметричности вследствие ошибок округления.

Для реализации численно-устойчивого алгоритма блочного фильтра Калмана была выбрана LDL-факторизация ковариационных матриц [19].

Введем обозначения: $\mathbf{L}_{11}$, $\mathbf{D}_{11}$ – нижнетреугольный и диагональный факторы матрицы ковариаций $\mathbf{P}_1$ соответственно; $\mathbf{L}_{ii}$, $\mathbf{D}_{ii}$ – нижнетреугольный и диагональный факторы матрицы ковариаций $\mathbf{P}_{ii}^y$ соответственно; $\mathbf{L}_{i1}$ – фактор, определяющий взаимную корреляцию $\mathbf{X}_1$ и $\mathbf{X}_i$:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{11} &= \mathbf{L}_{11} \mathbf{D}_{11} \mathbf{L}_{11}^T, \quad \mathbf{P}_{ii}^y = \mathbf{L}_{ii} \mathbf{D}_{ii} \mathbf{L}_{ii}^T, \quad i = 2 \dots N, \\ \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & 0_{n_1 \times n_i} \\ \mathbf{L}_{i1} & \mathbf{L}_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & 0_{n_1 \times n_i} \\ 0_{n_i \times n_1} & \mathbf{D}_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11} & 0_{n_1 \times n_i} \\ \mathbf{L}_{i1} & \mathbf{L}_{ii} \end{bmatrix}^T &= \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{1i} \\ \mathbf{P}_{i1} & \mathbf{P}_{ii} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4.1. Уравнения LDL-факторизованного блочного фильтра Калмана на этапе коррекции

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\hat{\mathbf{R}}_i} &= [\mathbf{L}_{\mathbf{R}_i}, -\mathbf{H}_i \mathbf{L}_{ii}], \quad \mathbf{D}_{\hat{\mathbf{R}}_i}^0 = [\mathbf{D}_{\mathbf{R}_i}, \mathbf{D}_{ii}], \\ \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{R}}_i}, \mathbf{D}_{\hat{\mathbf{R}}_i} &= \text{mwgs}_L(\mathbf{W}_{\hat{\mathbf{R}}_i}, \mathbf{D}_{\hat{\mathbf{R}}_i}^0), \quad i = 2 \dots N, \\ \mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}} &= [\mathbf{L}_{11}^{-T}, \hat{\mathbf{H}}_2^T \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{R}}_2}^{-T}, \hat{\mathbf{H}}_3^T \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{R}}_3}^{-T}, \dots, \hat{\mathbf{H}}_N^T \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{R}}_N}^{-T}], \quad \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}}^0 = [\mathbf{D}_{11}^{-1}, \mathbf{D}_{\hat{\mathbf{R}}_2}^{-1}, \mathbf{D}_{\hat{\mathbf{R}}_3}^{-1}, \dots, \mathbf{D}_{\hat{\mathbf{R}}_N}^{-1}], \\ \mathbf{U}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}}, \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}} &= \text{mwgs}_U(\mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}}, \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}}^0), \\ \bar{\mathbf{L}}_{11} &= (\mathbf{U}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}})^{-T}, \quad \bar{\mathbf{D}}_{11} = (\mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}^{-1}})^{-1}, \\ \mathbf{K}_{li} &= \bar{\mathbf{L}}_{11} \bar{\mathbf{D}}_{11} \bar{\mathbf{L}}_{11}^T \hat{\mathbf{H}}_{li}^T \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{R}}_i}^{-T} \mathbf{D}_{\hat{\mathbf{R}}_i}^{-1} \mathbf{L}_{\hat{\mathbf{R}}_i}^{-1}, \quad i = 2 \dots N, \\ \mathbf{W}_{\mathbf{S}_i^y} &= [\mathbf{H}_i \mathbf{L}_{ii}, \mathbf{L}_{\mathbf{R}_i}], \quad \mathbf{D}_{\mathbf{S}_i^y}^0 = [\mathbf{D}_{ii}, \mathbf{D}_{\mathbf{R}_i}], \\ \mathbf{L}_{\mathbf{S}_i^y}, \mathbf{D}_{\mathbf{S}_i^y} &= \text{mwgs}_L(\mathbf{W}_{\mathbf{S}_i^y}, \mathbf{D}_{\mathbf{S}_i^y}^0), \quad i = 2 \dots N, \\ \hat{\mathbf{K}}_i &= \mathbf{L}_{ii} \mathbf{D}_{ii} \mathbf{L}_{ii}^T \mathbf{H}_i^T \mathbf{L}_{\mathbf{S}_i^y}^{-T} \mathbf{D}_{\mathbf{S}_i^y}^{-1} \mathbf{L}_{\mathbf{S}_i^y}^{-1}, \quad i = 2 \dots N, \\ \mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}^y} &= [(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{H}_i) \mathbf{L}_{ii}, \hat{\mathbf{K}}_i \mathbf{L}_{\mathbf{R}_i}], \quad \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}^y}^0 = [\mathbf{D}_{ii}, \mathbf{D}_{\mathbf{R}_i}], \\ \bar{\mathbf{L}}_{ii}, \bar{\mathbf{D}}_{ii} &= \text{mwgs}_L(\mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}^y}, \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}^y}^0), \quad i = 2 \dots N, \\ \bar{\mathbf{L}}_{i1} &= \mathbf{M}_i \bar{\mathbf{L}}_{11}, \end{aligned}$$

где $\hat{\mathbf{H}}_{li} = \mathbf{H}_{li} + \mathbf{H}_i \mathbf{L}_{i1} \mathbf{L}_{11}^{-1}$; $\mathbf{M}_i = \mathbf{L}_{i1} \mathbf{L}_{11}^{-1} - \hat{\mathbf{K}}_i \hat{\mathbf{H}}_{li}$; $\text{mwgs}_L(\mathbf{W}, \mathbf{D}^0)$, $\text{mwgs}_U(\mathbf{W}, \mathbf{D}^0)$ – процедуры модифицированной взвешенной ортогонализации Грама – Шмидта с нижнетреугольной и верхнетреугольной матрицами перехода соответственно.

4.2. Уравнения LDL-факторизованного блочного фильтра Калмана на этапе прогноза

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}} &= [\mathbf{F}_{11} \mathbf{L}_{11}, \mathbf{L}_{\mathbf{Q}_{11}}], \quad \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}}^0 = [\mathbf{D}_{11}, \mathbf{D}_{\mathbf{Q}_{11}}], \\ \bar{\mathbf{L}}_{11}, \bar{\mathbf{D}}_{11}, \mathbf{V}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}} &= \text{mwgs}_L(\mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}}, \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}}^0), \\ \mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}} &= [\mathbf{F}_{i1} \mathbf{L}_{11} + \mathbf{F}_{ii} \mathbf{L}_{i1}, \mathbf{L}_{i1}^Q, \mathbf{F}_{ii}^Q \mathbf{L}_{ii}, \mathbf{L}_{\mathbf{Q}_{ii}}], \quad \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}}^0 = [\mathbf{D}_{11}, \mathbf{D}_{\mathbf{Q}_{11}}, \mathbf{D}_{ii}, \mathbf{D}_{\mathbf{Q}_{ii}}], \\ \bar{\mathbf{L}}_{ii}, \bar{\mathbf{D}}_{ii} &= \text{mwgs}_{2L}(\mathbf{W}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}}, \mathbf{D}_{\bar{\mathbf{P}}_{ii}}^0, \mathbf{V}_{\bar{\mathbf{P}}_{11}}, \bar{\mathbf{D}}_{11}), \quad i = 2 \dots N, \end{aligned}$$

где $\text{mwgs}_{2L}(\mathbf{W}, \mathbf{D}^0, \mathbf{V}, \mathbf{D}^1)$ – процедура модифицированной взвешенной ортогонализации Грама – Шмидта с нижнетреугольной матрицей перехода, достраивающая ортогональную систему векторов-строк $\mathbf{V}$ до ортогонального базиса системы векторов-строк $[\mathbf{V}^T, \mathbf{W}^T]^T$.

Уравнения приведены для случая $\mathbf{F}_{li} = 0$, $i = 2 \dots N$. Полученный LDL-факторизованный блочный фильтр Калмана имеет линейную вычислительную сложность относительно числа измерителей и линейные затраты памяти.

5. Численные испытания блочного фильтра Калмана

В среде GNU Octave сформирована процедура, реализующая алгоритм блочного LDL-факторизованного фильтра Калмана; подготовлен скрипт, инициализирующий матрицами со случайными коэффициентами структуру фильтра, состоящего из заданного числа блоков с заданными размерностями векторов состояния и измерения.

Проведено сравнение затрат времени на 1 шаг коррекции для блочного LDL-факторизованного фильтра Калмана и классического LDL-факторизованного фильтра Калмана на одинаковых исходных данных (рис. 3). Размерность общего вектора состояния принята рав-

ной 27, размерность вектора состояния измерителей – 6, размерность вектора измерения измерителей – 8.

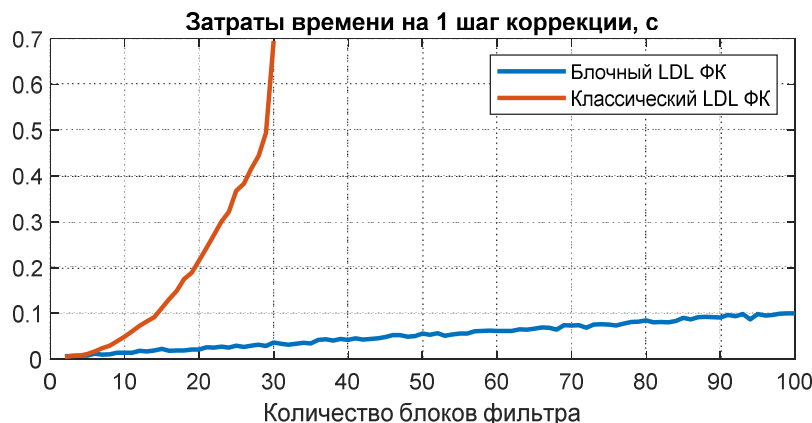


Рис. 3. Сравнение вычислительной сложности алгоритмов ФК
Fig. 3. Computational complexity comparison of the Kalman Filter algorithms

Данные рис. 3 подтверждают линейную вычислительную сложность алгоритма блочного LDL-факторизованного фильтра Калмана и его превосходство по скорости работы над стандартной реализацией LDL-факторизованного фильтра Калмана.

6. Пример применения блочного фильтра Калмана

Рассмотрим пример применения блочного фильтра Калмана в навигационной системе (НС) с коррекцией по визуальным опорным маркерам (в рамках численного эксперимента). Данная навигационная система содержит БИНС с МЭМС-датчиками, видеокамеру. При попадании опорного маркера в область зрения видеокамеры происходит оценивание его расположения методами проективной геометрии (РЗР) [20], после чего координаты угловых точек маркера на кадрах видеопотока используются в качестве измерений в фильтре Калмана для коррекции ошибок БИНС и уточнения оценок расположения маркера.

Вектор состояния навигационной системы включает в себя ошибки БИНС (ошибки оценок ориентации, положения и скорости, смещения нуля МЭМС-датчиков), ошибки оценок расположения опорных маркеров:

$$\mathbf{X}_{15 \times 1}^{BINS} = \begin{bmatrix} \delta\varphi_{3 \times 1}^T & \delta r_{3 \times 1}^T & \delta v_{3 \times 1}^T & b^{gyr}_{3 \times 1}^T & b^{acc}_{3 \times 1}^T \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{X}_{6 \times 1}^{marker i} = \begin{bmatrix} \delta\varphi_{3 \times 1}^{marker i} \\ \delta r_{3 \times 1}^{marker i} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X}_{(15+6m) \times 1}^{INS} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{15 \times 1}^{BINS T} & \mathbf{X}_{6 \times 1}^{marker 1 T} & \dots & \mathbf{X}_{6 \times 1}^{marker m T} \end{bmatrix}^T, \quad (26)$$

где $\delta\varphi$ – вектор ошибок оценки ориентации; δr – вектор ошибок оценки положения; δv – вектор ошибок оценки линейной скорости; b^{gyr} – вектор смещений нуля датчика угловой скорости; b^{acc} – вектор смещений нуля акселерометра; $\delta\varphi^{marker i}$ – вектор ошибок оценки ориентации i -го маркера; $\delta r^{marker i}$ – вектор ошибок оценки положения i -го маркера.

В рамках численного эксперимента рассмотрим оценки классического фильтра Калмана с вектором состояния (26), блочного фильтра Калмана с вектором состояния (26) и блочного фильтра Калмана с расширенным вектором состояния (27):

$$\mathbf{X}_{(27+6m) \times 1}^{INS+} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{27 \times 1}^{BINS+ T} & \mathbf{X}_{6 \times 1}^{marker 1 T} & \dots & \mathbf{X}_{6 \times 1}^{marker m T} \end{bmatrix}^T, \quad (27)$$

$$\mathbf{X}_{(15+6 \cdot 2) \times 1}^{BINS+} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{15 \times 1}^{BINS T} & \mathbf{X}_{T_1 6 \times 1}^{r\varphi T} & \mathbf{X}_{T_2 6 \times 1}^{r\varphi T} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{X}_{T_s k+1}^{r\varphi} = \left(1 - \frac{\Delta t}{T_s}\right) \cdot \mathbf{X}_{T_s k}^{r\varphi} + \frac{\Delta t}{T_s} \cdot \begin{bmatrix} \delta\varphi \\ \delta r \end{bmatrix},$$

где $s = 1 \dots 2$, $\Delta t = 0,05$ с, $T_1 = 5$ с, $T_2 = 10$ с.

Покажем, что расширение вектора состояния приближает оценки блочного фильтра Калмана к оценкам классического алгоритма Калмана.

При обзоре одного маркера оценки трех фильтров совпадут, так как в этом случае фильтры алгебраически эквивалентны; поэтому произведем моделирование работы НС при обзоре двух маркеров. На рис. 4 описаны траектория движения объекта с НС, расположение опорных маркеров, начальные и конечные оценки их расположения.

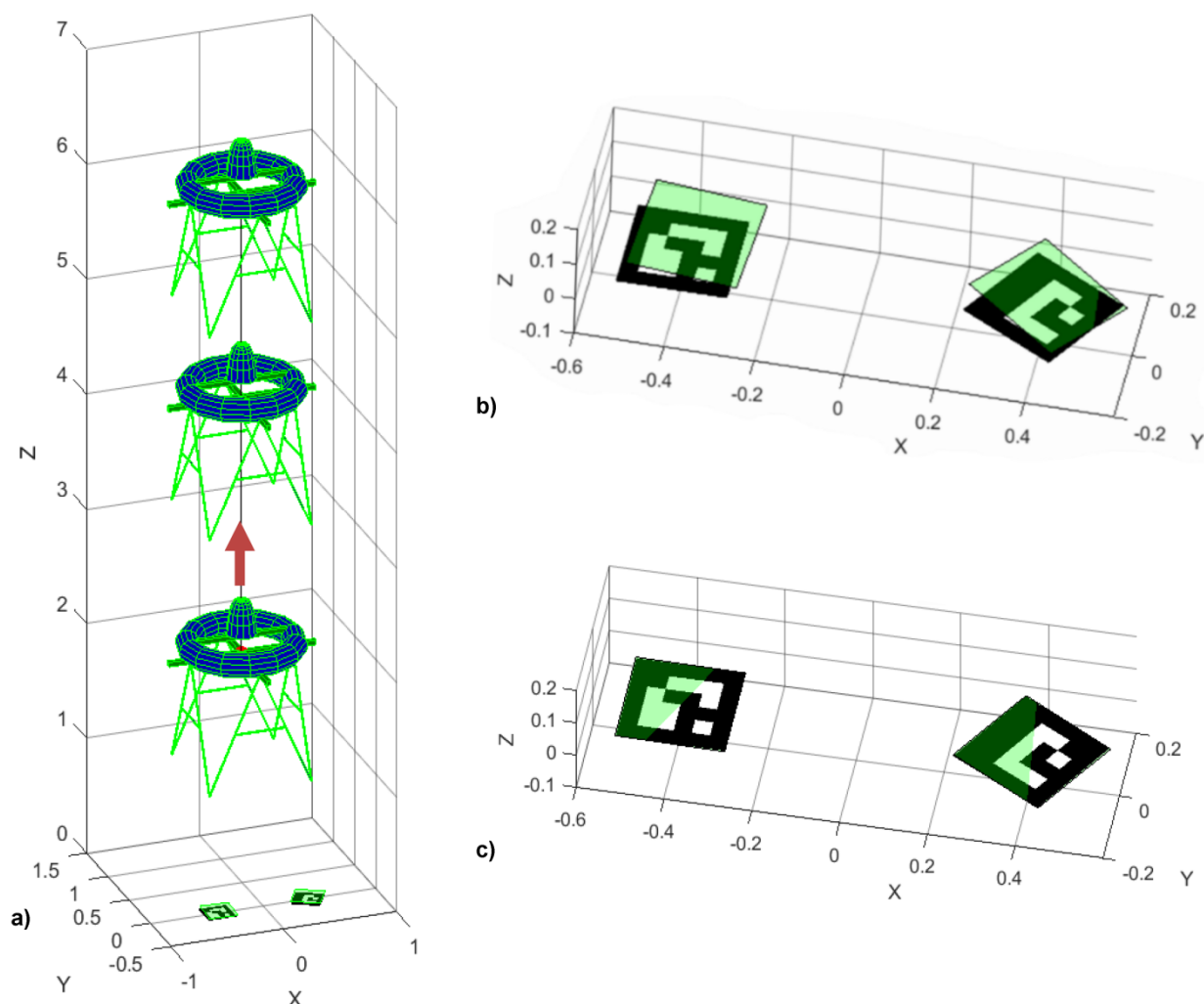


Рис. 4. Траектория движения объекта и расположение опорных маркеров, м: а – траектория; б – расположение маркеров и их оценка в начальный момент времени; с – в конечный момент времени
Fig. 4. Trajectory of the object and location of the fiducial markers, meters: а – trajectory; б – location of markers and their estimation at the initial time; с – at the final time

На рис. 5 представлены графики оценок навигационных параметров, полученных классическим ФК, блочным ФК без расширения вектора состояния; блочным ФК с расширенным вектором состояния. Как видно из рис. 5, для навигационных параметров с малым временем корреляции ошибки (координаты по оси X, Y, углы тангажа и крена) оценки трех фильтров близки, тогда как для навигационных параметров с большим временем корреляции ошибки (высота, угол рыскания) блочный фильтр Калмана без расширения вектора состояния дает отличающиеся оценки. Это связано с тем, что данный фильтр не учитывает коррелированность векторов состояния ошибок оценок расположения маркеров через «прошлое» общего вектора состояния системы. Из рис. 5 также видно, что расширение вектора состояния блочного фильтра существенно приблизило его оценки к оценкам классического ФК, так как в этом случае условия (22) приближаются к условиям (2).

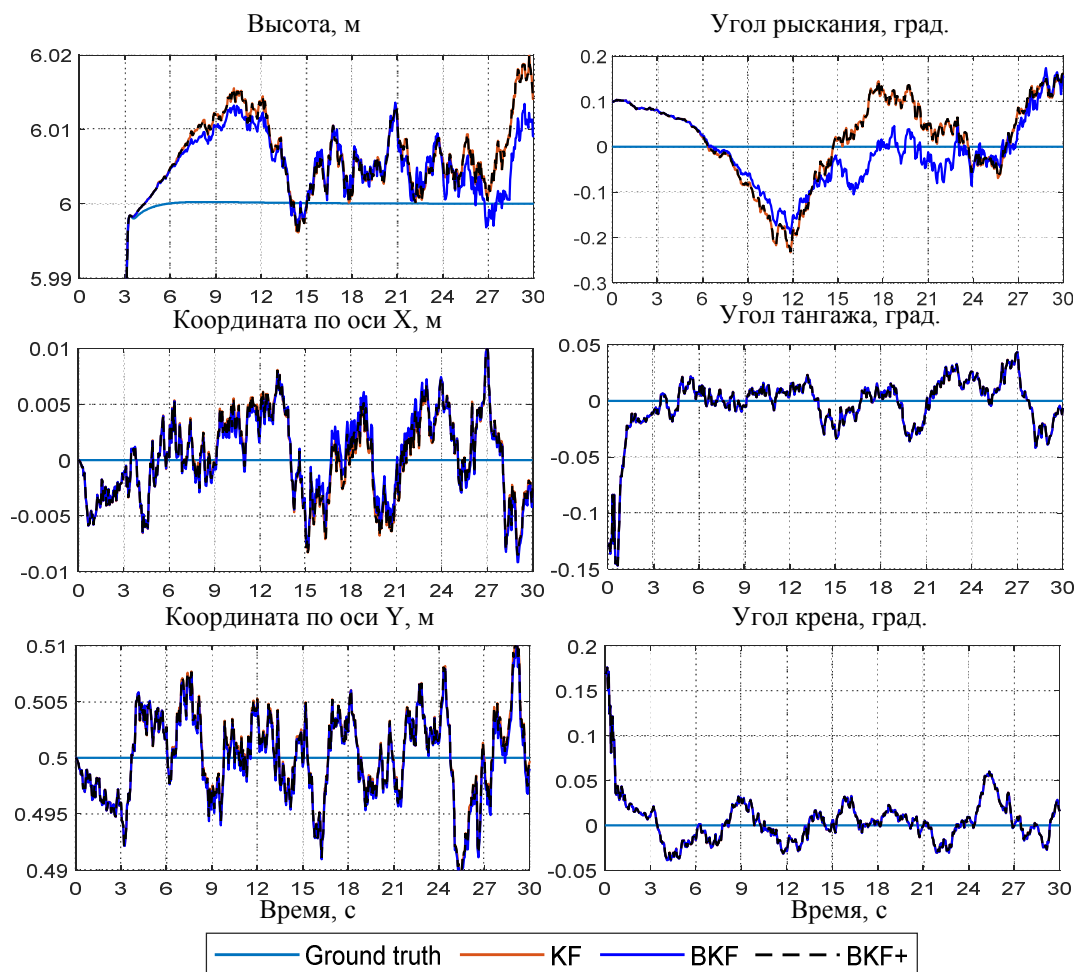


Рис. 5. Сравнение навигационных оценок, полученных тремя фильтрами: классическим ФК (KF), блочным ФК (BKF), блочным ФК с расширенным вектором состояния (BKF+)

Fig. 5. Comparing navigation estimates from three Kalman Filters: standard KF (KF), block KF (BKF), block KF with extended state vector (BKF+)

Заключение

Были получены уравнения блочного фильтра Калмана; доказана эквивалентность блочного фильтра Калмана классическому при выполнении условий (2). Для улучшения численной устойчивости алгоритма была проведена LDL-факторизация уравнений блочного фильтра Калмана; в рамках численного эксперимента показана его линейная вычислительная сложность от числа источников информации. Предложен способ приближения оценок блочного фильтра Калмана к оценкам классического фильтра за счет расширения вектора состояния; способ проверен в рамках численного эксперимента на примере навигационной системы с коррекцией по опорным маркерам.

В ходе дальнейших исследований будут рассмотрены альтернативные способы формирования расширенного вектора состояния фильтра; будет проведено тестирование блочного фильтра Калмана в рамках более сложных сценариев.

Список литературы

1. Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback / M. Bloesch, M. Burri, S. Omari et al. // The International Journal of Robotics Research. 2017. Vol. 36 (10). P. 1053–1072. DOI: 10.1177/0278364917728574
2. Li M., Mourikis A.I. Improving the accuracy of EKF-based visual-inertial odometry // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, MN, USA, 2012. P. 828–835. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225229
3. Fang Q., Huang S.X. UKF for Integrated Vision and Inertial Sensors Based on Three-View Geometry // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13 (7). P. 2711–2719. DOI: 10.1109/jsen.2013.2259228

4. Bleser G., Strickery D. Using the marginalised particle filter for real-time visual-inertial sensor fusion // 2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Cambridge, UK, 2008. P. 3–12. DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637316
5. Particle filter approach to vision-based navigation with aerial image segmentation / K. Hong, S. Kim, J. Park, H. Bang // Journal of Aerospace Information Systems. 2021. Vol. 18 (12). P. 1–9. DOI: 10.2514/1.1010957
6. A review of visual inertial odometry from filtering and optimisation perspectives / J. Gui, D. Gu, S. Wang, H. Hu // Advanced Robotics. 2015. Vol. 29 (20). P. 1289–1301. DOI: 10.1080/01691864.2015.1057616
7. Huang G. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, QC, Canada, 2019. P. 9572–9582. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793604
8. Цыганова Ю.В., Куликова М.В. О современных ортогонализированных алгоритмах оптимальной дискретной фильтрации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». 2018. Т. 11, № 4. С. 5–30. DOI: 10.14529/mmp180401
9. Mourikis A.I., Roumeliotis S.I. A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation // Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, Italy, 2007. P. 3565–3572. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.364024
10. INS/vSLAM system using distributed particle filter / D.H. Won, S. Chun, S. Sung et al. // International Journal of Control Automation and Systems. 2010. Vol. 8. P. 1232–1240. DOI: 10.1007/s12555-010-0608-7
11. Paik B.S., Oh J.H. Gain fusion algorithm for decentralised parallel Kalman filters // IEE Proceedings – Control Theory and Applications. 2000. Vol. 147 (1). P. 97–103. DOI: 10.1049/ip-cta:20000141
12. Hashemipour H.R., Roy S., Laub A.J. Decentralized structures for parallel Kalman filtering // IEEE Transactions on Automatic Control. 1988. Vol. 33, no. 1. P. 88–94. DOI: 10.1109/9.364
13. Rao B.S.Y., Durrant-Whyte H.F., Sheen J.A. A Fully Decentralized Multi-Sensor System for Tracking and Surveillance // The International Journal of Robotics Research. 1993. Vol. 12 (1). P. 20–44. DOI: 10.1177/027836499301200102
14. Olfati-Saber R. Distributed Kalman filtering for sensor networks // 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA, 2007. P. 5492–5498. DOI: 10.1109/CDC.2007.4434303
15. Roy S., Hashemi R.H., Laub A.J. Square root parallel Kalman filtering using reduced-order local filters // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1991. Vol. 27, no. 2. P. 276–289. DOI: 10.1109/7.78303
16. Brown R.G., Hwang P.Y.C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering: with MATLAB Exercises. 4th ed. Wiley, 1996.
17. Бортовая реализация адаптивно-робастных оценивающих фильтров: практические результаты / В.Л. Будкин, С.Л. Булгаков, Ю.П. Михеенков и др. // Научный вестник МГТУ ГА. 2005. № 89 (7). С. 59–71.
18. Семушин И.В., Цыганова Ю.В., Захаров К.В. Устойчивые алгоритмы фильтрации – обзор и новые результаты для систем судовождения // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 4. С. 90–112.
19. Thornton C.L. Triangular Covariance Factorizations for Kalman Filtering. Ph.D. Thesis. University of California at Los Angeles, 1976.
20. Complete solution classification for the perspective-three-point problem / X.-S. Gao, X.-R. Hou, J. Tang, H.-F. Cheng // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. Vol. 25, no. 8. P. 930–943. DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1217599

References

1. Bloesch M., Burri M., Omari S., Hutter M., Siegwart R. Iterated extended Kalman filter based visual-inertial odometry using direct photometric feedback. *The International Journal of Robotics Research*. 2017;36(10):1053–1072. DOI: 10.1177/0278364917728574
2. Li M., Mourikis A.I. Improving the accuracy of EKF-based visual-inertial odometry. In: *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Saint Paul, MN, USA; 2012. P. 828–835. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225229
3. Fang Q., Huang S.X. UKF for Integrated Vision and Inertial Sensors Based on Three-View Geometry. *IEEE Sensors Journal*. 2013;13(7):2711–2719. DOI: 10.1109/jsen.2013.2259228

4. Bleser G., Strickery D. Using the marginalised particle filter for real-time visual-inertial sensor fusion. In: *2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Cambridge, UK; 2008. P. 3–12. DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637316
5. Hong K., Kim S., Park J., Bang H. Particle filter approach to vision-based navigation with aerial image segmentation. *Journal of Aerospace Information Systems*. 2021;18(12):1–9. DOI: 10.2514/1.1010957
6. Gui J., Gu D., Wang S., Hu H. A review of visual inertial odometry from filtering and optimisation perspectives. *Advanced Robotics*. 2015;29(20):1289–1301. DOI: 10.1080/01691864.2015.1057616
7. Huang G. Visual-Inertial Navigation: A Concise Review. In: *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Montreal, QC, Canada; 2019. P. 9572–9582. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793604
8. Tsyganova Yu.V., Kulikova M.V. On modern array algorithms for optimal discrete filtering. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2018;11(4):5–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/mmp180401
9. Mourikis A.I., Roumeliotis S.I. A Multi-State Constraint Kalman Filter for Vision-aided Inertial Navigation. In: *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Rome, Italy; 2007. P. 3565–3572. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.364024
10. Won D.H., Chun S., Sung S., Lee Y., Cho J., Joo J., Park J. INS/vSLAM system using distributed particle filter. *International Journal of Control Automation and Systems*. 2010;8:1232–1240. DOI: 10.1007/s12555-010-0608-7
11. Paik B.S., Oh J.H. Gain fusion algorithm for decentralised parallel Kalman filters. *IEE Proceedings – Control Theory and Applications*. 2000;147(1):97–103. DOI: 10.1049/ip-cta:20000141
12. Hashemipour H.R., Roy S., Laub A.J. Decentralized structures for parallel Kalman filtering. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1988;33(1):88–94. DOI: 10.1109/9.364
13. Rao B.S.Y., Durrant-Whyte H.F., Sheen J.A. A Fully Decentralized Multi-Sensor System for Tracking and Surveillance. *The International Journal of Robotics Research*. 1993;12(1):20–44. DOI: 10.1177/027836499301200102
14. Olfati-Saber R. Distributed Kalman filtering for sensor networks. In: *2007 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA, USA; 2007. P. 5492–5498. DOI: 10.1109/CDC.2007.4434303
15. Roy S., Hashemi R.H., Laub A.J. Square root parallel Kalman filtering using reduced-order local filters. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1991;27(2):276–289. DOI: 10.1109/7.78303
16. Brown R.G., Hwang P.Y.C. *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering: with MATLAB Exercises*. 4th ed. Wiley; 1996.
17. Budkin V.L., Bulgakov S.L., Mikheenko Yu.P., Chernodarov A.V., Patrikeev A.P. [On-board implementation of adaptive-robust estimation filters: practical results]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA*. 2005;89(7):59–71. (In Russ.)
18. Semushin I.V., Tsyganova Ju.V., Zakharov K.V. Robust filter algorithms – survey and new results for ship navigation and conning systems. *Journal of Information Technologies and Computation Systems*. 2013;(4):90–112. (In Russ.)
19. Thornton C.L. *Triangular Covariance Factorizations for Kalman Filtering*. Ph.D. Thesis. University of California at Los Angeles; 1976.
20. Gao X.-S., Hou X.-R., Tang J., Cheng H.-F. Complete solution classification for the perspective-three-point problem. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2003;25(8):930–943. DOI: 10.1109/TPAMI.2003.1217599

Информация об авторе

Циоплиакис Николаос Илиас, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ntsioplakis@mail.ru.

Information about the author

Nikolaos I. Tsioplakis, Postgraduate student of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ntsioplakis@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 01.08.2024

The article was submitted 01.08.2024

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Original article

DOI: 10.14529/ctcr240405

A METHOD FOR THE NONLINEAR APPROXIMATION OF COMPLEX SHAPED CONVERSION FUNCTIONS

M.M. Isaev^{1, 2}, mezahir@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0515-5725>

M.H. Qurbanov¹, majidqurbanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-3792-218X>

L.S. Makhmudbeyli², leyla.shakaralieva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1218-3443>

S.A. Iskenderova³, isgandarova91@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4718-3512>

A.I. Quliyeva⁴, quliyeva.aide.57@mail.ru

¹ Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan

² Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, Baku, Azerbaijan

³ National Aviation Academy, Bina, Azerbaijan

⁴ Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan

Abstract. The aim of the study is to investigate the possibility of using the method and technique of piecewise nonlinear approximation for a highly accurate description (recognition) of the characteristics of the transformation of primary measuring devices (sensors), the transformation function (CF) of which has a rather complex form and a difficult to describe mathematical model. **Materials and methods.** The highly accurate description of this type of converter features provides for the division into nonlinear intervals over the entire measurement range. Each approximation interval forms a sequence falling between the extremum points of the considered CF and completely covers it. Besides, the third point between adjacent extremum points should be determined since it is the largest CF bending or turning point and allows expressing this approximation interval in the form of two different polynomials. Thus, each approximation interval is expressed in the form of two nonlinear functions – quadratic trinomials or cubic equations and is very close to the values of the real CF in this interval accurately describing the real CF. **Results.** The paper presents a developed hybrid test and structural measurement methods, as well as a relevant algorithm for implementing these measurement procedures. Test measurement methods use simple additive and multiplicative tests, as well as combinations of these tests – hybrid test measurements. Errors are automatically corrected or compensated to ensure high measurement accuracy. **Conclusion.** Unlike the known approximation methods, this approach accurately identifies the current states of the primary measuring instrument of the FP ensuring automatic calibration, and most effectively – the drift of the FP. Measurements at any time period are made relative to the value in which the sensor conversion feature is determined, which significantly improves measurement accuracy due to the intelligent information and measuring system based on structural and algorithmic-test measurement methods and its intelligent information support.

Keywords: measurements, improved accuracy, converter, conversion function, nonlinear approximation, test method

For citation: Isaev M.M., Qurbanov M.H., Makhmudbeyli L.S., Iskenderova S.A., Quliyeva A.I. A method for the nonlinear approximation of complex shaped conversion functions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):57–65. DOI: 10.14529/ctcr240405

Научная статья
УДК 171.317.39; 231.326.3
DOI: 10.14529/ctcr240405

МЕТОД НЕЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

М.М. Исаев^{1, 2}, mezahir@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0515-5725>

М.Г. Гурбанов¹, majidgurbanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-3792-218X>

Л.С. Махмудбейли², leyla.shakaralieva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-1218-3443>

С.А. Искендерова³, isgandarova91@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4718-3512>

А.И. Кулиева⁴, quliyeva.aide.57@mail.ru

¹ Институт систем управления, Баку, Азербайджан

² Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан

³ Национальная авиационная академия, Бина, Азербайджан

⁴ Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан

Аннотация. Целью исследования является изучение возможности применения метода и методики кусочно-нелинейной аппроксимации для высокоточного описания (распознавания) характеристик преобразования первичных измерительных приборов (датчиков), функция преобразования (ФП) которых имеет достаточно сложный вид и трудноописываемую математическую модель. **Материалы и методы.** Чтобы с высокой точностью описывать такой тип характеристик преобразователя, надо разбить на нелинейные интервалы весь диапазон измерений. Каждый интервал аппроксимации образует последовательность, располагаясь между точками экстремума рассматриваемой ФП, и полностью покрывает его. Также важно определить третью точку между соседними точками экстремума, потому что эта точка является самой большой точкой изгиба или поворота ФХ и позволяет выразить этот интервал аппроксимации в виде двух полиномов, отличающихся друг от друга. Таким образом, каждый интервал аппроксимации выражается в виде двух нелинейных функций – квадратных трехчленов или кубических уравнений – и очень близок к значениям реального ФП в этом интервале, описывая реальный ФП с большой точностью. **Результаты.** Для реализации вышеизложенного созданы гибридные тестовые и структурные методы измерений, а также соответствующий алгоритм реализации этих процедур измерений. При тестовых методах измерения используются простые аддитивные, мультипликативные и комбинации этих тестов – гибридные тестовые измерения, автоматически исправляются или автокомпенсируются погрешности и обеспечивается высокая точность измерений. **Заключение.** В отличие от известных методов аппроксимации, при таком подходе с высокой точностью идентифицируются текущие состояния первичного средства измерения (прибора) ФП, производится автоматическая калибровка, а самое эффективное – дрейф (перемещение) ФП. Поскольку измерения, выполняемые в любой момент времени, производятся относительно ситуации (значения), в которой определяется характеристика преобразования датчика, в результате точность измерения существенно увеличивается. Все это возможно благодаря интеллектуальной информационно-измерительной системе, построенной на основе структурных и алгоритмически-тестовых методов измерения, и ее интеллектуальному информационному обеспечению.

Ключевые слова: измерения, повышение точности, преобразователь, функция преобразования, нелинейная аппроксимация, тестовый метод

Для цитирования: A method for the nonlinear approximation of complex shaped conversion functions / M.M. Isaev, M.H. Qurbanov, L.S. Makhmudbeyli et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 57–65. DOI: 10.14529/ctcr240405

Introduction

High-quality production becomes a reality due to the complex automation of production processes (PP) and will depend on the class of the tailored automated information-measuring and control system, as well as the reliability and accuracy of the useful information obtained through the use of this system [1–4].

Priority is given to information and communication technologies (ICT), as well as high tech-based advanced automation elements and devices. Their complex integration and well-thought-out architecture ensure high efficiency [5, 6].

Conversion functions (CF) of measuring systems are nonlinear in reality, and this feature increases even more in operating conditions. Measurement errors occur in real measurements since the defined mathematical model of conversion features differs from its initial state, and the identification of conversion features becomes relevant. Many studies have covered this field and developed appropriate theoretical and practical methods [7–9].

High measurement accuracy of modern measuring systems can be achieved through the implementation of intelligent measurement procedures as opposed to classical methods, which can be highly effective. Numerous studies have been carried out and algorithmic test methods developed on the basis of our information-measuring systems (IMS) in real operating conditions have been successfully applied to improve measurement results [10].

Intelligent IMSs imply the introduction of intelligent electronic modules into the system structure [1]. The article proposes a different approach to test the process in the IMS in such a way as to obtain high measurement accuracy. The identification and evaluation of the results obtained through the use of nonlinear approximation are discussed below.

The measurement accuracy of the primary measuring system with nonlinear conversion features is improved due to structural and information redundancy and the selection of optimal tests, construction and solution of test equations [10].

1. Problem statement

In real operating conditions, the conversion functions (CF) of primary measuring instruments are complex and continuous. In many cases, the mathematical model (MM) of the conversion functions of the initial measuring system is set in the following polynomial form [10]:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i x^{i-1}. \quad (1)$$

The instability of the a_i parameters of the conversion function is known to reduce measurement accuracy. It was proposed to design IMSs based on the test measurement method to eliminate this effect. In equation (1), a_i are the coefficients of the conversion function, $i = \overline{0, \dots, n}$ assumes that the measurement operation is performed by adding n tests or n degrees of a polynomial [10].

Since they cannot be described mathematically, they should be approximated by a description in the form of piecewise nonlinear polynomials over the entire measurement range.

Each approximation range may be expressed by the lowest possible degree – quadratic or cubic polynomials for high measurement accuracy, without exceeding the measurement error of the set limit and operation simplicity.

2. Problem solution

Let us assume that the results of the measurement operation performed in a certain range consist of the following nonlinear graph (Fig. 1). The curve connecting the two extremum points inside each circle is described by a mathematical expression and can be obtained as a separate nonlinear function.

One of the main criteria for the test set optimality used to identify the nonlinear conversion functions of primary measuring systems is the minimum degree of the basic test equations (BTE) obtained during its implementation, as well as the minimum measurement error.

Below, we consider the nonlinear approximation of conversion functions and study the measurement error using the measurement method testing.

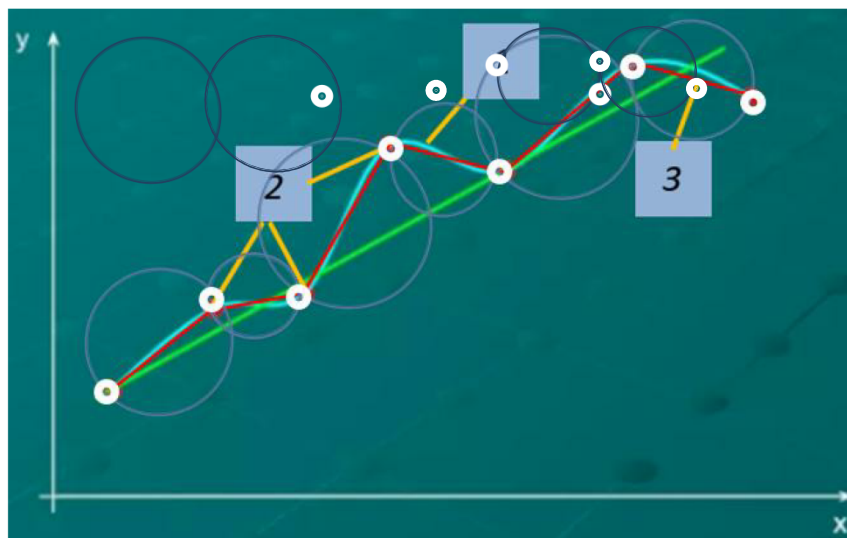


Fig. 1. Nonlinear approximation of complex shaped conversion functions: 1 is the conversion function (light blue); 2 is the extreme points of the conversion function (white); 3 is the piecewise linear approximation of the conversion function (red)

A comparative check of successive models competing with each other is carried out based on the F -criterion to make a better choice [11]:

$$F(m-n), [m-(n+1)] = \frac{\delta_{y_{n-1}}^2}{\delta_{y_n}^2}. \quad (2)$$

In this case, we check the assumption that the n -th order regression model describes the desired function value better than the $n-1$ order regression model. According to the formula, the obtained table values based on the F -criterion are selected by their significance level and compared with each other. If the value is higher than the corresponding table value, the assumption is accepted. In other words, a conclusion is made that it is advisable to use the n -level model, rather than $n-1$. Thus, all competing models can be sequentially tested.

The results of numerous tests show that, according to the description of the method for selecting a mathematical model of an approximating curve in the aforementioned conditions, the degree of the cubic or quadratic polynomial is taken to be equal to three, and the mathematical model of the dependence of the relative error on the measurement value will be described as follows [10]:

$$\delta = a_0 + a_1 \Delta x + a_2 \Delta x^2 + a_3 \Delta x^3, \quad (3)$$

wherein the measuring system error is reduced to Δx , not exceeding the permissible standard deviation limit.

Unlike the structural-algorithmic method, the use of θ additive, k multiplicative, and $\theta \cdot k$ hybrid tests as comparison standards in the measurement operation instead of a_0, a_1, a_2 and a_3 is predetermined by the accuracy of these tests.

Thus, the highly accurate identification of the curves of primary measuring system conversion functions is determined by the mathematical model of two curves between the extremum points of the conversion functions.

According to numerous studies, the use of the conversion functions of primary transmitters in the form of quadratic trinomials significantly simplifies approximation and reduces the number of measurement cycles. This method is considered to be more effective than the known methods [11–15].

Let us consider the following quadratic trinomial taken as an approximating curve:

$$y_0 = a_0 + a_1 x + a_2 x^2. \quad (4)$$

The x measurement value in the equation is input in a special algorithmic sequence to the primary measuring systems simultaneously with the additive ($x + \theta$), multiplicative (kx) and mixed ($kx + \theta$) tests, while the basic test equations (BTE) are as follows:

$$\begin{cases} y_0 = a_0 + a_1 x + a_2 x^2; \\ y_1 = a_0 + a_1 (x + \theta) + a_2 (x + \theta)^2; \\ y_2 = a_0 + a_1 (kx) + a_2 (kx)^2; \\ y_3 = a_0 + a_1 (kx + \theta) + a_2 (kx + \theta)^2, \end{cases} \quad (5)$$

where a_0, a_1, a_2 – the primary conversion feature measuring systems – are the nominal values of the quadratic trinomial coefficient in the relevant approximation ranges.

3. Device operating principle and error algorithm

Test equations (5) are implemented through the following device (Fig. 2):

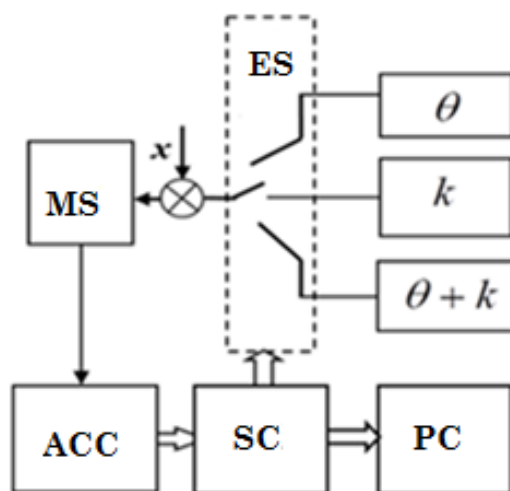


Fig. 2. Structural diagram of the measuring device: MS is the measuring system (converter); ACC is the analog-to-code converter, ES is the electronic switch; SC is the softcontroller, PC is the personal computer

The electronic switch (ES) alternately connects and disconnects the standards to the input of the measuring systems (MS) according to the measurement algorithm – BTE (5), and the measured x value is always connected to the input of the measuring systems and measured simultaneously with the standards – tests: $(x + \theta)$, (kx) , and $(kx + \theta)$. The results of all three measurement cycles are converted into a code via the analog-to-code converter (ACC) and transmitted to the softcontroller (PSC), processed on the PC, and finally, a conversion function (CF) is obtained by solving the BTE on the PC:

$$y_0 = \frac{[x(k-1) + \theta](y_1 - y_2) + [x(k-1) - \theta]y_3}{x(k-1) - \theta}. \quad (6)$$

The following expression is obtained based on the measurement results from (6) for calculating the measured value:

$$x_{cal} = \frac{(y_1 - y_2) + (y_0 - y_3)}{(y_0 - y_3) - (y_1 - y_2)} \cdot \frac{\theta}{k-1}. \quad (7)$$

The absolute error of the tested measuring systems will be determined by the following expression:

$$\Delta_T = [x(k-1) + \theta](\Delta_1 - \Delta_2) + [x(k-1) - \theta](\Delta_3 - \Delta_0). \quad (8)$$

If we take into account that the relative error of the test measuring system is determined by expression (8) and the value of the absolute error created by additive and multiplicative tests in each measurement cycle (MC) is replaceable, we can obtain the following expression for the error components generated in all cycles:

$$\Delta_T = \theta[\Delta_1 - \Delta_2 - (\Delta_3 - \Delta_0)] + x(k-1) \cdot [\Delta_1 - \Delta_2 + (\Delta_3 - \Delta_0)]. \quad (9)$$

The following expression is obtained for the absolute error Δ_{in} input to the tested measuring system:

$$\Delta_{in} = \frac{\Delta_T}{f'_T(x)}. \quad (10)$$

Here

$$f_T(x) = (y_0 - y_3)[x(k-1) - \theta] + (y_2 - y_1)[x(k-1) + \theta]. \quad (11)$$

Upon differentiation of $f'_T(x)$, the following expression is obtained:

$$f'_T(x) = (k-1)[(y_0 - y_3) - (y_1 - y_2)]. \quad (12)$$

Taking into account expressions (10), (9), and (11), the following expression is obtained for the absolute error input to the tested measuring system:

$$\Delta_{in} = \frac{\{\theta[(\Delta_1 - \Delta_2) - (\Delta_3 - \Delta_0)] + x(k-1)[\Delta_1 - \Delta_2 + (\Delta_3 - \Delta_0)]\}}{(1-k)2\theta\{b_1 + b_2[(k-1)x + \theta]\}}. \quad (13)$$

Thus, the following expression is obtained for the variance of the absolute error of the tested measuring systems independent of each other:

$$\sigma_{\Delta_T}^2 = \sigma_{\Delta_0}^2 [z - \theta]^2 + \theta_{\Delta_1}^2 [z + \theta]^2 + \sigma_{\Delta_2}^2 [z + \theta]^2 + \sigma_{\Delta_3}^2 [z - \theta]^2, \quad (14)$$

where σ_{Δ_i} is the measurement cycle of the corresponding standard deviation error.

As a result, we obtain the following formula for the absolute error input to the initial measuring system:

$$\Delta_{in-T} = \frac{\Delta_M}{k-1} - \frac{\Delta_\theta}{\theta}. \quad (15)$$

An important conclusion from expression (15) is that the components of the final error of the test measuring system Δ_{in-T} operating on the basis of the measurement algorithm (6) do not depend on the coefficients of the measuring system conversion function when implementing the optimal test set.

Errors Δ_θ and Δ_M are generally not intercorrelated, they are continuous random variables and obey the normal distribution law. Consequently, the relative error (δ_{in-T}) input to the test measuring system, in turn, is a continuous random variable characterized by the mathematical expectation (M_{δ_T}) and the variance ($\sigma_{\delta_T}^2$).

The mathematical expectation is determined by the following expression:

$$M_{\delta_T} = \frac{M[\Delta_M]}{k-1} - \frac{M[\Delta_\theta]}{\theta}, \quad (16)$$

where Δ_M and Δ_θ are the mathematical expectations of the random variables $M[\Delta_M]$ and $M[\Delta_\theta]$, respectively.

The variance $\sigma_{\delta_T}^2$ is determined by the following formula:

$$\sigma_{\delta_T}^2 = \frac{\sigma_{\Delta_M}^2}{(k-1)^2} + \frac{\sigma_{\Delta_\theta}^2}{\theta^2}, \quad (17)$$

where Δ_M and Δ_θ are the standard deviations of the random variables σ_{Δ_M} and σ_{Δ_θ} respectively.

Thus, when comparing the calculated values of the variances $\sigma_{[\delta_T]}^2$ and $\sigma_{[\delta_T^*]}^2$, it becomes clear that the resulting error components created in the test measuring system, implemented with the optimal combinations of additive, multiplicative, and hybrid tests with a variance, are less than the error in similar test measuring systems implemented through the use of simple additive and multiplicative tests. No additional time is needed when the test measuring system has quadratic-trinomial conversion features and solves basic test equations [10].

For instance, if we take a test set of $x, x + \theta_1, x + \theta_2$, the kx test for the full measurement cycle of the test measuring system will have output values according to $y_0, \dots, y_3$, and the following basic test equations will be obtained:

$$\begin{cases} y_0 = b_0 + b_1x + b_2x^2; \\ y_1 = b_0 + b_1(x + \theta_1) + b_2(x + \theta_1)^2; \\ y_2 = b_0 + b_1(x + \theta_2) + b_2(x + \theta_2)^2; \\ y_3 = b_0 + b_1kx + b_2(kx)^2. \end{cases} \quad (18)$$

If we take into account the errors caused by inaccurate measurement cycles of the tested measuring system, we obtain the following expressions:

$$\begin{aligned} \Delta_{T1} &= [b_2 + 2b_3(x + \theta_1)] \cdot \Delta_{\theta_1}; \\ \Delta_{T2} &= [b_2 + 2b_3(x + \theta_2)] \cdot \Delta_{\theta_2}; \\ \Delta_{T3} &= [b_2 + 2b_3kx] \cdot \Delta_M \cdot x. \end{aligned} \quad (19)$$

If the conversion feature of the test measuring system is presented in the form of the $n = 3$ degree polynomials, we obtain the following expression when writing the main test in the initial equations and solutions of the measuring system conversion:

$$y_0 = \frac{y_1x(k-1)\theta_2[x(k-1)-\theta_2] - y_2x(k-1)\theta_1[x(k-1)-\theta_1] + y_3\theta_2\theta_1(\theta_2 - \theta_1)}{[x(k-1)-\theta_1][x(k-1)-\theta_2](\theta_2 - \theta_1)}. \quad (20)$$

Thus, we obtain the following expression from expressions (19) and (20) for the absolute error of the test measuring system:

$$\begin{aligned} \Delta_T^* &= x(k-1)\theta_2[b_2 + 2b_3(x + \theta_1)][x(k-1)-\theta_2]\Delta_{\theta_1} - \\ &- x(k-1)\theta_1[b_2 + 2b_3(x + \theta_2)][x(k-1)-\theta_1]\Delta_{\theta_2} + \\ &+ x[b_2 + 2b_3kx]\theta_2\theta_1(\theta_2 - \theta_1)\Delta_M. \end{aligned} \quad (21)$$

According to expression (19), we obtain the following expression for the relative error input to the test measuring system:

$$\delta_{in}^* = \frac{[x(k-1)-\theta_2][b_2 + 2b_3(x + \theta_1)]}{(b_2 + 2b_3kx)(\theta_1 - \theta_2)} \cdot \frac{\Delta_{\theta_1}}{\theta_1} - \frac{[x(k-1)-\theta_1][b_2 + 2b_3(x + \theta_2)]}{(b_2 + 2b_3kx)(\theta_1 - \theta_2)} \cdot \frac{\Delta_{\theta_2}}{\theta_2} + \frac{\Delta_M}{k-1}. \quad (22)$$

We obtain the following expressions for the mathematical expectation and variance of the relative error of the test measuring system:

$$\begin{aligned} M[\delta_{in}^*] &= 0; \\ \sigma_{[\delta_{in}^*]}^2 &= \frac{[x(k-1)-\theta_2]^2 [b_2 + 2b_3(x + \theta_1)]^2}{(b_2 + 2b_3kx)^2 (\theta_1 - \theta_2)^2} \cdot \frac{\delta_{\Delta_{\theta_1}}^2}{\theta_1^2} + \\ &+ \frac{[x(k-1)-\theta_1]^2 [b_2 + 2b_3(x + \theta_2)]^2}{(b_2 + 2b_3kx)^2 (\theta_1 - \theta_2)^2} \cdot \frac{\delta_{\Delta_{\theta_2}}^2}{\theta_2^2} + \frac{\delta_{\Delta_M}^2}{(k-1)^2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Conclusion

Expressions (17) and (23) show that the accuracy of the value using the multiplicative tests and weighting coefficients of other components are equal in magnitude, and the measuring system does not depend on the parameters of conversion functions. When additive tests are used, their accuracy does not coincide, while weighting coefficients are qualitatively different. These two expressions demonstrate that even if the weighting coefficient in the first expression is equal to one, the coefficients in the second expression depend on the parameters of the conversion functions of the system measurements and the relationships between the values of additive and multiplicative tests. Thus, the aforesaid proves the advantage of the measurement method, when implementing both tests and their optimal set.

The article is recommended for publication by the program committee of the All-Russian Scientific Conference with International Participation “Digital Industry: Status and Development Prospects 2023”.

References

1. Tikhonov V.I., Kharisov V.N. *Statisticheskiiy analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems]. Moscow: Radio i svyaz'; 1991. 158 p. (In Russ.)
2. Fedorov Yu.N. *Spravochnik inzhenera po ASU TP: Proektirovanie i razrabotka: ucheb.-prakt. posobie* [Engineer's Handbook for Process Control Systems: Design and Development. Educational and practical guide]. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2008. 928 p. (In Russ.)
3. Kharazov V.G. *Integrirovannyye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Integrated control systems for technological processes]. St. Petersburg: Professiya; 2009. 592 p. (In Russ.)
4. Yakubovskaya E.S., Volkova E.S. (Compilers). *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: ucheb.-metod. posobie* [Automation of technological processes: educational and methodological manual]. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University; 2012. 132 p. (In Russ.)
5. Isaev M.M., Mahmudbeyli L.S., Khasayeva N.M. Development of an intelligent system for scanning the composition of a substance. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*. 2023;21(2):137–145. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-137-145
6. Ostroukh A.V. *Intellektual'nye sistemy: monogr.* [Intelligent systems: monograph]. Krasnoyarsk: Scientific and Innovation Center, 2020. 316 p. (In Russ.)
7. Butyrsky E.Yu. Method to approximations of the nonlinear dynamic system linear with variable parameter. *Nauchnoe priborostroenie*. 2013;23(2):89–98. (In Russ.)
8. Dem'yanovich Yu.K. *Lokal'naya approksimatsiya na mnogoobrazii i minimal'nye splayny* [Local approximation on manifold and minimal splines]. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ.; 1994. 356 p. (In Russ.)
9. *Metody approksimatsii kharakteristik nelineynykh preobrazovateley signalov: kusochno-lineynaya, polinomial'naya* [Methods for approximating the characteristics of nonlinear signal converters: piecewise linear, polynomial]. (In Russ.) Available at: <https://pue8.ru/svyaz-elektricheskaya/metody-approksimatsii-kharakteristik-nelineynykh-preobrazovateley-signalov.html>.
10. Isaev M.M. *Algoritmicheskiy testovyye metody povysheniya tochnosti izmeritel'nykh sistem: monogr.* [Algorithmic-test methods for increasing the accuracy of measuring systems: monograph]. Baku: Elm; 2018. 218 p. (In Russ.)
11. Strizhov V.V., Krymova E.A. *Metody vybora regressiionnykh modeley* [Methods for selecting regression models]. Moscow: Computer Center of the RAS; 2010. 15 p. (In Russ.)
12. Brandt S. *Data analysis*. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 2003. 686 p. (In Russ.)
13. Verzhbitskiy V.M. *Chislennyye metody (lineynaya algebra i nelineynyye uravneniya)* [Numerical methods (linear algebra and nonlinear equations)]. Moscow: Vysshaya shkola; 2000. 221 p. (In Russ.)
14. Draper N., Smith H. *Applied regression analysis*. Transl. from Engl. Moscow: Williams Publishing House; 2007. (In Russ.)
15. Kraskevich V.E., Zelenskiy K.Kh., Grechko V.N. *Chislennyye metody v inzhenernykh issledovaniyakh* [Numerical methods in engineering research]. Kyiv; 1986. 255 p. (In Russ.)

Список литературы

1. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 158 с.
2. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУ ТП: Проектирование и разработка: учеб.-практ. пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2008. 928 с.
3. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009. 592 с.
4. Автоматизация технологических процессов: учеб.-метод. пособие / сост.: Е.С. Якубовская, Е.С. Волкова. Минск: БГАТУ, 2012. 132 с.
5. Исаев М.М., Махмудбейли Л.С., Хасаева Н.М. Разработка интеллектуальной системы сканирования состава вещества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21, № 2. С. 137–145. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-2-137-145

6. Остроух А.В. Интеллектуальные системы: моногр. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. 316 с.
7. Бутырский Е.Ю. Метод аппроксимации нелинейной динамической системы линейной с переменными параметрами // Научное приборостроение. 2013. Т. 23, № 2. С. 89–98.
8. Демьянович Ю.К. Локальная аппроксимация на многообразии и минимальные сплайны. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. 356 с.
9. Методы аппроксимации характеристик нелинейных преобразователей сигналов: кусочно-линейная, полиномиальная. URL: <https://pue8.ru/svyaz-elektricheskaya/metody-approksimacii-karakteristik-nelinejnyx-preobrazovatelej-signalov.html>.
10. Исаев М.М. Алгоритмически-тестовые методы повышения точности измерительных систем: моногр. Баку: Элм, 2018. 218 с.
11. Стрижов В.В., Крымова Е.А. Методы выбора регрессионных моделей. М.: ВЦ РАН, 2010. 15 с.
12. Брандт З. Анализ данных: пер. с англ. М.: Мир, 2003. 686 с.
13. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения). М.: Высшая школа, 2000. 221 с.
14. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2007.
15. Краскевич В.Е., Зеленский К.Х., Гречко В.Н. Численные методы в инженерных исследованиях. Киев, 1986. 255 с.

Information about the authors

Mazahir M. Isaev, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Intelligent Information and Measuring Systems, Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan; Prof. of the Department of Information Technologies and Systems, Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, Baku, Azerbaijan; mezahir@bk.ru.

Madjid H. Qurbanov, Doctoral student, Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan; majidqurbanov@gmail.com.

Leyla S. Mahmudbeyli, Doctoral student, Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, Baku, Azerbaijan; leyla.shakaralieva@gmail.com.

Sevil A. Isgandarova, Dissertation student, National Aviation Academy, Bina, Azerbaijan; isgandarova91@gmail.com.

Aida I. Quliyeva, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan; quliyeva.aide.57@mail.ru.

Информация об авторах

Исаев Мазахир Мамедович, д-р техн. наук, заведующий лабораторией «Интеллектуальные информационно-измерительные системы», Институт систем управления, Баку, Азербайджан; проф. кафедры информационных технологий и систем, Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан; mezahir@bk.ru.

Гурбанов Маджид Гасанович, докторант, Институт систем управления, Баку, Азербайджан; majidqurbanov@gmail.com.

Махмудбейли Лейла Салыовна, докторант, Азербайджанский архитектурно-строительный университет, Баку, Азербайджан; leyla.shakaralieva@gmail.com.

Искендерова Севиль Афлатыновна, диссертант, Национальная авиационная академия, Бина, Азербайджан; isgandarova91@gmail.com.

Кулиева Аида Исмаиловна, канд. техн. наук, доц., Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан; quliyeva.aide.57@mail.ru.

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

The authors declare no conflicts of interests.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted 31.05.2024

Статья поступила в редакцию 31.05.2024

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

Научная статья

УДК 69.009

DOI: 10.14529/ctcr240406

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

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

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В настоящее время возрастает сложность строительных проектов, меняются условия их реализации, ужесточаются требования. При этом имеют место быть ошибки, зачастую очень значимые на различных стадиях жизненного цикла объекта капитального строительства. Соответственно, необходимы новые подходы и модели к управлению строительными проектами и объектами капитального строительства. **Цель исследования:** проанализировать возможности и перспективы применения научно-технического сопровождения (НТС) для объектов капитального строительства разных классов и на различных этапах их жизненного цикла. **Теоретико-методологической основой** исследования являются работы отечественных и зарубежных исследователей, посвящённые вопросам научно-технического сопровождения строительства и управления объектами капитального строительства на различных этапах их жизненного цикла. **Результаты.** В работе рассмотрена необходимость и целесообразность расширения применения научно-технического сопровождения (НТС) как в отношении объектов различных классов, так и в отношении стадий жизненного цикла объектов капитального строительства. В этой связи уточнено определение научно-технического сопровождения с учетом современных потребностей и возможностей. Отмечена важность и перспективность применения НТС для объектов капитального строительства, для которых оно обязательным не является. Систематизирован состав работ по НТС по различным классификационным признакам. Дана классификация объектов, для которых целесообразно использовать НТС. Даны разъяснения о возможностях НТС на различных этапах жизненного цикла объекта капитального строительства. В частности, о создании и применении, сопровождении виртуальных моделей (цифровых двойников, теней, моделей) в рамках НТС. Предложено рассматривать НТС и для повышения эффективности управления объектами капитального строительства на различных этапах жизненного цикла. Выполнен SWOT-анализ для НТС, в ходе которого выявлены преимущества и недостатки проведения НТС для объектов капитального строительства на разных этапах жизненного цикла, обозначены возможности и угрозы для реализации НТС в настоящее время. **Заключение.** Сделан вывод о целесообразности применения НТС на различных этапах жизненного цикла объектов капитального строительства разных классов не только для обеспечения качества, надежности и безопасности объектов капитального строительства, но и для повышения эффективности управления и, как следствие, экономической эффективности объектов, оптимального раскрытия и использования потенциала.

Ключевые слова: управление, научно-техническое сопровождение строительства, цифровизация, виртуальные модели, эффективность

Для цитирования: Аверина Т.А. Научно-техническое сопровождение при управлении жизненным циклом объектов капитального строительства // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 66–79. DOI: 10.14529/ctcr240406

SCIENTIFIC AND TECHNICAL SUPPORT IN LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CAPITAL CONSTRUCTION PROJECTS

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

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. Currently, the complexity of construction projects is increasing, the conditions for their implementation are changing, and the requirements are becoming more stringent. At the same time, errors occur, often very significant at various stages of the life cycle of a capital construction project. Accordingly, new approaches and models are needed to manage construction projects and capital construction projects. **The research objective** is to analyze the possibilities and prospects for the use of scientific and technical support (STS) for capital construction projects of various classes and at different stages of their life cycle. **The theoretical and methodological basis of the study** is the work of domestic and foreign researchers devoted to the issues of scientific and technical support for the construction and management of capital construction projects at various stages of their life cycle. **Results.** The paper examines the need and feasibility of expanding the use of scientific and technical support (STS) both in relation to objects of various classes and in relation to the stages of the life cycle of capital construction projects. In this regard, the definition of scientific and technical support has been clarified, taking into account modern needs and capabilities. The importance and prospects of using scientific and technical support for capital construction projects are noted, for which it is not mandatory. Work on scientific and technological progress has been systematized according to various classification criteria. A classification of objects for which it is advisable to use STS is given. Explanations are given about the capabilities of scientific and technical support at various stages of the life cycle of a capital construction project. In particular, about the creation and application, support of virtual models (digital twins, shadows, models) within the framework of scientific and technical progress. It is proposed to consider scientific and technical developments to improve the management efficiency of capital construction projects at various stages of the life cycle. A SWOT analysis was performed for scientific and technical support, during which the advantages and disadvantages of carrying out STS for capital construction projects at different stages of the life cycle were identified, and opportunities and threats for the implementation of scientific and technical support at the present time were identified. **Conclusion.** A conclusion is made about the advisability of using scientific and technical support at various stages of the life cycle of capital construction projects, not only to ensure the quality, reliability and safety of capital construction projects, but also to improve management efficiency and, as a consequence, the economic efficiency of objects, optimal disclosure and use of the potential.

Keywords: management, scientific and technical support, digitalization, virtual models, efficiency

For citation: Averina T.A. Scientific and technical support in life cycle management of capital construction projects. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):66–79. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240406

Введение

Строительная отрасль является драйвером в развитии экономики страны, а следовательно, в условиях общих трендов на цифровое развитие процессы цифровой трансформации актуальны и для данной отрасли. BIM (ТИМ), CIM, искусственный интеллект, цифровые двойники, цифровые фабрики, роботы и дроны – это еще далеко не полный перечень цифровых решений для строительства. Грамотное их сочетание и управление несет в себе значительные возможности и перспективы [1–3]. Казалось бы, цифровые технологии имеют огромный потенциал и могут решить множество проблем строительной отрасли, но процесс их внедрения достаточно сложен, трудоемок и зачастую является очень затратным. И в настоящее время, несмотря на активное развитие технологий, имеет место быть значительное количество ошибок в строительных проектах. Ошибки возникают на всех этапах: при проведении изыскательных работ, при проектировании, при непосредственно строительно-монтажных работах и т. д. Согласно данным экспертов ГК «Городской центр экспертиз» (ГЦЭ) [4], собранным за период с августа 2022 по август 2023 г. причинами обрушений зданий являются: 38,1 % – нарушение условий эксплуатации (в том числе

сроков); 37,1 % – несоблюдение технологии проведения строительно-монтажных работ (в том числе правил техники безопасности); 18,1 % – ошибки при проектировании; 6,7 % – брак, низкое качество используемых строительных материалов.

Причин тому множество: недостаточный уровень квалификации специалистов, отсутствие необходимых профессиональных и цифровых компетенций работников, халатность, желание сделать «побыстрее и подешевле», недостаточный уровень контроля и т. д.

Одним из возможных решений видится научно-техническое сопровождение (НТС) строительства.

Цель исследования – проанализировать возможности и перспективы применения научно-технического сопровождения (НТС) для объектов капитального строительства различных классов и на разных этапах их жизненного цикла.

Сущность научно-технического сопровождения (НТС)

Рассмотрим само понятие «научно-техническое сопровождение строительства» (рис. 1).

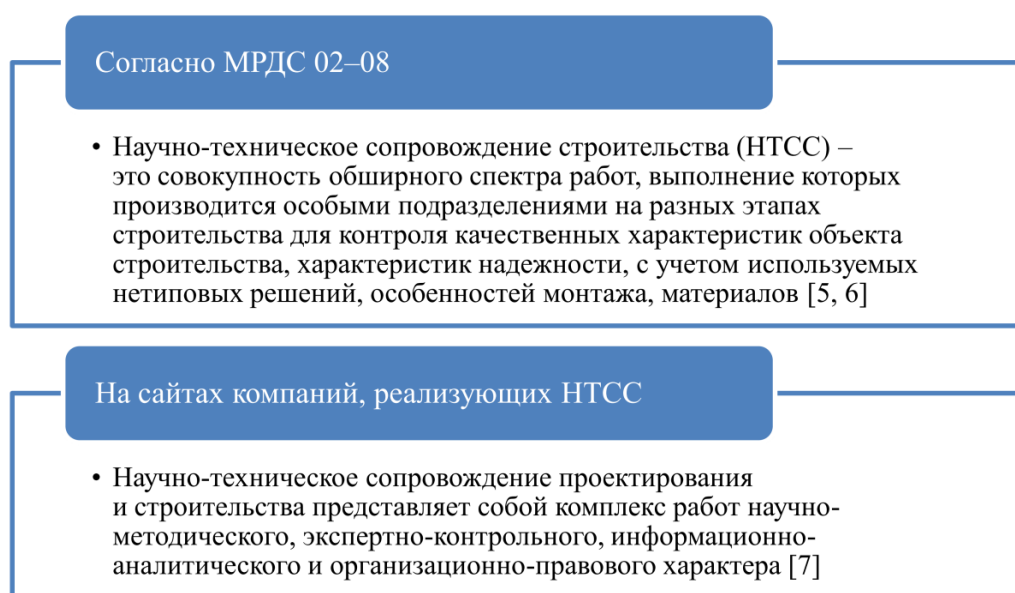


Рис. 1. Трактовка научно-технического сопровождения строительства (НТСС)
Fig. 1. Interpretation of scientific and technical support for construction (STSC)

Характер работ может несколько варьироваться в зависимости от специализации организации. Что касается определения целей НТС: в настоящее время встречаются как более краткие толкования, так и более развернутые (рис. 2).

Как видно из представленных на рис. 2 трактовок, основное внимание НТС направлено на обеспечение безопасности, качества, надежности объектов капитального строительства, что вполне естественно. Хотелось бы отметить, что есть смысл говорить и о повышении эффективности управления объектами капитального строительства на всех этапах жизненного цикла в рамках реализации НТС.

В данном случае под эффективностью управления в первую очередь подразумевается соотношение результатов и затрат, так как за счет грамотного НТС возможно в значительной степени сократить неконформные затраты (затраты на несоответствие).

Рассматривая сущность и перспективы НТС, необходимо отметить процесс цифровизации и те возможности, которые она привносит и в данную сферу.

Стоит отметить, что в соответствии со стратегией развития, принятой Минстроем, сфера строительства и ЖКХ должна претерпеть ряд преобразований, в основе которых – процессы цифровизации, а точнее, быть оцифрована полностью к 2030 году. Определённые шаги в этом направлении уже сделаны. Росстандарт установил стандарт, в котором закрепил общие положения для создания систем умного ЖК, следуя которым девелоперу нужно задумываться о цифровизации на более ранних этапах, как минимум на этапе проектирования всех систем [5–9].



Рис. 2. Цели НТС
Fig. 2. Objectives of scientific and technical support (STS)

Отметим, согласно пункту 5.7 ГОСТ Р 57363–2023 «Управление проектом в строительстве. Деятельность управляющего проектом (технического заказчика)» «уровень применения ТИМ определяется застройщиком, инвестором или техническим заказчиком, в зависимости от потребностей проекта, квалификации и компетенции команды проекта, интегрального показателя зрелости применения ТИМ» [9].

При этом с 1 июля 2024 года ТИМ для застройщиков стал обязательным на этапе проектирования. Согласно постановлениям правительства № 331 и № 2357, теперь все застройщики, работающие по 214-ФЗ, должны использовать ТИМ на стадии проектно-изыскательских работ при реализации объектов долевого строительства [10].

Уже появилось много работ о цифровых моделях, тенях, двойниках, характеризующих их возможности и потенциал использования. Принят национальный стандарт РФ ГОСТ Р 57700.37–2021 [11], в котором определен термин «цифровой двойник изделия», а также Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268-р «Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.» [12], в котором дано определение цифрового двойника объекта капитального строительства [13]. Их разработка, создание и использование также возможно и целесообразно в рамках НТС.

Таким образом, уточним определение НТС и его цель с учетом существующих потребностей и возможностей в настоящее время.

Под научно-техническим сопровождением будем понимать комплекс работ научно-методического, экспертно-контрольного, технического, информационного, аналитического и организационного характера, выполнение которых может производиться на любых (всех) стадиях жизненного цикла строительных объектов для контроля качественных характеристик объекта строительства, характеристик надежности, с учетом используемых нетиповых решений, материалов и информационных технологий и повышения эффективности работ на различных этапах жизненного цикла объекта капитального строительства.

Объекты НТС

Для особо опасных, технически сложных и уникальных объектов – зданий класса повышенного уровня ответственности К-3 (их основные критерии представлены на рис. 3) – проведение ряда работ по НТС является обязательным. Они регламентированы в соответствующих нормативных документах [14] (рис. 4).

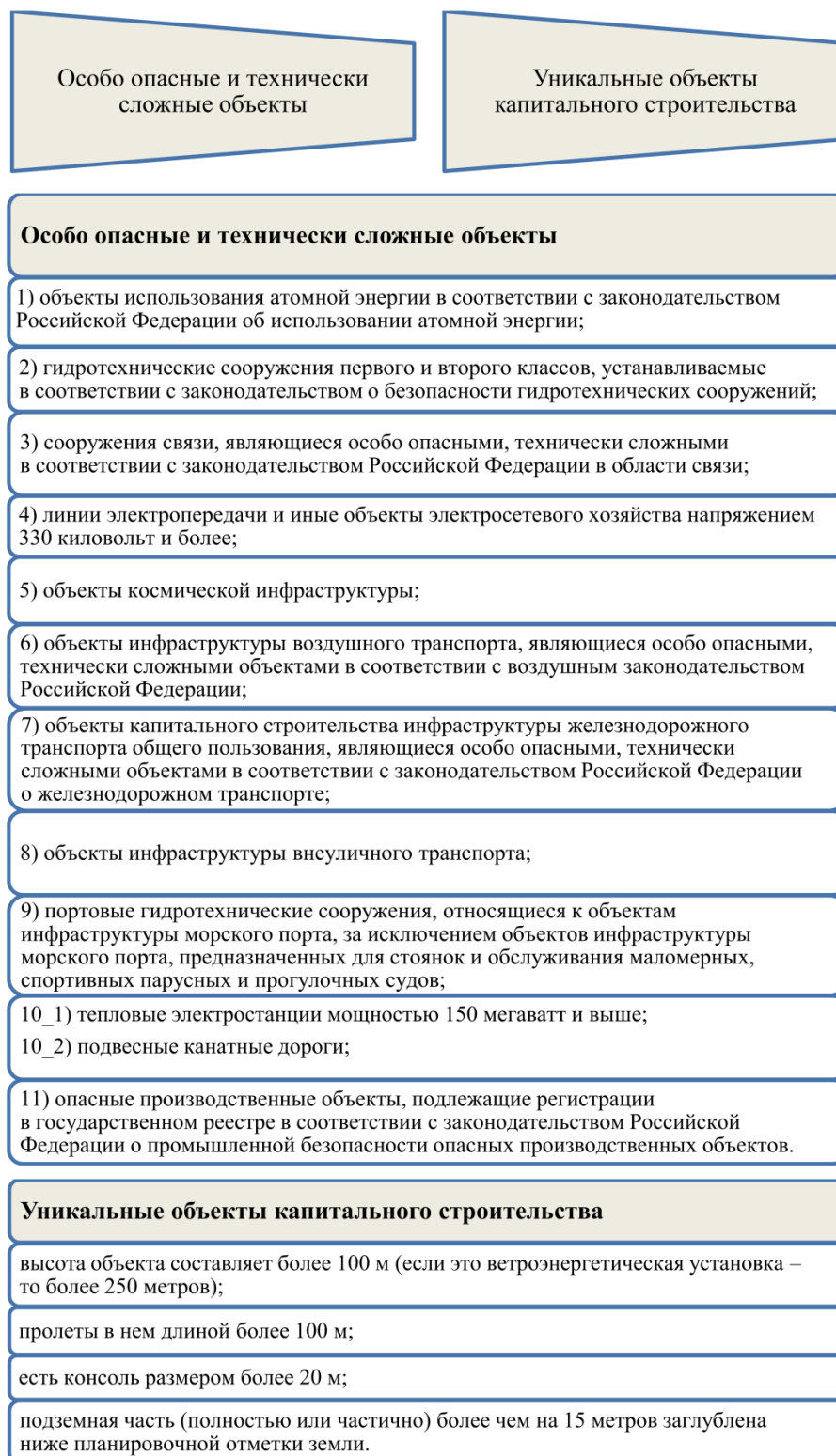


Рис. 3. Класс сооружений К-3
Fig. 3. Class of structures K-3

Федеральный закон N 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»;

Межгосударственный стандарт ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»;

СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»;

СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»;

СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений»;

СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы»;

СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные»;

СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»;

МРДС 02-08 «Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных»;

СП XX.XXXXXXXX.2021 (Проект) СВОД ПРАВИЛ «Научно-техническое сопровождение инженерных изысканий, проектирования и строительства зданий и сооружений. Основные положения».

Рис. 4. Нормативные документы по НТС
Fig. 4. Regulatory documents on STS

Но НТС целесообразно проводить и для объектов других классов, особенно если они расположены или работы реализуются в сложных условиях: природных, геологических, в условиях плотной городской застройки, являются объектами социокультурной инфраструктуры, объектами культурного наследия и пр.

Систематизируем объекты, для которых актуально и перспективно применение НТС в целом и виртуальных моделей в частности (табл. 1). Под виртуальными моделями будем подразумевать цифровые модели, цифровые тени и цифровые двойники [13].

Таблица 1

Классификация объектов капитального строительства с позиции НТС

Table 1

Classification of capital construction projects from the perspective of STS

Признак	Вид объекта	Пояснение
По завершенности	Построенные объекты	Объекты инфраструктуры при необходимости выполнения незапланированных задач (например в условиях СВО)
		Объекты инфраструктуры, имеющие долгий срок эксплуатации и построенные достаточно давно (когда не было современных технологий и расчеты не могли быть проведены)
		Объекты, находящиеся в сложных природно-климатических условиях
		Объекты, в силу различных обстоятельств в значительной степени подверженные внешним негативным факторам
		Объекты культурного наследия
	Новые объекты	Объекты класса К-3*
		Объекты инфраструктуры
		Военные объекты
		Типовые здания
По стадиям жизненного цикла	Инженерные изыскания	Объекты, находящиеся на стадии инженерных изысканий
	Проектирование	Объекты, находящиеся на стадии проектирования
	Строительство	Объекты, находящиеся на стадии строительства
	Эксплуатация	Объекты, находящиеся на стадии эксплуатации
	Реконструкция, капитальный ремонт	Объекты, перед реконструкцией, капитальным ремонтом
	Снос	Объекты, находящиеся на стадии сноса

* Выполнение НТС при проектировании объекта установлено частью 3 статьи 15 ФЗ № 384 от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и предусмотрено пп. 10.5, 12.4 ГОСТ 27751–2014.

Работы в рамках НТС

В настоящее время в России отсутствуют единые строгие нормы, регламентирующие последовательность, состав, содержание и объем НТС. О перечне работ по НТС на этапах инженерных изысканий, проектирования, строительства речь идет в СП 539.1325800.2024 Свод правил «Научно-техническое сопровождение инженерных изысканий, проектирования и строительства. Общие положения» [15].

При этом конкретный перечень работ определяется из специфики и особенностей каждого объекта отдельно. Состав и объем НТС изысканий и проектирования определяется техническим заданием и программой работ.

При изучении предложений организаций по НТС можно выделить два подхода к систематизации работ в рамках НТС.

По видам работ и по содержанию классификации представлены на рис. 5 и 6 (на основании [16]).

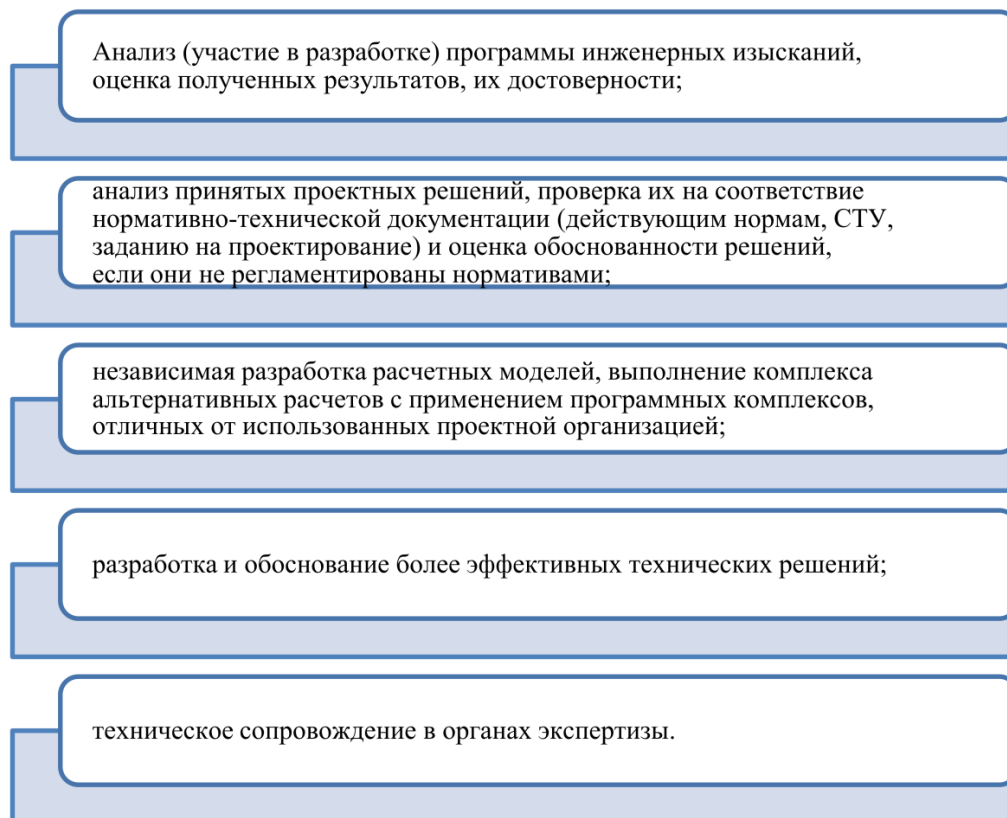


Рис. 5. Классификация работ НТС по содержанию
Fig. 5. Classification of STS works by content

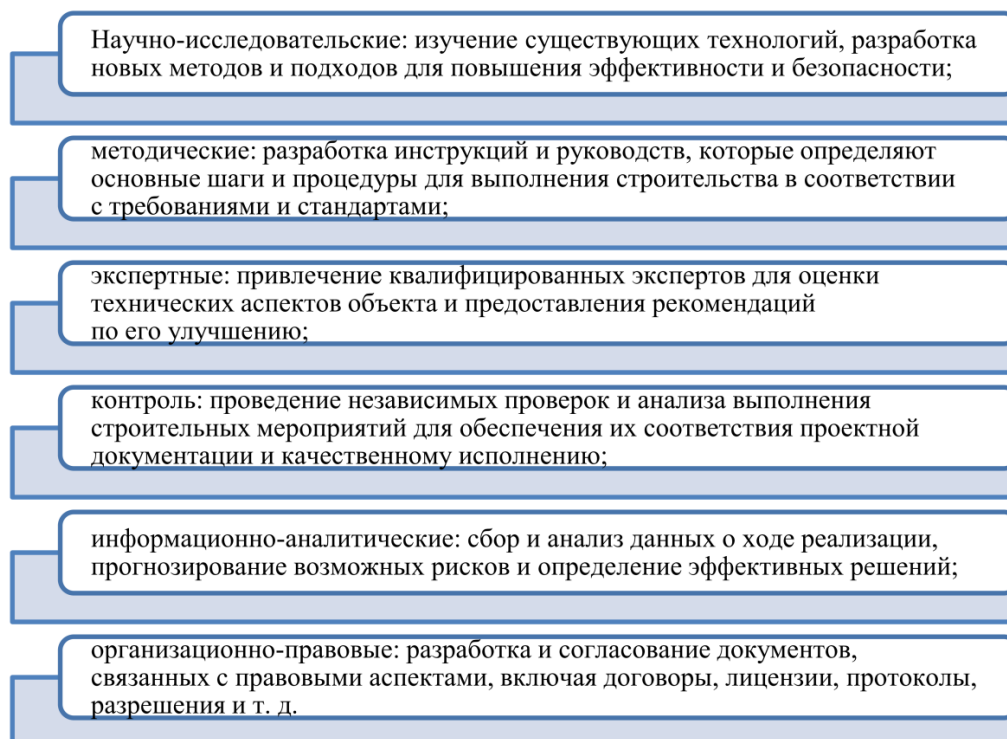


Рис. 6. Классификация работ НТС по видам работ
Fig. 6. Classification of STS works by type

Несколько иной подход представлен в работе [17]. Внимание сосредоточено на формировании перечня работ в рамках НТС проектных решений.

НТС на различных этапах жизненного цикла объектов капитального строительства

Согласно Федеральному закону от 30.12.2009 N 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», СП 333.1325800.2020 [18], «жизненный цикл здания или сооружения: период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения» [19] (рис. 7).



Рис. 7. Этапы жизненного цикла объекта капитального строительства
Fig. 7. Stages of the life cycle of a capital construction project

Основные цели НТС по этапам жизненного цикла представлены на рис. 8. Кроме того, НТС может проводиться в иных целях, установленных застройщиком либо уполномоченным застройщиком юридическим лицом (техническим заказчиком).

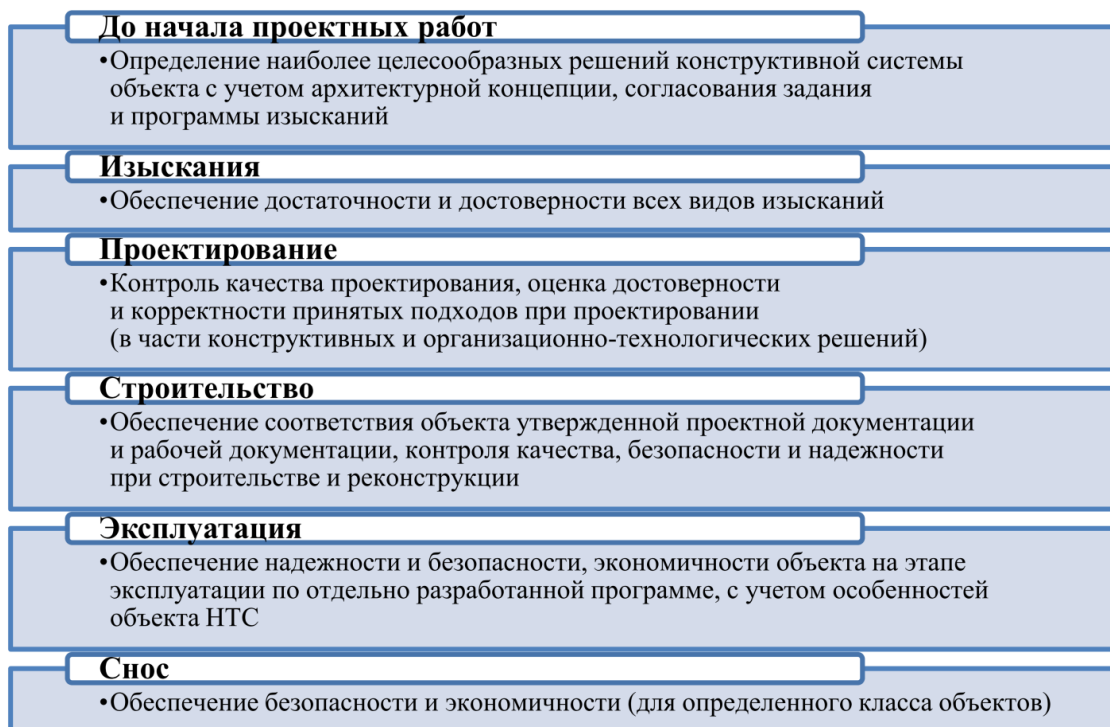


Рис. 8. Цели НТС по этапам жизненного цикла объекта капитального строительства
Fig. 8. STS goals by stages of the life cycle of a capital construction project (CCP)

Далее в табл. 2 представлены возможности использования цифровых решений – виртуальных моделей по этапам жизненного цикла.

Таблица 2

Создание и функционирование виртуальных моделей по этапам жизненного цикла ОКС

Table 2

Creation and operation of virtual models by stages of the CCP life cycle

Стадии жизненного цикла	Создание виртуальных моделей	Функционирование виртуальных моделей
Инженерные изыскания	Цифровая модель Цифровая тень Цифровой двойник	Цифровая модель
Проектирование	Цифровая модель Цифровая тень Цифровой двойник	Цифровая модель
Строительство	Цифровая тень Цифровой двойник	Цифровая тень
Эксплуатация	Цифровой двойник	Цифровая тень Цифровой двойник
Снос (демонтаж)		Цифровой двойник

При этом и при внедрении цифровых технологий необходим расчет показателей эффективности системы:

$$K_{ef} = \frac{P}{C_y},$$

где K_{ef} – обобщенный показатель эффективности системы – степень полезной отдачи от затрат; P – результат функционирования системы; C_y – величина затрат.

K_{pref} – целевая эффективность системы:

$$K_{pref} = \frac{PP_y + P^*(1 - P_y)}{P_f},$$

где P_y – вероятность выработки эффективного управляющего воздействия; P , P^* – результаты, вычисленные при условии выработки и невыработки эффективного управляющего воздействия соответственно; P_f – заданный результат, при котором достигается цель.

K_{fef} – функциональная эффективность:

$$K_{fef} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{yi}}{n},$$

где n – количество функций, возлагаемых на орган управления; P_{yi} – вероятность реализации органом управления i -й функции.

K_{eef} – экономическая эффективность:

$$K_{eef} = \frac{\Delta P S_r}{S_{su}},$$

где ΔP – приращение результатов; S_r – стоимость единицы результата; S_{su} – стоимость мероприятий по совершенствованию системы.

О возможностях применения искусственного интеллекта и мерах по экономическому стимулированию застройщиков для его применения говорили сенаторы, участвовавшие в сессии по цифровизации строительной отрасли и ЖКХ, которую провел Совет по развитию цифровой экономики при Совете Федерации. Было отмечено, что ИИ имеет большие перспективы для улучшения проектирования, управления строительством, безопасности и эксплуатации зданий [20].

В работе [21] представлена матрица участников процесса в различных этапах жизненного цикла объекта.

Видится перспективным расширение продолжительности сотрудничества с организацией, осуществляющей НТС (ячейки в таблицы выделены темным цветом в табл. 3), а именно на этапе эксплуатации и демонтажа.

На этапе разработки концепции также могут быть предложены работы, способствующие оптимальному выбору основных характеристик объекта для последующей экономии времени и средств.

Таблица 3

Матрица участников процесса на различных этапах жизненного цикла
объекта капитального строительства

Table 3

Matrix of process participants at various stages of the life cycle of a capital construction project

Участники	Концепция	Изыскания	Проектирование	Строительство	Эксплуатация	Снос (демонтаж)
Застройщик (заказчик)						
Технический заказчик						
Изыскатель						
Проектировщик						
Эксперт						
Организация, реализующая НТС						
Организация, реализующая строительство						
Строительный контроль						
Государственный надзор						
Государственные исполнительные органы						
Эксплуатирующая организация						

SWOT-анализ для НТС

Подводя итог, обобщим сильные и слабые стороны НТС, возможности и угрозы, используя SWOT-анализ (табл. 4).

Таблица 4

SWOT-анализ НТС

Table 4

SWOT analysis of STS

Возможности - Развитие информационных технологий - Развитие технологий для создания виртуальных моделей, в том числе цифровых двойников - Переход к «цифровому строительству» - Разрабатываются стандарты для некоторых аспектов цифровизации строительства (в частности умных домов) - Применение концепции бережливого производства в строительстве	Угрозы - Отсутствие нормативной базы для многих объектов строительства, необязательный характер ряда существующих нормативных документов - Необходимость обеспечения информационной безопасности - Низкий уровень цифровой грамотности - Сопrotивление новому - Стремление к дешевым услугам
Сильные стороны - Повышение качества - Повышение надежности - Повышение технической безопасности - Снижение рисков - Выбор оптимальных альтернатив для реализации (конструкций, материалов) - Отсутствие необоснованных расходов - Повышение уровня контроля - Возможность принятия обоснованных оперативных решений при необходимости - Проведение многих расчетов без выезда на объект - Повышение уровня безопасности работ - Возможность организации управления, мониторинга и контроля на всех этапах жизненного цикла - Расширение методологической базы - Научные разработки - Развитие стартапов - Превентивное управление	Слабые стороны - Необязательность для ряда объектов - Неопределенность состава услуг - Отсутствие проработанного состава работ и пакетных предложений в зависимости от объекта капитального строительства - Дополнительные затраты - Необходимость хороших информационных ресурсов (облачные хранилища и соответствующая техника) - Нехватка квалифицированных специалистов

Заключение

В итоге предполагается, что НТС позволит раскрыть и использовать потенциал системы наилучшим образом. В данном случае под системой подразумевается ОКС и соответствующая система управления, основанная на рекомендациях НТС и применении цифровых технологий. Система стремится к достижению наибольшего суммарного потенциала на каждом из этапов жизненного цикла.

Потенциал системы (R) может быть определен по формуле

$$R_j = \sum_{i=1}^n R_{ji} \rightarrow R_{\max},$$

где R_j – потенциал системы на j -м этапе жизненного цикла; R_{ji} – потенциал системы в i -й области на j -м этапе жизненного цикла; $R_{\max}$ – запланированные результаты по конкретным видам деятельности, выражается в запасах и резервах.

Таким образом, применение НТС помимо основополагающих аспектов по обеспечению качества, надежности и безопасности объектов капитального строительства позволит:

- с экономической точки зрения – получать наибольшую прибыль в будущем и минимизировать затраты в период строительства;
- с точки зрения организации – алгоритмизация процессов; рациональное сокращение многообразия – оптимизация выбора технологий и материалов; сокращение сроков путем параллельного выполнения работ, в частности некоторых этапов проектирования, экспертизы и строительства;
- с точки зрения управления – управление жизненным циклом объекта (PLM) – эффективное управление на всех стадиях жизненного цикла объекта капитального строительства.

Список литературы

1. Авдеева Е.А., Аверина Т.А., Бутырина Н.А. Информационные технологии – главный фактор ускорения экономического роста и глобального развития // Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк, 2021. С. 419–423.
2. Smart control mechanisms for industrial enterprises / V.N. Burkov, O.V. Loginovskiy, O.I. Dranko, A.V. Holloy // Applied Mathematics and Control Sciences. 2020. No. 1. P. 56–69.
3. Barkalov S.A., Averina T.A., Avdeeva E.A. Transformation of Organization Business Model in Conditions of Industry 5.0 // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk, Russian Federation, 2023. P. 499–503. DOI: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349670
4. Группа компаний «Городской центр экспертиз»: сайт. URL: <https://www.gce.ru/index.php/press-sluzhba/statistika-obrusheniy/> (дата обращения: 28.07.2024).
5. МРДС 02-08. Пособие по научно-техническому сопровождению и мониторингу строящихся зданий и сооружений, в том числе большепролетных, высотных и уникальных. Первая редакция. М., 2008.
6. Лапидус А.А. Научно-техническое сопровождение изысканий, проектирования и строительства как обязательный элемент достижения требуемых показателей проекта // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, вып. 11. С. 1428–1437. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1428-1437
7. АО «Научно-исследовательский центр «Строительство»: сайт. URL: https://www.cstroy.ru/scientific_technical/support (дата обращения: 20.06.2024).
8. Единый ресурс застройщиков: сайт. URL: <https://ерз.рф> (дата обращения: 10.07.2024).
9. ГОСТ Р 57363–2023. Управление проектом в строительстве. Деятельность управляющего проектом (технического заказчика). М.: Российский институт стандартизации, 2023.
10. Независимая площадка девелопмента России и СНГ «Все о стройке»: сайт. URL: <https://xn--b1agapfwagcl.xn--p1ai/s-1-ijulja-tim-dlja-zastrojshhikov-stal-objazatelnyim-na-jetape-proektirovaniya-o-tom-kak-idet-perehod-rasskazyvajut-developery-i-minstroj/> (дата обращения: 20.06.2024).
11. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
12. Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_430333/ (дата обращения: 20.01.2024).

13. Аверина Т.А. Виртуальные модели в управлении жизненным циклом объекта капитального строительства // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2024. С. 42–48.
14. ГЕОИЗОЛ Проект: сайт. URL: <https://geoizolproject.ru/proektirovanie-i-izyskanija/nauchno-tehnicheskoe-soprovozhdenie/> (дата обращения: 17.06.2024).
15. СП 539.1325800.2024. Свод правил «Научно-техническое сопровождение инженерных изысканий, проектирования и строительства. Общие положения».
16. SERCONS: сайт. URL: <https://www.serconsrus.ru/post/nauchno-tehnicheskoe-soprovozhdenie-proektov-stroitelstva/> (дата обращения: 17.06.2024).
17. Загорская А.В., Лapidус А.А. Научно-техническое сопровождение проектных решений по организации строительства уникальных объектов // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 6 (120). С. 41–47.
18. Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
19. СП 333.1325800.2020. Свод Правил «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла».
20. Минстрой России: сайт. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-sovete-federatsii-obsudili-primenenie-tehnologiy-iskusstvennogo-intellekta-v-stroitelstve/> (дата обращения: 01.07.2024).
21. Лapidус А.А. Строительство. Жизненный цикл, нормативы и участники. Цифровизация. М., 2021. URL: https://srooso.ru/upload/files/documents/lapidus_20092021.pdf.

References

1. Avdeeva E.A., Averina T.A., Butyrina N.A. [Information technology is the main factor in accelerating economic growth and global development]. In: *Modelirovanie i naukoemkie informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh: tr. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modeling and knowledge-intensive information technologies in technical and socio-economic systems: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference]. Novokuznetsk; 2021. P. 419–423. (In Russ.)
2. Burkov V.N., Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. Smart control mechanisms for industrial enterprises. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2020;(1):56–69.
3. Barkalov S.A., Averina T.A., Avdeeva E.A. Transformation of Organization Business Model in Conditions of Industry 5.0. *2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk, Russian Federation, 2023. P. 499–503. DOI: 10.1109/SUMMA60232.2023.10349670
4. *Gruppa kompaniy "Gorodskoy tsentr ekspertiz": sayt* [Group of companies "City Center of Expertise": website]. (In Russ.) Available at: <https://www.gce.ru/index.php/press-sluzhba/statistika-obrusheniy/> (accessed 28.07.2024).
5. *MRDS 02-08. Posobie po nauchno-tehnicheskomu soprovozhdeniyu i monitoringu stroya-shchikhsya zdaniy i sooruzheniy, v tom chisle bol'sheproletnykh, vysotnykh i unikal'nykh* [MRDS 02-08. Manual on scientific and technical support and monitoring of buildings and structures under construction, including large-span, high-rise and unique ones]. First edition, Moscow; 2008. (In Russ.)
6. Lapidus A.A. Scientific and technical support of survey, design, and construction as a mandatory element of attaining the required project objectives. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019;14(11):1428–1437. (In Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2019.11.1428-1437
7. *AO "Nauchno-issledovatel'skiy tsentr "Stroitel'stvo": sayt* [JSC Research Center Construction: website]. (In Russ.) Available at: https://www.cstroy.ru/scientific_technical/support (accessed 20.06.2024).
8. *Edinyy resurs zastroyshchikov: sayt* [Unified Resource of Developers: website]. (In Russ.) Available at: <https://ep3.pf> (accessed 10.07.2024).
9. *GOST R 57363–2023. Upravlenie proektom v stroitel'stve. Deyatel'nost' upravlyayushchego proektom (tekhnicheskogo zakazchika)* [State Standard R 57363–2023. Project Management in Construction. Activities of the Project Manager (Technical Customer)]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. (In Russ.)

10. *Nezavisimaya ploshchadka developmenta Rossii i SNG "Vse o stroyke": sayt* [Independent development platform of Russia and the CIS "All about construction": website]. (In Russ.) Available at: <https://xn--b1agapfwapgcl.xn--p1ai/s-1-ijulja-tim-dlja-zastrojshhikov-stal-objazatelnyim-na-jetape-proektirovaniya-o-tom-kak-idet-perehod-rasskazyvajut-developery-i-minstroy/> (accessed 20.06.2024).

11. *GOST R 57700.37–2021. Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdeliy. Obshchie polozheniya* [State Standard R 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions]. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russ.)

12. *Strategiya razvitiya stroitel'noy otrasli i zhilishchno-kommunal'nogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda s prognozom do 2035 goda* [Development strategy of the construction industry and housing and communal services of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2035]. (In Russ.) Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_430333/ (accessed 20.01.2024).

13. Averina T.A. *Virtual'nye modeli v upravlenii zhiznennym tsiklom ob"ekta kapital'nogo stroitel'stva* [Virtual models in life cycle management of a capital construction project]. In: *Informatsionnoe modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury: materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Information modeling in construction and architecture problems: Proceedings of the VII International scientific and practical conference]. St. Petersburg; 2024. P. 42–48. (In Russ.)

14. *GEOIZOL Proekt: sayt* [GEOIZOL Proekt: website]. (In Russ.) Available at: <https://geoizolproject.ru/proektirovanie-i-izyskaniya/nauchno-tehnicheskoe-soprovozhdenie/> (accessed 17.06.2024).

15. *SP 539.1325800.2024. Svod pravil "Nauchno-tehnicheskoe soprovozhdenie inzhenernykh izyskaniy, projektirovaniya i stroitel'stva. Obshchie polozheniya"* [SP 539.1325800.2024. Code of practice "Scientific and technical support of engineering surveys, design and construction. General Provisions"]. (In Russ.)

16. *SERCONS: sayt* [SERCONS: website]. (In Russ.) Available at: <https://www.serconsrus.ru/post/nauchno-tehnicheskoe-soprovozhdenie-proektov-stroitel'stva/> (accessed 17.06.2024).

17. Zagorskaya, A.V., Lapidus A.A. [Scientific and technical support for design solutions for organizing the construction of unique objects]. *Science and business: development ways*. 2021;6(120):41–47. (In Russ.)

18. *Federal'nyy zakon ot 30.12.2009 N 384-FZ (red. ot 02.07.2013) "Tekhnicheskii reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy"* [Federal Law of 30.12.2009 N 384-FZ (as amended on 02.07.2013) "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures"]. (In Russ.)

19. *SP 333.1325800.2020. Svod Pravil "Informatsionnoe modelirovanie v stroitel'stve. Pravila formirovaniya informatsionnoy modeli ob"ektov na razlichnykh stadiyakh zhiznennogo tsikla"* [SP 333.1325800.2020 Set of Rules "Information Modeling in Construction. Rules for the Formation of an Information Model of Objects at Various Stages of the Life Cycle"]. (In Russ.)

20. *Minstroy Rossii: sayt* [Ministry of Construction of Russia: website]. (In Russ.) Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-sovete-federatsii-obsudili-primenenie-tekhnologiy-iskusstvennogo-intellekta-v-stroitel'stve/> (accessed 01.07.2024).

21. Lapidus A.A. *Stroitel'stvo. Zhiznennyy tsikl, normativy i uchastniki. Tsifrovizatsiya* [Construction. Life Cycle, Standards and Participants. Digitalization]. Moscow; 2021. (In Russ.) Available at: https://srooso.ru/upload/files/documents/lapidus_20092021.pdf.

Информация об авторе

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

Information about the author

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.

Статья поступила в редакцию 30.07.2024

The article was submitted 30.07.2024

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ БРЕНДА ЗАСТРОЙЩИКА

С.А. Федосеев, fsa@gelicon.biz, <https://orcid.org/0000-0002-1632-1461>
А.А. Минин, minin.anton96@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2693-9002>
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

Аннотация. Строительный рынок жилой недвижимости увеличивается в объемах, но при этом остается наиболее рискованной отраслью с точки зрения инвестиций за счет большого срока создания и реализации продукта. Важную роль в сокращении рисков застройщиков может сыграть бренд. Существует взаимосвязь между понятиями имидж, репутация, бренд и гудвилл. Следовательно, на бренд застройщика влияют его имидж и репутация. **Цель исследования:** необходимо определить подходы для оценки репутации застройщиков на региональных рынках жилой недвижимости с целью поддержания их бренда и, как следствие, конкурентоспособности на требуемом уровне. **Материалы и методы.** По аналогии с методом решения задачи выбора клиентом торгового центра предложен метод оценки уровня защищенности бренда застройщика, под которым понимается репутация застройщика относительно регионального рынка. Исходными данными для оценки уровня защищенности бренда застройщика служат отзывы потребителей в сети Интернет. При этом должны быть учтены индекс туманности Ганнинга отзывов о застройщике, средний объем слов в отзывах о застройщике, количества негативных отзывов о застройщике, общее количество отзывов о застройщике и степень конкурентности рынка жилой недвижимости в регионе. **Результаты.** В качестве демонстрационного примера использования предложенного метода оценки уровня защищенности бренда застройщика был смоделирован условный рынок, представленный 9 условными застройщиками. Для каждого застройщика были подобраны условные индивидуальные параметры и на их основе рассчитан уровень защищенности бренда застройщика. Проведен сравнительный анализ параметров и уровня защищенности бренда застройщиков. В частности, показано, какие параметры и их сочетания позитивно или негативно влияют на уровень защищенности бренда застройщика. **Заключение.** На основании результатов приведенного демонстрационного примера можно утверждать, что предложенный подход к определению уровня защищенности бренда застройщика в сети интернет, как минимум, не противоречит здравому смыслу и, как максимум, является релевантным и полезным инструментом для объективной оценки деловой репутации застройщика.

Ключевые слова: бренд, репутация, рынок жилой недвижимости, отзывы в сети интернет, уровень защищенности бренда застройщика

Для цитирования: Федосеев С.А., Минин А.А. Определение уровня защищенности бренда застройщика // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 80–88. DOI: 10.14529/ctcr240407

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240407

DETERMINING THE LEVEL OF PROTECTION OF A DEVELOPER'S BRAND

S.A. Fedoseev, fsa@gelicon.biz, <https://orcid.org/0000-0002-1632-1461>
A.A. Minin, minin.anton96@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2693-9002>
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract. The residential real estate construction market is increasing in volume but remains the most risky industry in terms of investment due to the long lead time for product creation and realization. Brand can play an important role in reducing the risk of real estate developers. There is a relationship between the concepts of image, reputation, brand and goodwill. Hence, a real estate developer's goodwill is affected

by its image and reputation. **Research Objective.** It is necessary to identify approaches for assessing the reputation of developers in regional residential real estate markets in order to maintain their brand and, consequently, competitiveness at the required level. **Materials and Methods.** By analogy with the method of solving the problem of choosing a shopping center by a client, we propose a method for assessing the level of protection of the developer's brand, which is understood as the reputation of the developer in relation to the regional market. Initial data for assessing the level of protection of the developer's brand are consumer reviews in the Internet. It should take into account the Ganning Nebula Index of reviews about the developer, the average volume of words in reviews about the developer, the number of negative reviews about the developer, the total number of reviews about the developer and the degree of competitiveness of the residential real estate market in the region. **Results.** As a demonstration example of using the proposed method of assessing the level of protection of the developer's brand, a conditional market represented by 9 conditional developers was modeled. For each developer conditional individual parameters were selected and on their basis the level of the developer's brand protection was calculated. A comparative analysis of parameters and the level of brand protection of real estate developers was carried out. In particular, it is shown which parameters and their combinations positively or negatively affect the level of brand protection of the developer. **Conclusion.** Based on the results of the given demonstration example, it can be stated that the proposed approach to determining the level of protection of the developer's brand in the Internet, at least, does not contradict common sense, and, at most, is a relevant and useful tool for an objective assessment of the developer's business reputation.

Keywords: brand, reputation, residential real estate market, reviews in the Internet, level of protection of the developer's brand

For citation: Fedoseev S.A., Minin A.A. Determining the level of protection of a developer's brand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2024;24(4):80–88. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240407

Введение

Строительный рынок жилой недвижимости в последние годы увеличился в объемах. В то же время строительный рынок остаётся наиболее рискованной отраслью с точки зрения инвестиций за счет большого срока создания и реализации продукта. Важную роль в сокращении рисков застройщиков может сыграть бренд.

Бренд – это торговая марка, которой соответствует комбинация атрибутов, свойств, передаваемых посредством только лишь имени, или символа, или их различных сочетаний, которые влияют на мыслительный процесс в голове потребителей и создают особую ценность знака. Под брендом компания продает свои товары или услуги [1].

Бренд с точки зрения потребителя – это имиджевая составляющая товара или услуги, характеризующая определенную систему жизненных ценностей, которая формирует дифференцирующий эмоциональный образ, а также является показателем знака качества [2].

Коммуникационная архитектура бренда – это набор коммуникационных сообщений, разработанных на основе архитектуры бренда, которые доносятся потребителю любыми возможными способами [3].

Ценность бренда заключается именно в том, что при встрече с ним подсознательно потребитель получает как бы «обещание» того, что продукт окажется качественным (или нет), именно таким, каким он его себе представляет, а нужная услуга будет оказана [4, с. 304].

На рисунке представлена взаимосвязь понятий имидж, репутация, бренд и гудвилл [5, 6]. Из взаимосвязи можно сделать вывод, что на бренд компании влияют имидж и репутация. Если имидж формируется под воздействием СМИ, то репутацию формируют клиенты после взаимодействия с компанией. В качестве одного из таких способов влияния можно выделить отзывы в сети Интернет, прочитав которые, пользователь формирует мнение о компании и на основании которых пользователь принимает решение о взаимодействии с компанией.

О важности управления имиджем в строительной сфере говорится в работе [7]. В данной работе упоминается об актуальности грамотного управления брендингом в строительной отрасли, приводится большой литературный обзор по теме управления имиджем, упоминается о том, что позитивный бренд способен влиять на готовность конечного покупателя пользоваться услугами компании-бренда и более того – помогает компании получать большую прибыль в сравнении с нейтральным или отрицательным брендом.



Взаимосвязь бренда, имиджа, репутации и гудвилла
The relationship between brand, image, reputation and business reputation

1. Репутация застройщика на региональном рынке

В работе [8] предложен сравнительный метод оценки репутационных рисков застройщика и показано, что на репутационные риски застройщика наибольшее влияние оказывают репутация застройщика в сети Интернет.

Следует отметить, что репутация одного и того же застройщика в разных регионах может быть разной. Поэтому при оценке репутационных рисков застройщика необходимо учитывать регион, который можно рассматривать как замкнутую систему, так как репутацией застройщиков из других регионов в рассматриваемом регионе можно пренебречь.

Репутацию регионального рынка можно принять равной 1, так как клиент в целом относится к рынку нейтрально.

Кредит доверия клиента к застройщику может быть как выше рынка, т. е. более 1 (бренд хорошо защищен), так и ниже рынка, т. е. менее 1 (бренд плохо защищен).

Под *уровнем защищенности бренда* будем понимать репутацию застройщика относительно регионального рынка, формируемую в сети Интернет.

2. Оценка клиентом торгового центра

В работе [9] предложен метод решения задачи выбора клиентом торгового центра. В основу предложенного метода положена модифицированная формула Хаффа [10–14]

$$W = \alpha \cdot \frac{Q}{T}, \quad (1)$$

где W – ценность или привлекательность объекта; Q – качество объекта; T – время, потраченное покупателем на путь до объекта; α – константа, определяемая экспериментально (по аналогии с параметром μR в уравнении Менделеева – Клапейрона).

Традиционная формула, предложенная Хаффом, имеет вид

$$A_{ij} = \frac{S_j}{T_{ij}^\lambda},$$

где A_{ij} – привлекательность объекта j для покупателя i ; S_j – размер объекта j ; T_{ij}^λ – время, потраченное покупателем i на путь до объекта j ; λ – эмпирически определяемый параметр, отра-

жающий эффект влияния разных типов объектов на воспринимаемые временные затраты, потребительская привлекательность торгового объекта прямо пропорциональна размеру объекта и обратно пропорциональна расстоянию, которое должен преодолеть покупатель. Авторы работы [9] предлагают ввести новый параметр – качество объекта Q . Таким образом, ценность торгового центра прямо пропорциональна качеству объекта и обратно пропорциональна времени, которое потребитель затрачивает на дорогу до торгового центра. В работе не говорится о том, как вычислить качество торгового центра. Вероятнее всего, качество торгового центра стоит рассматривать как некую величину относительно величины качества всех торговых центров, действующих в городе. На основе формулы (1) можно сделать вывод о том, что при изменении качества объекта торгового центра, изменяется ценность торгового центра. Если учесть, что в городе есть конечное количество торговых центров, то улучшение ценности одного торгового центра приводит к снижению ценности других торговых центров и наоборот. Стоит отметить, что авторы работы [9] в итоге пренебрегают константой α . Можно предположить, что данная константа позволяет сравнивать привлекательность торговых центров друг относительно друга, если определить её значения экспериментально.

3. Оценка клиентом объекта жилой недвижимости

Если на потребительскую привлекательность торгового центра влияет время и качество, то покупатель объекта жилой недвижимости учитывает стоимость объекта, район, в котором строится объект, и класс жилья. Если в интересующем покупателя районе представлены сразу несколько объектов, примерно похожих по стоимости и классу, то покупатель начинает изучать отзывы о застройщике и/или объекте и, следовательно, обращает внимание на репутацию застройщика. Следует отметить, что в настоящее время размещение и изучение отзывов потребителями в абсолютном большинстве случаев осуществляется в сети Интернет. После прочтения отзывов клиент делает выбор в пользу застройщика, к которому больше доверия, а значит, выбирает застройщика с более хорошей репутацией. Таким образом, можно предположить, что отзывы способны влиять на покупателя. Измерять влияние отзывов на покупателей можно через следующие параметры:

- индекс туманности Ганнинга. В работе [15] автор исследует отзывы, сравнивая их с помощью индекса туманности Ганнинга. Стоит отметить, что индекс туманности Ганнинга свидетельствует об уровне удобочитаемости текста. Чем индекс выше, тем проще читать текст, а значит, такой текст более понятен клиенту и к такому отзыву больше доверия;
- количество слов в отзыве. Чем больше слов в отзыве, тем больше информации из него может получить клиент. Кроме того, чем больше времени клиент тратит на изучение информации об одном из застройщиков, тем меньше времени у него остается на изучение информации о других застройщиках. Большинство клиентов не могут позволить себе потратить много времени на обработку информации о всех компаниях. А это значит, что чем больший по объему отзыв читает клиент, тем меньше вероятность того, что у клиента останется время на изучение информации о других застройщиках, а значит, увеличивается вероятность выбора застройщика с большим количеством слов в отзывах;
- доля негативных отзывов о застройщике. Чем выше доля негативных отзывов у застройщика, тем меньше вероятность покупки объекта недвижимости у такого застройщика;
- степень конкурентности рынка. Чем больше в регионе представлено компаний застройщиков, тем больше отзывов формируется в регионе, а значит, повышается конкурентность рынка. Также на конкурентность рынка влияет уровень застройщиков в регионе. Например, если в регионе начинает работать крупный федеральный застройщик, то степень конкурентности рынка возрастает. Также на конкурентность рынка влияет и уровень цен в регионе. Чем выше цена, тем выше степень конкурентности, потому что больше компаний занимается девелоперской деятельностью. В табл. 1 приведен предположительный рейтинг степени конкретности рынка в различных регионах РФ в зависимости от стоимости квадратного метра и количества компаний, занимающихся девелоперской деятельностью. Данные получены из ресурсов¹.

¹ Realtymag: сайт. URL: <https://www.realtymag.ru/> (дата обращения: 06.06.2024).

Таблица 1

Рейтинг степени конкурентности рынка
Rating of the degree of market competitiveness

Table 1

№	Регион	Стоимость за м ²	Количество застройщиков
1	Москва	358 407	325
2	Свердловская область	131 754	180
3	Пермский край	100 466	86
4	Челябинская область	95 026	74

На основе анализа отзывов о застройщиках в сети Интернет можно отметить следующие вполне очевидные закономерности. Отзывы с одинаковым показателем туманности и содержащие примерно равное количества слов оказывают схожее влияние на потребителя. Объемный отзыв с высоким уровнем туманности оказывает большее влияние на принятие решения потребителем. При увеличении отношения негативных отзывов к общему числу отзывов при несущественном изменении среднего объема слов в отзывах и сохранения уровня туманности снижается доверие клиента к компании.

4. Метод оценки уровня защищенности бренда застройщика

Многообразие позитивных и негативных отзывов с определенным значением туманности и определенного объема формирует уровень защищенности бренда застройщика в сети Интернет, который по аналогии с формулой (1) может быть описан следующим образом:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T, \quad (2)$$

где T – уровень защищенности бренда застройщика, работающего в регионе; P – средний индекс туманности Ганнинга отзывов о застройщике, оставленных клиентами в регионе; V – средний объем слов в отзывах о застройщике, оставленных клиентами в регионе; m – количество негативных отзывов о застройщике, оставленных клиентами в регионе; M – общее количество отзывов о застройщике, оставленных клиентами в регионе; R – степень конкурентности рынка жилой недвижимости в регионе.

Выше было указано, что под уровнем защищенности бренда будем понимать репутацию застройщика в сети Интернет относительно регионального рынка. Это некий «кредит доверия», которым обладает застройщик перед покупателями. Прочитав отзывы, покупатель вероятнее всего выберет компанию с большим уровнем защищенности бренда, так как высокий уровень защищенности бренда способен дать большую гарантию по защите финансов, вложенных в объект недвижимости, чем низкий уровень защищенности бренда. Клиент, приобретающий объект жилой недвижимости, сталкивается с различными существенными рисками: объект будет сдан не в срок и/или будет некачественный, другие собственники недвижимости не будут схожи с ним по интересам и т. п. Если в отзывах потребитель находит факты, указывающие на вероятность реализации одного или нескольких рисков, то уровень доверия к такому застройщику снижается и наоборот.

Следует отметить, что репутация регионального рынка жилой недвижимости может быть принята равной 1, так как клиент, планирующий приобрести объект недвижимости в определенном регионе, к рынку данного региона в целом относится нейтрально. Тогда уровень защищенности бренда компаний можно представить в виде рейтинга относительно уровня защищенности бренда регионального рынка недвижимости (табл. 2).

Уровень защищенности бренда застройщика

Таблица 2

Table 2

Developer brand protection level

Описание	Значение
Сильно положительный	Более 1,3
Положительный	Более 1,1 до 1,3
Нейтрально положительный	Более 1 до 1,1
Нейтральный уровень	1
Нейтрально отрицательный	Менее 1 до 0,9
Отрицательный	Менее 0,9 до 0,7
Сильно отрицательный	Менее 0,7

Уровень защищенности бренда застройщика с учетом (2) может быть определен следующим образом:

$$T_{xy} = \frac{P_{xy} \cdot V_{xy}}{\frac{m_{xy}}{M_{xy}} \cdot R_y},$$

где T_{xy} – уровень защищенности бренда застройщика x , строящего в регионе y ; P_{xy} – средний индекс туманности Ганнинга отзывов о застройщике x , оставленных клиентами в регионе y ; V_{xy} – средний объем слов в отзывах о застройщике x , оставленных клиентами в регионе y ; m_{xy} – количество негативных отзывов о застройщике x , оставленных в регионе y ; M_{xy} – общее количество отзывов о застройщике x , оставленных в регионе y ; R_y – степень конкурентности рынка недвижимости в регионе y .

С учетом (2) степень конкурентности рынка недвижимости в регионе может быть определена экспериментально путем сбора всех отзывов о всех застройщиках в регионе:

$$R_y = \frac{P_y \cdot V_y}{\frac{m_y}{M_y} \cdot T_y},$$

где T_y – уровень защищенности бренда застройщиков в регионе y . С учетом сделанного выше замечания о том, что репутацию регионального рынка можно принять равной 1, так как клиент в целом относится к рынку нейтрально, $T_y = 1$; P_y – средний индекс туманности Ганнинга отзывов, оставленных клиентами о застройщиках в регионе y ; V_y – средний объем слов в отзывах, оставленных клиентами о застройщиках в регионе y ; m_y – количество негативных отзывов о застройщиках, оставленных в регионе y ; M_y – общее количество отзывов о застройщиках, оставленных в регионе y .

Следует отметить, что показатель R может быть использован для оценки стоимости гудвилла компании. При изучении влияния R на стоимость компании можно сделать вывод об инвестиционной привлекательности застройщика. В работах [5, 6] указано на то, что гудвилл компании должен иметь не только качественную оценку, но и стоимостную. Показатель R отображает качественную оценку всего рынка, а на основе соотношения уровня защищенности бренда застройщика к уровню защищенности бренда региона можно рассчитать добавочную стоимость бренда этого застройщика.

5. Демонстрационный пример

В качестве демонстрационного примера использования приведенных выше соотношений был смоделирован условный рынок, представленный 9 условными застройщиками. Для каждого застройщика были подобраны условные индивидуальные параметры. На основании этих параметров был определен уровень защищенности бренда для каждого застройщика, т. е. их деловая репутация (табл. 3).

Деловая репутация застройщиков (демонстрационный пример)

Таблица 3

Table 3

Business reputation of developers (demonstration example)

Застройщик	Рынок	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
Индекс туманности Ганнинга	10	10	12	11	12	5	6	10	12	13
Средний объем слов	57	50	35	60	60	50	80	60	60	60
Количество негативных отзывов	800	50	80	70	80	120	160	55	85	100
Количество отзывов всего	3000	300	120	450	240	300	560	330	380	320
Степень конкретности рынка	2146	2146	2146	2146	2146	2146	2146	2146	2146	2146
Доля негативных отзывов	0,267	0,167	0,667	0,156	0,333	0,400	0,286	0,167	0,224	0,313
Уровень защищенности бренда	1	1,398	0,294	1,977	1,007	0,291	0,783	1,678	1,500	1,163

Анализ результатов, представленных в табл. 3, позволяет отметить, в частности, следующее.

Для компании А принято, что отзывы имеют индекс туманности Ганнинга, равный рынку, среднее количество слов в отзывах меньше, чем среднее количество слов в отзывах присутствующих на рынке, но при этом доля негативных отзывов меньше, чем в среднем по рынку. Как следствие, компания А имеет репутацию лучше рынка, но хуже компании Ж.

У компании Ж одинаковая с компанией А доля негативных отзывов и туманность, но больше количество слов в отзывах.

У компании Г туманность и объем слов в отзывах выше, чем у компании Ж, но при этом больше доля негативных отзывов и, как следствие, уровень защищенности бренда у компании Г хуже, чем у компании Ж.

У компании И и Г примерно равные показатели среднего количества слов в отзывах и доли негативных отзывов, но туманность у компании И выше и уровень защищенности бренда у компании также выше.

У компании Б самая высокая концентрация негативных отзывов и самый маленький объем слов в отзывах, как следствие, у неё низкий уровень защищенности бренда.

У компании Д больший, чем у компании Б, объем слов в отзыве, но индекс туманности Ганнинга ниже, и, как следствие, компания Д тоже имеет низкий уровень защищенности бренда.

Компании Е и З имеют примерно равную долю негативных отзывов, и несмотря на то, что отзывы у компании Е имеют больший объем слов, у компании З уровень защищенности бренда существенно лучше благодаря высокому индексу туманности Ганнинга.

Компания В имеет самую низкую долю отрицательных отзывов, при этом объем слов в отзывах и индекс туманности Ганнинга находятся на достаточно высоких значениях и, как следствие, компания В имеет наибольший уровень защищенности бренда.

Заключение

Таким образом, на основании результатов приведенного демонстрационного примера можно утверждать, что предложенный подход к определению уровня защищенности бренда застройщика в сети Интернет, как минимум, не противоречит здравому смыслу и, как максимум, является релевантным и полезным инструментом для объективной оценки деловой репутации застройщика.

Планируется провести апробацию предложенного подхода на реальных данных нескольких регионов РФ.

Список литературы

1. Старов С.А. Бренд: понятие, сущность, эволюция // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. 2008. № 2. С. 3–39. EDN JUBTUZ.
2. Меркулов С.А. Коммуникационная архитектура бренда // Практический маркетинг. 2011. № 5 (171). С. 4–9.
3. Меркулов С.А. Новые виды маркетинга в современной экономике // Студенческий научный вестник (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Сборник научно-исследовательских работ студентов конкурса научных работ студентами университета. 2006. 3–28 апреля. Т. III. С. 81–82.
4. Котлер Ф., Келлер К.Л. Маркетинг. Менеджмент: пер. с англ. 12-е изд. СПб.: Питер, 2010. 816 с.
5. Гавришин К.В. Бренд как феномен виртуальных бизнес-коммуникаций // Маркетинговые стратегии и брендинг в предпринимательской деятельности: сб. ст. 20 молодых специалистов / под. ред. проф. Г.Л. Багиева. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003. С. 3–9.
6. Гавришин К.В. Брендинговая политика как фактор экономической безопасности // Актуальные проблемы и перспективы развития Северо-Запада: материалы науч.-практ. симпозиума молодых ученых и специалистов, 19.12.2005 г. СПб.: Изд-во ИМЦ «НВШ-СПб», 2006. С. 213–215.
7. Яковлева А.С., Тулеева Ю.Н. Управление имиджем архитектурно-строительной компании на рынке услуг дизайна интерьера // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 22. С. 1568–1573. EDN CPFMYX.
8. Minin A., Fedoseev S. Assessment of the Developer's Reputational Risk Level // 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. 292–295. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973974
9. Алексеев А.О., Спирина В.С., Кавиев М.И., Эрнст Н.А. Определение потребительской привлекательности объектов коммерческой недвижимости // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1 (4). С. 8–19. DOI: 10.21202/1993-047X.09.2015.1.209-217
10. Угаров А.С. Методы выбора местоположения торговой точки // Маркетинг в России и за рубежом. 2005. № 6. С. 99–108.
11. GIS for Retail Business. GIS Best Practices series. ESRI. Post at February, 2007. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esri.com/library/bestpractices/retailbusiness.pdf> (дата обращения: 20.12.2011).
12. Ela Dramowicz. Retail Trade Area Analysis Using the Huff Model. Post at July 2nd, 2005. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.directionsmag.com/articles/retailtrade-area-analysis-using-the-huff-model/123411> (дата обращения: 20.12.2011).
13. Huff D.L. Parameter Estimation in the Huff Model // ArcUser. Post at October-December, 2003. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.esri.com/news/arcuser/1003/files/huff.pdf> (дата обращения: 20.12.2011).
14. Huff DL. A Probabilistic Analysis of Shopping Center Trade Areas // Land Economics. 1963. Vol. 39, no. 1. P. 81–90. DOI: 10.2307/3144521
15. Плотников А.В., Кузнецов П.А. Gunning Fog-Index для оценки пользовательских отзывов в интернете // Московский экономический журнал. 2021. № 10. С. 481–497. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10608

References

1. Starov S.A. [Brand: concept, essence, evolution]. *Vestnik of Saint-Petersburg university. Management*. 2008;(2):3–39. (In Russ.) EDN JUBTUZ.
2. Merkulov S.A. Brand's communication architecture. *Practical marketing = Prakticheskiy marketing*. 2011;5(171):4–9. (In Russ.)
3. Merkulov S.A. [New types of marketing in the modern economy]. In: *Student Scientific Bulletin (Bauman Moscow State Technical University). Collection of research papers of students of the competition of scientific works by university students*. 2006. April 3–28. Vol. III. P. 81–82. (In Russ.)
4. Kotler F., Keller K.L. *Marketing. Management*. Transl. from Engl. 12th ed. St. Petersburg: Piter; 2010. 816 p. (In Russ.)

5. Gavrishin K.V. [Brand as a phenomenon of virtual business communications]. In: *Marketing strategies and branding in entrepreneurship: Collection of articles by 20 young specialists*. Ed. prof. G.L. Bagiev. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics and Finance Publ.; 2003. P. 3–9. (In Russ.)
6. Gavrishin K.V. [Branding policy as a factor of economic security]. In: *Actual problems and prospects for the development of the North-West: Materials of the scientific and practical symposium of young scientists and specialists, 12/19/2005*. St. Petersburg: IMC “NVSh-SPb” Publ.; 2006. P. 213–215. (In Russ.)
7. Yakovleva A.S., Tuleyeva Yu.N. [Image management of an architectural and construction company in the interior design services market]. *Innovations. Science. Education*. 2020;(22):1568–1573. (In Russ.) EDN CPFMYX.
8. Minin A., Fedoseev S. Assessment of the Developer’s Reputational Risk Level. 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. 292–295. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9973974
9. Alekseev A.O., Spirina V.S., Kaviev M.I., Ernst N.A. Evaluation of consumer appeal of commercial properties. *Izvestiya vuzov. Investitsiyi. Stroyitelstvo. Nedvizhimost*. 2013;1(4):8–19. (In Russ.) DOI: 10.21202/1993-047X.09.2015.1.209-217
10. Ugarov A.S. Methods for selecting the location of a retail outlet. *Marketing in Russia and Abroad*. 2005;(6):99–108. (In Russ.)
11. GIS for Retail Business. GIS Best Practices series. ESRI. Post at February, 2007. [Electronic resource]. Available at: <http://www.esri.com/library/bestpractices/retailbusiness.pdf> (accessed 20.12.2011).
12. Ela Dramowicz. Retail Trade Area Analysis Using the Huff Model. Post at July 2nd, 2005. [Electronic resource]. Available at: <http://www.directionsmag.com/articles/retailtrade-area-analysis-using-the-huff-model/123411> (accessed 20.12.2011).
13. Huff D.L. Parameter Estimation in the Huff Model. *ArcUser*. Post at October-December, 2003. [Electronic resource]. Available at: <http://www.esri.com/news/arcuser/1003/files/huff.pdf> (accessed 20.12.2011).
14. Huff DL. A Probabilistic Analysis of Shopping Center Trade Areas. *Land Economics*. 1963;39(1):81–90. DOI: 10.2307/3144521
15. Plotnikov A.V., Kuznetsov P.A. Gunning Fog-Index for evaluating user reviews on the internet. *Moscow Economic Journal*. 2021;(10):481–497. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10608

Информация об авторах

Федосеев Сергей Анатольевич, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; fsa@gelicon.biz.

Минин Антон Андреевич, аспирант кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия; minin.anton96@yandex.ru.

Information about the authors

Sergey A. Fedoseev, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; fsa@gelicon.biz.

Anton A. Minin, Postgraduate student of the Department of Computational Mathematics, Mechanics and Biomechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia; minin.anton96@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 22.06.2024

The article was submitted 22.06.2024

МОДЕЛИ ТЕОРИИ ГРАФОВ КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ (ЗАДАЧА О КЛИКЕ)

С.А. Баркалов, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

П.Н. Курочка, kpn55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>

Е.А. Серебрякова, sea-parish@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5129-246X>

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Востребованность методов теории графов при моделировании процесса управления социальными и экономическими системами обусловлена прежде всего удобством графического отображения сложных систем, что упрощает их анализ и понимание. При этом такое представление позволяет анализировать связи между различными элементами социальных и экономических систем, что дает возможность выявления ключевых факторов, оказывающих влияние на изучаемую систему. **Целью исследования** является рассмотрение возможности использования теории графов как инструмента для моделирования организационных систем на примере задачи о клике. **Методы.** Для решения поставленных задач предлагается использовать эвристические алгоритмы, основанные на использовании опыта и интуиции. В данном случае применяются эвристики, связанные с выбором элементов с наибольшим весом, или выбор элементов, покрывающих наибольшее количество элементов. Показан набор задач теории графов, имеющих алгоритмическую связь, то есть на базе алгоритмов решения одной из них можно получить решение и для целого ряда практически важных типов задач. Важность этого обстоятельства заключается в том, что эти задачи относятся к NP-полным, для решения которых отсутствуют действенные алгоритмы решения. **Результаты.** Приведена примерная схема применения задач теории графов как инструмента для анализа и оптимизации социальных и экономических систем, позволяющих выявить наиболее важные элементы системы, определить их взаимосвязи и оценить их влияние на общую структуру и функционирование. **Заключение.** В качестве базовой задачи, позволяющей решить несколько других практически важных проблем, предлагается использовать задачу о клике, решение которой позволяет это сделать. Основной проблемой в данном случае является получение информации о том, является ли полученный на очередном шаге граф кликой или же нет. Дается ответ на этот вопрос, что сильно упрощает процесс нахождения клики, а следовательно, и решения целого комплекса задач с использованием понятия дополнительного графа.

Ключевые слова: неориентированный граф, задача о наименьшем покрытии, клика, паросочетание, независимое множество вершин, полный граф, дополнительный граф

Для цитирования: Баркалов С.А., Курочка П.Н., Серебрякова Е.А. Модели теории графов как инструмент моделирования организационных систем (задача о клике) // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 89–102. DOI: 10.14529/ctcr240408

Original article
DOI: 10.14529/ctcr240408

MODELS OF GRAPH THEORY AS A TOOL FOR MODELING ORGANIZATIONAL SYSTEMS (CLIQUE PROBLEM)

S.A. Barkalov, sbarkalov@nm.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6183-3004>

P.N. Kurochka, kpn55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4945-9552>

E.A. Serebryakova, sea-parish@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5129-246X>

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The demand for graph theory methods in modeling the process of managing social and economic systems is primarily due to the convenience of graphical display of complex systems, which simplifies their analysis and understanding. At the same time, such a representation allows analyzing the connections between various elements of social and economic systems, which makes it possible to identify key factors that influence the system under study. **The aim of the study** is to consider the possibility of using graph theory as a tool for modeling organizational systems using the example of the clique problem. **Methods.** To solve the problems, it is proposed to use heuristic algorithms based on the use of experience and intuition. In this case, heuristics are used associated with the selection of elements with the greatest weight or the selection of elements covering the largest number of elements. A set of graph theory problems with an algorithmic connection is shown, that is, based on the algorithms for solving one of them, it is possible to obtain a solution for a number of practically important types of problems. The importance of this circumstance lies in the fact that these problems are NP-complete for solving, for which there are no effective solution algorithms. **Results.** An approximate scheme of application of graph theory problems as a tool for analysis and optimization of social and economic systems is given, allowing to identify the most important elements of the system, determine their interrelations and assess their impact on the overall structure and functioning. **Conclusion.** As a basic problem allowing to solve several other practically important problems, it is proposed to use the problem of a clique, the solution of which allows to do this. The main problem in this case is to obtain information about whether the graph obtained at the next step is a clique or not. An answer to this question is given, which greatly simplifies the process of finding a clique, and, therefore, solving a whole complex of problems using the concept of an additional graph.

Keywords: undirected graph, least covering problem, clique, matching, independent set of vertices, complete graph, additional graph

For citation: Barkalov S.A., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Models of graph theory as a tool for modeling organizational systems (clique problem). *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):89–102. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240408

Введение

В современном мире социальные и экономические системы становятся всё более сложными и взаимосвязанными. Для эффективного управления такими системами необходимо использовать передовые методы и подходы. Одним из таких подходов является применение моделей и методов теории графов [14, 15].

Проанализируем перспективы, демонстрируемые этим направлением применительно к задачам управления социальными и экономическими системами. Перспективность данной темы обусловлена необходимостью поиска новых методов и подходов к управлению сложными системами, которые могут обеспечить более конкурентоспособное и резистентное развитие. Использование моделей и методов теории графов дает возможность установить основополагающие составные части системы, оказывающие максимальное влияние на её работоспособность, и на базе этого спроектировать более эффективные стратегии управления.

Кластер задач, в которых могут быть использованы преимущества теории графов, профилируется композицией постановок задач, получивших название как задача о наименьшем покрытии (ЗНП) [14, 15]. В состав пула таких постановок входят: поиск наибольшего независимого множества вершин, поиск наибольшего паросочетания (наибольшее независимое множество рёбер), поиск наибольшего доминирующего множества вершин и рёбер, задача о клике.

Возможная корреляция вышеуказанных задач с другими проблемами теории графов приведена на рис. 1 [12].

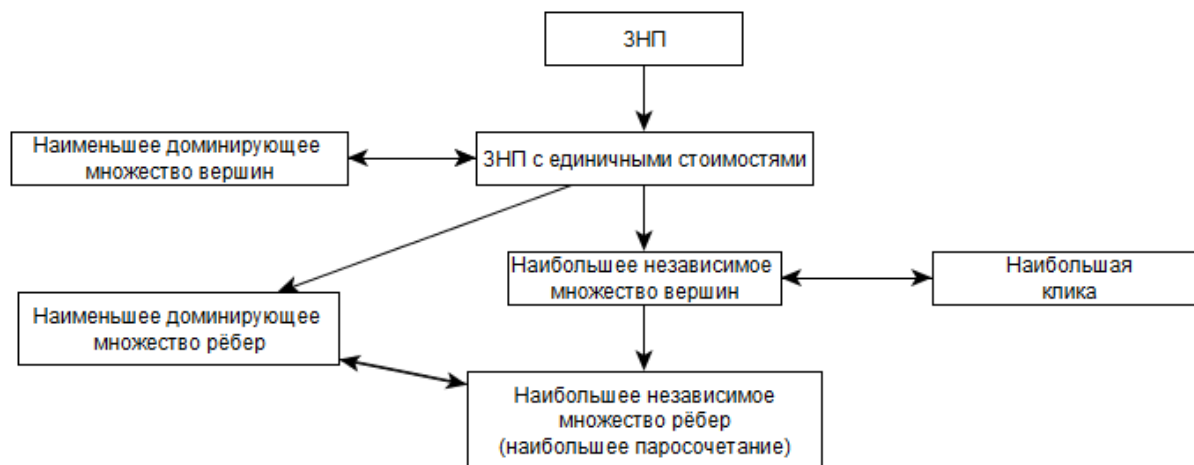


Рис. 1. Взаимосвязь между задачами теории графов [12]
Fig. 1. Relationship between graph theory problems [12]

Независимым множеством вершин графа называется любое множество попарно не смежных вершин, т. е. *множество вершин*, порождающее пустой *подграф*. Независимое множество называется *максимальным*, если оно не является собственным подмножеством другого независимого множества, и *наибольшим*, если оно содержит наибольшее количество вершин. Задача о независимом множестве состоит в нахождении наибольшего независимого множества [14, 15].

Клик графа называется множество вершин, порождающее полный *подграф*, т. е. *множество вершин*, каждые две из которых смежны. То есть клика является полным графом внутри исходного графа.

Паросочетание – это набор рёбер в двудольном графе, в котором ни одно ребро не имеет общей вершины с другим ребром. Наибольшее паросочетание – это паросочетание максимального размера [14, 15].

Вершинное покрытие графа – это такое *множество вершин*, что каждое *ребро* графа инцидентно хотя бы одной из этих вершин [14, 15].

Следовательно, указанные задачи имеют между собой алгоритмическую связь, то есть на базе алгоритмов решения одной из них можно получить решение и для остальных типов задач, как показано на рис. 1. Важность этого обстоятельства заключается в том, что эти задачи относятся к NP-полным, для решения которых пока отсутствуют действенные алгоритмы [6, 7, 9]. Тем не менее проектирование алгоритмов для подобных задач остается до сих пор востребованным, что объясняется их практической применимостью.

1. Методы

Обсудим потенциальные направления использования моделей и методов теории графов в вопросах управления социально-экономическими системами. При этом следует учитывать одно специфическое обстоятельство: анализируемые модели и методы тесно коррелированы между собой, что объясняется идентичностью областей применения. Это приводит к тому, что в некоторых случаях результаты могут дублироваться.

Рассмотрим возможные иллюстрации применения задачи о наибольшем независимом множестве [19].

Планирование проектов [2, 4]. При управлении проектами задача о наибольшем независимом множестве позволяет установить набор задач, которые могут выполняться параллельно, так как отсутствует технологическая зависимость между работами и конфликт при использовании ресурсов. Такая постановка вопроса приводит к возможности эффективного управления проектом.

Распределение ресурсов [3]. В распределении ресурсов задача о наибольшем независимом множестве позволяет найти оптимальное распределение ресурсов между различными задачами

или проектами. Это помогает избежать конфликтов и обеспечить эффективное использование ресурсов. Например, при распределении ресурсов типа «мощности», если необходимо разместить на строительной площадке несколько единиц строительной техники, допустим, подъемных кранов. При этом необходимо, чтобы каждый подъемный кран имел свою зону обслуживания и не мешал работе других. Для того чтобы успешно решить эту задачу, необходимо составить схему расположения техники в виде графа, где вершины – это возможные места расположения отдельных образцов техники, а ребра – возможные области обслуживания каждой из них. Необходимо выбрать вершины, попарно не соединенные ребрами. Это и есть задача о независимом множестве.

Сети связи. В сетях связи рассматриваемая задача интерпретируется как задача о размещении оборудования оператора связи с целью достижения экономии средств при выполнении требований к качеству связи. Самым простым случаем в данном примере является планирование размещения вышек мобильной связи, покрывающих некоторую область пространства.

Теория игр. Применение моделей и методов теории графов в задачах теории игр может заключаться в нахождении множества альтернативных стратегий игроков, которые при выборе будут исходить из полученного независимого множества, с целью максимизации получаемой выгоды.

Оптимизация маршрутов. Возникает при разработке оптимизации маршрутов и логистических цепочек, что дает возможность построить их так, чтобы избежать конфликтов и перегрузок.

Анализ данных [4, 8]. Задача о наибольшем независимом множестве также может быть применена для кластеризации данных. В социальных сетях данная задача может быть использована при кластеризации данных, то есть при их разделении на отдельные связанные общими свойствами группы (кластеры). Выделение таких кластеров дает возможность осуществить распараллеливание процесса вычислений, когда каждый кластер обрабатывается отдельным вспомогательным сервером.

Проектирование электронных схем. Данная задача по своей сути очень близка к задаче проектирования сетей связи.

Логистика [20]. Используется при разработке стратегии распределения товаров по складам и торговым точкам. Данный подход позволяет наладить эффективную работу проектируемой логистической сети.

Понятно, что был приведен лишь небольшой массив примеров практического использования задачи о наибольшем независимом множестве, являющейся одной из фундаментальных задач теории графов, имеющей множество практических приложений в различных областях.

Другим важным классом задач теории графов является задача о клике, представляющей собой подмножество вершин графа, такое, что каждые две вершины в этом множестве соединены ребром. Таким образом, требуется в заданном графе найти подмножества вершин, попарно соединенных ребрами.

Приведем наиболее широко используемые варианты применения задачи о клике [19].

Социальные сети. В этом случае рассматриваемая задача применяется с целью нахождения групп людей, тесно связанных друг с другом в социальной сети. Это может помочь в понимании структуры социальных связей и выявлении влиятельных людей в группе. В данном случае очень хорошо иллюстрирует особенности задачи о клике следующий пример: если Вы хотите организовать самую большую вечеринку для «своих» (то есть чтобы на вечеринке каждый знал каждого), то Вам необходимо решить задачу о максимальной клике. Обозначьте друзей вершинами, проведите ребро между двумя вершинами, если два этих друга знакомы, и решите задачу о максимальной клике.

Графы химических соединений. Для синтеза новых химических веществ очень удобно представить их молекулярную структуру в форме графа. В частности, в курсе органической химии такое представление используется уже давно, но вот задача о клике, применяемая для поиска подструктур молекул, которые могут быть особенно важными для их свойств, стала использоваться относительно недавно.

Сети коммуникаций. При проектировании коммуникационных сетей задача о клике позволяет выявить группы устройств, активно взаимодействующих друг с другом, изучить трафик и определить, нормальное ли количество ресурсов выделено для обслуживания этого направления.

Анализ данных. Задача о клике также может быть применена для кластеризации данных. В этом случае вершины графа представляют объекты, а ребра указывают на сходство между ними.

Если в этом графе есть клика, значит, есть такие пары узлов, которые могут быть связаны друг с другом разными путями и это при обработке данных может привести к заикливанию. В некоторых случаях это заикливание стараются избегать. Нахождение клик в таком графе позволяет выделить группы объектов с общими характеристиками.

Теория игр. В данном случае рассматриваемая возможность образования коалиций игроков с целью выработки стратегии, позволяющей максимизировать общий выигрыш коалиции

Оптимизация маршрутов [10, 11, 20]. Нахождение клик позволяет спроектировать возможные маршруты перемещения товарных потоков, проходящие через заданные пункты.

Биоинформатика. В этом случае понятие о клике позволяет осуществить процесс идентификации взаимодействий между молекулами белка. В этом случае вершины графа будут ассоциироваться с молекулами белка, а рёбра описывают взаимодействия между ними. Такое моделирование дает возможность выявить коалицию белковых молекул, взаимодействующих в общих биологических процессах.

Криптография. Нахождение клики в этом случае может служить основой для разработки криптографических схем, базирующихся на трудоемкости решения поставленной проблемы.

Планирование проектов. В этом случае задача о клике позволяет сформировать множество проблем, которые могут выполняться параллельно.

Маркетинг [10]. Использование понятия клики дает возможность описать структуру рынка, определить фундаментальных участников, схему их коммуникационного взаимодействия и оценить их доминирование в ходе формирования рыночной динамики.

Экономика [1, 5, 21]. В этом случае модели с использованием клик позволяют провести исследование конфигурации изучаемой экономической системы, направленной на идентификацию базовых направлений, интерпретацию их взаимосвязей и мониторинг их влияния на экономическое развитие.

Другой класс задач – это задачи о наибольшем паросочетании [14, 15]. Взаимосвязь между наибольшим паросочетанием и кликой заключается в том, что наибольшее паросочетание может применяться для нахождения клик в графе. Если мы рассмотрим граф как двудольный, где одна доля представляет собой вершины, а другая – рёбра, то можно найти наибольшее паросочетание в этом графе. Затем можно выделить все вершины, которые соответствуют рёбрам из паросочетания. Эти вершины образуют клику в исходном графе.

Следовательно, задачу о наибольшем паросочетании можно использовать как инструментальный для нахождения клик в графах. Тем не менее следует отметить, что далеко не всегда наибольшее паросочетание приводит к нахождению всех клик в графе, так как оно может не учитывать некоторые возможные комбинации вершин.

Рассмотрим возможные способы использования понятия паросочетаний в графе для решения практических задач [19].

Распределение ресурсов [10, 11]. Пусть есть несколько проектов, каждый из которых требует определённого количества ресурсов (например, людей, оборудования или материалов). Ресурсы ограничены, и каждый проект может использовать только часть доступных ресурсов. Необходимо распределить ресурсы между проектами таким образом, чтобы все проекты были выполнены максимально эффективно. Для этого можно построить двудольный граф, где вершины одной доли представляют проекты, а вершины другой доли – ресурсы. Затем можно найти максимальное паросочетание в этом графе, которое будет соответствовать оптимальному распределению ресурсов между проектами.

Планирование мероприятий [13]. В данном случае это частный случай задачи распределения ресурсов, предполагающий выполнение работ по подготовке и проведению различных общественных мероприятий типа конференций, для проведения которых в определенных временных границах требуются вполне конкретные ресурсы. Если таких мероприятий проводится достаточно много, то возникает риск возникновения конфликтов, когда одни и те же ресурсы одновременно требуются в разных местах. Эта ситуация приводит к необходимости разработки календаря мероприятий, позволяющего если и не ликвидировать конфликтные ситуации совсем, то по крайней мере их минимизировать. Достичь этого возможно, используя модели и методы теории графов. В частности в данном случае уместным будет применение алгоритмов нахождения паросочетаний в двудольном графе, когда первая доля графа будет описывать перечень мероприятий,

планируемых к проведению, а вторая – используемые ресурсы. В этом случае найденное максимальное паросочетание будет давать оптимальное расписание.

Размещение объектов [16, 17]. Данная задача может быть решена также при помощи алгоритмов теории графов как нахождение максимального паросочетания в двудольном графе. При этом все возможные ограничения могут быть учтены за счет построения исходной графовой модели. Например, запрещение на размещение каких-то типов объектов в каких-то областях. Такое ограничение традиционно вызывает затруднение в аналитическом представлении, но очень хорошо моделируется средствами теории графов. Построив граф, учитывающий исходные особенности задачи, получаем двудольный граф, где одна доля описывает предлагаемые к размещению объекты, а другая – потенциальные места размещения. Найденное максимальное паросочетание будет давать оптимальное решение исходной задачи.

Рассмотрим примерную схему применения задач теории графов как инструмента для анализа и оптимизации социальных и экономических систем, позволяющих выявить наиболее важные элементы системы, определить их взаимосвязи и оценить их влияние на общую структуру и функционирование.

Для выявления ключевых участников проекта, определения их взаимосвязей и оценки их влияния на успех проекта при помощи теории графов можно выполнить следующие шаги [19]:

- определить состав участников, привлекаемых для реализации проекта. Это могут быть люди, организации или другие участники, которые играют важную роль в проекте;
- построить граф проекта, в котором вершины графа будут представлять участников проекта, а рёбра – связи между ними;
- необходимо количественно оценить влияние каждого участника на успех проекта. Для этого можно использовать различные методы, например, экспертные оценки, анализ данных или моделирование;
- выявить ключевых участников проекта. Ключевыми участниками проекта будут те, кто оказывает наибольшее влияние на успех проекта;
- определить взаимосвязи между ключевыми участниками. Для этого нужно проанализировать граф проекта и выявить, какие участники связаны друг с другом;
- оценить влияние ключевых участников на успех проекта.

Разработать стратегию взаимодействия с ключевыми участниками. На основе результатов анализа можно определить, как лучше всего взаимодействовать с ключевыми участниками для обеспечения успеха проекта.

Предположим, что проект состоит из следующих участников [7, 18]:

Заказчик – организация, которая заказала проект. Руководитель проекта – человек, который отвечает за выполнение проекта. Команда проекта – группа людей, которые выполняют работу по проекту. Поставщики – организации, которые предоставляют материалы и услуги для проекта. Инвесторы – люди или организации, которые вкладывают деньги в проект.

Граф проекта может выглядеть следующим образом:

вершины: заказчик, руководитель проекта, команда проекта, поставщики, инвесторы;

рёбра: связь между заказчиком и руководителем проекта, связь между руководителем проекта и командой проекта, связь между командой проекта и поставщиками, связь между инвесторами и руководителем проекта.

Экспертное сообщество может насчитывать весьма значительное количество членов, и это сказывается на размерности исходных матриц, делая высокой вычислительную сложность рассматриваемой задачи. Естественно, возникает необходимость как-то понизить эту размерность. Вполне возможно для этой цели воспользоваться тем фактом, что граф, описывающий исходные состояния, скорее всего не предполагает, что все члены рассматриваемого сообщества будут контактировать друг с другом, поэтому в исходном графе будут существовать клики.

Если рассматривать проект, взаимодействия между работами которого задаются в виде графа, то было бы весьма полезно разбить этот граф на несколько составляющих, но так, чтобы связи между полученными частями были бы минимально необходимы, то есть выделить клики в этом графе, что позволяет осуществить декомпозицию исходной задачи на ряд более мелких задач.

Например, поиск в социальных сетях максимальной группы пользователей, все члены которой связаны общими интересами между собой.

Вместе с тем следует учитывать, что использование задачи о клике имеет свои противопоказания и трудности. Прежде всего это отражается на количественном описании модели, когда каждой дуге графа требуется приписать некую весовую характеристику, но получение таких характеристик достаточно часто представляет собой уже неординарную задачу. При этом необходимо иметь в виду, что задаваемые связи могут носить нечеткий характер, что выводит задачу совершенно на другой уровень сложности. Одновременно с этим остается открытым вопрос об описании динамики такой системы, так как основная часть алгоритмов предполагает, что исходный граф стационарен. Непраздным является вопрос об адекватном соответствии графовой модели реальному процессу.

И тем не менее невзирая на все сложности задача о клике остаётся перспективным аппаратом для исследования и контроллинга социально-экономических систем. Данный подход дает возможность сформировать общее представление о структуре системы, распознать фундаментальные компоненты и оценить их влияние. Вместе с тем с целью более углубленного изучения проблемы требуется применять более сложные методы и подходы.

В общем-то следует иметь в виду, что рассматриваемая задача теории графов относится к приоритетным сферам деятельности при разработке новых подходов к проблемам управления социальными и экономическими объектами и процессами. Данный подход может служить основой для конструирования более конструктивных концепций руководства процессом функционирования изучаемой системы на основе применения моделей исследования операций и повышения их резистентности.

2. Результаты

Следует напомнить, что полный граф – простой неориентированный граф, в котором каждая пара различных вершин инцидентна.

Утверждение 1. Если матрица смежности заполнена полностью, а на главной диагонали стоят нули, то такой граф будет являться полным и не имеющим петель.

Утверждение 2. Полный граф с n вершинами имеет $n(n - 1)/2$ рёбер.

Доказательство утверждения следует из определения полного графа: каждая вершина такого графа должна быть связана ребром со всеми оставшимися вершинами графа. Таким образом, для каждой вершины графа таких ребер будет $(n - 1)$. А учитывая, что в графе n ребер, то общее их количество будет определяться величиной $n(n - 1)/2$. На два выражение делится из-за того, что каждое ребро имеет две вершины, а следовательно, одно и то же ребро будет посчитано дважды: для начальной и для конечной вершины. Таким образом, максимально возможное число ребер в полном графе будет равно $n(n - 1)/2$. Понятно, что для такого графа матрица смежности будет заполнена всеми единицами, кроме главной диагонали.

Весьма интересным является вопрос о максимально возможной мощности получаемого подграфа. Ответ на этот вопрос дает следующее утверждение 3.

Утверждение 3. Максимальная мощность полного подграфа $|G'|$ будет равна наибольшей степени вершины, увеличенной на единицу, то есть $|G'| = \deg(v) + 1$.

Необходимо обратить внимание, что получили максимальную оценку, то есть верхнюю границу, в реальности мощность клики будет меньше.

Все известные алгоритмы нахождения клик всегда имеют основную проблему: в ходе работы алгоритма как определить, полученный граф на очередном шаге является кликой или же нет. Ответ на этот вопрос дает утверждение 2.

На основании этого утверждения возможен следующий подход к нахождению клики:

k -й шаг. Проводим подсчет ребер в исходном графе и проверяем соотношение $n(n - 1)/2$ рёбер, то есть не является ли исходный граф кликой. Если да, то конец алгоритма, если нет, то переходим к шагу 2.

$(k + 1)$ -й шаг. Выбирается вершина с наименьшим количеством ребер, и она удаляется из графа вместе с ребрами. Принимаем $n = n - 1$. Переходим к шагу k .

Основным недостатком данного алгоритма является тот факт, что он дает просто одну из клик, свойственных для исходного графа. Если граф имеет несколько клик, то найденная клика не обязательно будет иметь экстремальные свойства. Таким образом возникает задача нахождения всего множества клик и отбор из найденных клик, удовлетворяющих требуемым свойствам.

Но аналогичным недостатком обладают и основные алгоритмы поиска клик. Самым известным является алгоритм Брона – Кербоша, разработанный голландскими математиками Броном и Кербошем в 1973 году.

Алгоритм использует тот факт, что всякая клика в графе является его максимальным по включению полным подграфом. Начиная с одиночной вершины (образующей полный подграф), алгоритм на каждом шаге пытается увеличить уже построенный полный подграф, добавляя в него вершины из множества кандидатов. Высокая скорость обеспечивается отсечением при переборе вариантов, которые заведомо не приведут к построению клики, для чего используется дополнительное множество, в которое помещаются вершины, которые уже были использованы для увеличения полного подграфа.

Клика – это подмножество вершин графа, такое, что каждые две вершины в этом подмножестве соединены ребром.

Построим для данного графа (рис. 2) матрицу смежности, которая приведена в табл. 1.

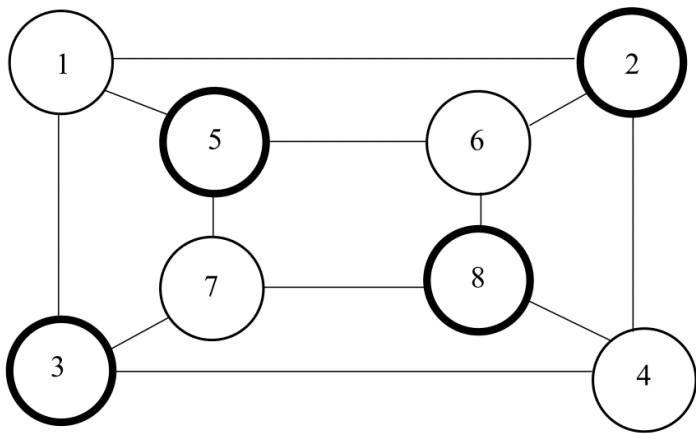


Рис. 2. Исходный граф для примера
Fig. 2. Source graph for example

Применим алгоритм.

1-й шаг. Проверяем, не является ли исходный заданный граф кликой. Для этого проверяем выполнение соотношения при $n = 8$; $8 \times 7/2 = 28$. Легко проверить, что в исходном графе имеется 12 дуг, то есть соотношение не выполняется и исходный граф кликой не является.

2-й шаг. Так как все степени вершин одинаковы и равны 3, то выбираем произвольную вершину, например, 1. Удаляем ее из графа вместе с инцидентными ей ребрами. В табл. 1 соответствующая строка, столбец и клетки таблицы – зачеркнуты. В графе остается 7 вершин и 9 дуг. Проверяем выполнение кликового условия: $7 \times 6/2 = 21$. Условие не выполняется. Подсчет дуг можно осуществлять по матрице смежности, суммируя часть строки от главной диагонали.

Исходные данные для примера и результат 2-го шага

Таблица 1

Initial data for the example and the result of the 2nd step

Table 1

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
I		1	1	0	1	0	0	0
II	1		0	1	0	1	0	0
III	1	0		1	0	0	1	0
IV	0	1	1		0	0	0	1
V	1	0	0	0		1	1	0
VI	0	1	0	0	1		0	1
VII	0	0	1	0	1	0		1
VIII	0	0	0	1	0	1	1	

3-й шаг. К этому шагу наименьшую степень имеют вершины 2 и 4. Выбираем 4. Удаляем ее и инцидентные ей дуги. 6 вершин и 6 дуг: $6 \times 5/2 = 15$, то есть условие для существования клики не выполняется. Результат шага приведен в табл. 1.

4-й шаг. К этому шагу наименьшую степень имеют вершины 2, 3, 6, 7. Выбираем 2. Удаляем ее и инцидентные ей дуги. Остается 5 вершин и 5 дуг: $5 \times 4/2 = 10$, то есть условие для существования клики не выполняется.

5-й шаг. К этому шагу наименьшую степень имеют вершины 6, 7. Выбираем 6. Удаляем ее и инцидентные ей дуги. Остается 3 вершины и 3 дуги: $3 \times 2/2 = 3$, то есть условие для существования клики не выполняется.

6-й шаг. К этому шагу наименьшую степень имеют вершины 5, 7. Выбираем 5. Удаляем ее и инцидентные ей дуги. Остается 3 вершины и 2 дуги: $2 \times 1/2 = 1$, то есть условие для существования клики не выполняется.

7-й шаг. Остается 2 вершины и 1 дуга. Проверяем выполнение кликового условия: $2 \times 1/2 = 1$, то есть условие для существования клики выполняется. Результаты приведены в табл. 2.

Исходные данные для примера после 7-го шага
Initial data for the example after step 7

Таблица 2

Table 2

	II	III	V	VI	VII	VIII
II		0	0	1	0	0
III	0		0	0	1	0
V	0	0		1	1	0
VI	1	0	1		0	1
VII	0	1	1	0		1
VIII	0	0	0	1	1	

Таким образом, мы нашли одну клику в исходном графе. Клика будет состоять из вершин 7 и 8. Мощность клики – два. Понятно, что клика в графе куба будет существовать не одна, так как каждая пара смежных вершин будет составлять клику, то есть в данном модельном примере решение достаточно очевидно. Но в общем случае однократное применение алгоритма дает только одну клику, причем совершенно произвольную. В данном примере все осложняется еще и тем, что в исходных данных все степени вершин одинаковы и выбор вершины для удаления осуществляется совершенно произвольно, так как нет возможности сформулировать правило отбора, в качестве которого обычно выступает минимальное значение степени вершины.

Полученный результат хорошо согласуется с теорией, согласно которой в графе куба (или гиперкуба) клика размером 1 состоит из одной вершины. Клика размером 2 состоит из двух вершин, которые являются концами одного ребра. Клики размером от 3 до n состоят из двух или более кликов размером $n - 1$, соединённых вместе.

Таким образом, клик всех возможных размеров в графе куба много. Известно, что размер наибольшей клики в графе куба равен $\sqrt{n}$, где n – количество вершин в кубе [13]. В частности, для куба с 8 вершинами, а это наш пример, (куб первого порядка) размер наибольшей клики равен 2 [13].

Достаточно простой алгоритм нахождения клики в графе очень важен, так как согласно рис. 1 это может служить основой для решения других задач теории графов. В частности, нахождения независимого множества, так как найденная клика будет соответствовать независимому множеству в дополнительном графе.

Граф, дополнительный к исходному графу $G = (V, E)$, характерен тем, что имеет то же самое множество вершин, а множество его ребер $E' = V \times V \setminus E$ состоит из всех ребер, не являющихся ребрами исходного графа G [13]. Это дает возможность построить следующий алгоритм нахождения дополнительного графа к исходному:

1-й шаг. Построить матрицу смежности для исходного графа.

2-й шаг. В матрице смежности заменить все единицы нулями, а нули единицами. Полученная матрица и будет являться матрицей смежности искомого графа, который является дополнительным к исходному.

Противоположное клике понятие – это независимое множество в том смысле, что каждая клика соответствует независимому множеству в дополнительном графе.

Приведем пример применения понятия наибольшего множества независимых вершин в графе для решения практических задач [11, 18, 19].

Планирование производства. Производство оснащено некоторым числом производственных линий, на которых может производить один или несколько видов продукции. Возникает задача определения номенклатуры выпускаемой продукции с целью обеспечения максимально возможной эффективности оборудования за счет уменьшения простоев и времени, необходимого для перенастройки линий. Это возможно осуществить, используя задачу теории графов о наибольшем множестве независимых вершин. Для этой цели строится графовая модель процесса, которая может быть представлена в виде двудольного графа, где вершины представляют виды планируемой к выпуску продукции, а рёбра – конфликты по ресурсам между продуктами. Оптимальным решением задачи будет являться наибольшее множество независимых вершин для двудольного графа.

Распределение задач между сотрудниками. Необходимо распределить объёмы работ между сотрудниками подразделения. Вполне понятно, что каждая задача требует для своего успешного выполнения от сотрудника определенных компетенций. Процесс распределения должен удовлетворять определенным требованиям: исключать дублирование и квалификация сотрудника должна соответствовать уровню поручаемой ему работы. С целью решения этой задачи необходимо построить графовую модель, в которой вершины соответствуют задачам, а рёбра – зависимостям между задачами. В качестве решения задачи принимается наибольшее множество независимых вершин, соответствующее набору задач, которые могут быть выполнены независимо друг от друга.

Оптимизация маршрутов доставки [20]. Требуется разработать план транспортного обслуживания, обеспечивающий процесс снабжения торговой сети поставками с центрального склада. В этом случае графовая модель будет описывать расположение пунктов доставки и расстояния между ними. Находя наибольшее независимое множество в построенном графе, можно получить оптимальные маршруты доставки.

Множество независимых рёбер также называют паросочетанием [16, 17]. Таким образом, алгоритм нахождения клик в графе открывает возможность нахождения еще наибольшего множества независимых вершин и паросочетаний в исходном графе.

Продолжим рассматриваемый пример. Для этого построим дополнительный граф к исходному, заданному в примере на рис. 2.

Используя алгоритм построения дополнительного графа к исходному, получим матрицу смежности, приведенную в табл. 3.

Матрица смежности для дополнительного графа

Таблица 3

Table 3

Adjacency matrix for complementary graph

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
I		0	0	1	0	1	1	1
II	0		1	0	1	0	1	1
III	0	1		0	1	1	0	1
IV	1	0	0		1	1	1	0
V	0	1	1	1		0	0	1
VI	1	0	1	1	0		1	0
VII	1	1	0	1	0	1		0
VIII	1	1	1	0	1	0	0	

По данным табл. 3 построим дополнительный к исходному граф, представленный на рис. 3.

Данный граф похож на двудольный, но не является таковым, так как имеются связи между вершинами в каждой доле: в первой доле – (1–4) и (2–3); во второй доле – (5–6) и (6–7).

Для определения наибольшего независимого множества необходимо найти клику в дополнительном графе, приведенном на рис. 3.

Для решения этой задачи воспользуемся приведенным выше алгоритмом.

Исходный граф имеет 8 вершин и 16 ребер. Проверка исходного графа на наличие клики приводит к заключению, что данный граф не является кликой. Согласно алгоритму выбирается вершина, имеющая наименьшую степень. Но в нашем случае все вершины будут иметь одинаковую степень, равную четырем, а поэтому можно выбрать любую произвольную вершину. В данном случае выбираем вершину 1 (на рис. 3 все удаленные на различных шагах вершины зачеркнуты). Последовательно, удаляя вершины 1, 6, 7, 4, за четыре шага приходим к тому, что в дополнительном графе будет существовать клика мощностью 4, в которую входят вершины 2, 3, 5, 8.

В исходном графе, приведенном на рис. 2, эти вершины будут составлять наибольшее независимое множество. Соответствующие вершины на рис. 2 выделены жирными линиями.

Согласно рис. 1, найдя наибольшее независимое множество вершин графа, для получения паросочетания можно использовать следующий алгоритм.

1. Найти наибольшее независимое множество вершин графа.
2. Для каждой вершины из этого множества найти все рёбра, которые инцидентны этой вершине.
3. Выбрать ребро с наименьшим весом (если веса не заданы, то можно выбрать любое ребро).
4. Удалить выбранное ребро и все инцидентные ему вершины из графа.
5. Повторить шаги 2–4 до тех пор, пока в графе есть рёбра.

В результате будет получено паросочетание – набор рёбер, в котором ни одно ребро не является общим для двух других рёбер.

Этот алгоритм является жадным алгоритмом и может давать неоптимальное решение в некоторых случаях. Однако он прост в реализации и работает достаточно быстро.

Для более точного решения задачи можно использовать другие алгоритмы, такие как алгоритм Куна или алгоритм Хопкрофта – Карпа. Эти алгоритмы являются более сложными, но они могут дать оптимальное решение.

Заключение

Таким образом, эвристический алгоритм нахождения клик в графе позволяет осуществлять решение целого комплекса задач теории графов, о практическом применении которых говорилось выше. В частности, это наибольшее независимое множество вершин, паросочетания.

Список литературы

1. Асатурова Ю.М., Хватова Т.Ю. Повышение инновационной активности предприятий в условиях дефицита финансов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2019. Т. 12, № 1. С. 132–145. DOI: 10.18721/JE.12111
2. 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
3. Баркалов С.А. Выбор базовых представителей направления техники нового поколения / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2023. Т. 23, № 3. С. 93–104. DOI: 10.14529/ctcr230308
4. Баркалов С.А. Формирование поколений новой техники как задача о покрытии множества / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // Проблемы управления. 2023. № 6. С. 22–32. DOI: 10.25728/ru.2023.6.2

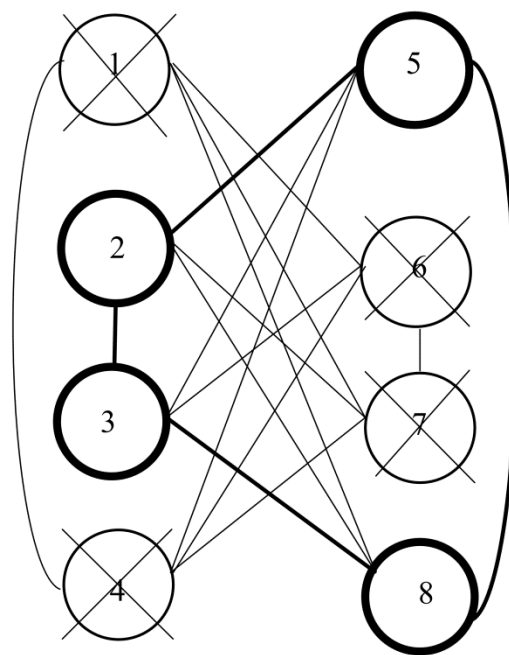


Рис. 3. Дополнительный граф к исходному графу
Fig. 3. Additional graph to the original graph

5. Баркалов С.А. Моделирование инновационного развития фирмы / С.А. Баркалов, И.В. Буркова, П.Н. Курочка, Е.А. Серебрякова // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2023. № 2 (18). С. 49–64. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-49-64
6. Баркалов С.А. Оптимизационные модели – инструмент системного моделирования: моногр. / С.А. Баркалов, П.Н. Курочка, Л.Д. Маилян, Е.А. Серебрякова. М.: Кредо, 2023. 522 с.
7. Баркалов С.А. Ресурсное планирование проектного управления: моногр. / С.А. Баркалов, П.Н. Курочка, Л.Д. Маилян, Е.А. Серебрякова. М.: Кредо, 2024. 530 с.
8. Белов М.В. Оптимальное управление жизненными циклами сложных изделий, объектов, систем // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 19–32. DOI: 10.25728/ru.2022.1.2
9. Бурков В.Н., Заложнев А.Ю., Новиков Д.А. Теория графов в управлении организационными системами. М.: Синтег, 2001. 124 с.
10. Бурков В.Н., Буркова И.В. Задачи дихотомической оптимизации. М.: Радио и связь, 2003. 156 с.
11. Голлай А.В., Логиновский О.В. Использование теории нечетких множеств при отборе технологий промышленного предприятия для их улучшения // Управление инвестициями и инновациями. 2018. № 1. С. 35–43. DOI: 10.14529/iimj180104
12. Окулов С.М. Дискретная математика. Теория и практика решения задач по информатике [Электронный ресурс]: учеб. пособие. 2-е изд. (эл.). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 422 с.
13. Дранко О.И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций // Проблемы управления. 2007. № 1. С. 37–40.
14. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операций: пер. с фр. М.: Мир, 1977. 432 с.
15. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход: пер. с англ. М.: Мир, 1978. 435 с.
16. Курочка П.Н., Сеферов Г.Г. Модель управления объемами незавершенного производства при произвольной связи между работами проекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 4. С. 178–182.
17. Курочка П.Н., Чередниченко Н.Д. Задачи ресурсного планирования в строительном проекте // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 4745–4753.
18. Логиновский О.В., Голлай А.В., Дранко О.И. Эффективное управление организационными и производственными структурами: моногр. М.: Инфа-М, 2020. 450 с.
19. Логиновский О.В. Математическая модель выбора поставщика металлообрабатывающего оборудования в условиях необходимости достижения технологического суверенитета / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, М.В. Щемлев, А.М. Богер // Системы управления и информационные технологии. 2023. № 2 (92). С. 86–92.
20. Медведев С.Н. Жадные и адаптивный алгоритмы решения задачи маршрутизации транспортных средств с несколькими центрами с чередованием объектов // Автоматика и телемеханика. 2023. Вып. 3. С. 139–168. DOI: 10.31857/S0005231023030078
21. Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. М.: КомКнига, 2006. 332 с.

References

1. Asaturova Yu.M., Khvatova T.Yu. Improving innovative activity of enterprises in conditions of financial deficit. *St. Petersburg state polytechnical university journal. Economics*. 2019;12(1):132–145. (In Russ.) DOI: 10.18721/JE.12111
2. 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
3. Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Selection of basic representatives of new generation technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2023;23(3):93–104. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr230308
4. Barkalov S.A., Burkov V.N., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Forming the generations of new technological products as a set covering problem. *Control Sciences*. 2023;(6):18–26. DOI: 10.25728/cs.2023.6.2

5. Barkalov S.A., Burkova I.V., Kurochka P.N., Serebryakova E.A. Modeling the innovative development of the firm. *Vestnik of Tver state technical university. Series "Technical science"*. 2023;2(18):49–64. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-2-49-64
6. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D., Serebryakova E.A. *Optimizatsionnye modeli – instrument sistemnogo modelirovaniya: monografiya* [Optimization models – a system modeling tool: monograph]. Moscow: Kredo; 2023. 522 p. (In Russ.)
7. Barkalov S.A., Kurochka P.N., Mailyan L.D., Serebryakova E.A. *Resursnoe planirovanie proektnogo upravleniya: monografiya* [Resource planning of project management: monograph]. Moscow: Kredo; 2024. 530 p. (In Russ.)
8. Belov M.V. Optimal control of the life cycle of complex systems. *Control Sciences*. 2022. № 1. C. 15–26. DOI: 10.25728/cs.2022.1.2
9. Burkov V.N., Zalozhnev A.Yu., Novikov D.A. *Teoriya grafov v upravlenii organizatsionnymi sistemami* [Graph theory in the management of organizational systems]. Moscow: Sinteg; 2001. 124 p. (In Russ.)
10. Burkov V.N., Burkova I.V. *Zadachi dikhotoomicheskoy optimizatsii* [Problems of dichotomous optimization]. Moscow: Radio i svyaz'; 2003. 156 p. (In Russ.)
11. Hollay A.V., Loginovskiy O.V. Using the theory of fuzzy sets in selecting technologies of industrial enterprise for their improved. *Investment and innovation management journal*. 2018;(1):35–43. DOI: 10.14529/iimj180104
12. Okulov S.M. *Diskretnaya matematika. Teoriya i praktika resheniya zadach po informatike: uchebnoe posobie* [Discrete mathematics. Theory and practice of solving problems in computer science: textbook] [Electronic resource]. 2nd ed. (e-mail). Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2012. 422 p. (In Russ.)
13. Dranko O.I. [Model of financial forecasting and scenarios of internal investments]. *Control Sciences*. 2007(1):37–40. (In Russ.)
14. Kaufmann A., Henry-Labordere A. *Metody i modeli issledovaniya operatsiy* [Methods and models of operations research]. Transl. from French. Moscow: Mir; 1977. 432 p. (In Russ.)
15. Christofides N. *Graph theory. Algorithmic approach*. Transl. from Engl. Moscow: Mir; 1978. 435 p. (In Russ.)
16. Kurochka P.N., Seferov G.G. Model of management in volumes of the work in progress at any communication between works of the project. *Bulletin of Voronezh state technical university*. 2011;7(4):178–182. (In Russ.)
17. Kurochka P.N., Cherednichenko N.D. [Tasks of resource planning in a construction project]. In: *XII vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014* [XII All-Russian Conference on Management Problems VSPU-2014]. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2014. P. 4745–4753. (In Russ.)
18. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Dranko O.I. *Effektivnoe upravlenie organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami: monografiya* [Effective management of organizational and industrial structures: monograph]. Moscow: Infa-M; 2020. 450 p. (In Russ.)
19. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Shchemlev M.V., Boger A.M. Mathematical model of choosing a supplier of metal-working equipment under the conditions of the necessity to achieve technological sovereignty. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*. 2023;2(92):86–92. (In Russ.)
20. Medvedev S.N. Greedy and adaptive algorithms for multi-depot vehicle routing with object alternation. *Avtomatika i telemekhanika*. 2023;3:139–168. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0005231023030078
21. Novikov D.A., Ivashchenko A.A. *Modeli i metody organizatsionnogo upravleniya innovatsionnym razvitiem firmy* [Models and methods of organizational management of the innovative development of the firm]. Moscow: KomKniga; 2006. 332 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 управления, 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 Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; sea-parish@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 04.06.2024

The article was submitted 04.06.2024

Автоматизированные системы управления технологическими процессами Automated process control systems

Original article

DOI: 10.14529/ctcr240409

AUTOMATED INFORMATION CONTROL SYSTEM FOR OPTIMAL PLANNING OF BLAST-FURNACE IRONMAKING

L.S. Kazarinov, kazarinovls@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6308-4596>

T.A. Barbasova, barbasovata@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2248-2894>

E.V. Bauman, bauman.e.v@yandex.ru

P.A. Samoletova, samoletovapa@susu.ru

S.A. Cherepanova, cherepanovasa@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Increasing competition in the markets for metallurgical products issues a challenge for enterprises to increase production efficiency in economic term. One of the most important segments of the metallurgical industry is considered to be blast furnace ironmaking, which accounts for more than 50% of the energy costs of a metallurgical enterprise; in addition, there is a large consumption of resources for manufacturing. **Aim.** The article is aimed at increasing the efficiency of blast furnace smelting both from an economic point of view and from the technological process itself through the introduction of an automated information-control system for optimal planning of the work of a blast furnace shop. The system is capable of recommending optimal production of a blast furnace shop in terms of the minimum cost of cast iron, as well as making recommendations to personnel to correct operating parameters of blast furnaces in order to increase productivity and reduce coke rate. **Materials and methods.** It is proposed to use artificial intelligence methods in work to achieve these goals. In particular, clustering and dimensionality reduction methods are used to determine the optimal operating modes of technological equipment, and the problem of increasing the efficiency of the blast furnace shop is solved using nonlinear programming methods to plan blast furnace ironmaking, taking into account technological and economic limitations. The initial data for setting up and operating of optimal planning system is the production statistics of a metallurgical enterprise, the sources of which are monitoring and control systems for technological processes, the laboratory analyses of charge materials and smelting products, as well as expert assessments of the technological equipment state. **Results.** The results of the optimal value of blast furnace ironmaking seeking in terms of the minimum cost of cast iron and maximum efficiency of blast furnace smelting as well as the coefficients of the influence of production factors on the main indicators of blast furnace ironmaking: the productivity of blast furnaces and coke rate are shown. **Conclusion.** The developed automated information-control system for optimal planning of blast furnace ironmaking can be used as a decision support tool for both foremen, the head of the blast furnace shop, and the economic services of an industrial enterprise. Specialists can apply the obtained results for master production schedule of the sinter-coke-blast furnace ironmaking.

Keywords: artificial intelligence, blast furnace ironmaking, clustering, optimization, information-control system

For citation: Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Bauman E.V., Samoletova P.A., Cherepanova S.A. Automated information control system for optimal planning of blast-furnace ironmaking. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):103–112. DOI: 10.14529/ctcr240409

Научная статья
УДК 004.896, 004.942
DOI: 10.14529/ctcr240409

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Л.С. Казаринов, kazarinovls@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6308-4596>

Т.А. Барбасова, barbasovata@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2248-2894>

Е.В. Бауман, bauman.e.v@yandex.ru

П.А. Самолетова, samoletovapa@susu.ru

С.А. Черепанова, cherepanovasa@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Усиление конкуренции на рынках металлургической продукции ставит перед предприятиями задачу повышения эффективности производства с экономической точки зрения. Одним из наиболее важных звеньев металлургической отрасли считается доменное производство, на долю которого приходится более 50 % энергетических затрат металлургического предприятия, помимо этого при получении продукции идет большой расход ресурсов. **Цель исследования.** Статья направлена на повышение эффективности доменной плавки как с экономической точки зрения, так и со стороны самого технологического процесса за счет внедрения автоматизированной информационно-управляющей системы оптимального планирования работы доменного цеха, способной рекомендовать оптимальное производство доменного цеха с точки зрения минимума себестоимости чугуна, а также выдавать рекомендации персоналу по коррекции режимных параметров работы доменных печей с целью увеличения производительности и снижения удельного расхода кокса. **Материалы и методы.** Для достижения этих целей в работе предлагается использовать методы искусственного интеллекта. В частности, для определения оптимальных режимов работы технологического оборудования применяются методы кластеризации и снижения размерности, а для планирования доменного производства с учетом технологических и экономических ограничений решается задача повышения эффективности доменного цеха с применением методов нелинейного программирования. В качестве исходных данных для настройки и работы системы оптимального планирования выступает производственная статистика металлургического предприятия, источниками которой являются системы мониторинга и управления технологическими процессами, результаты анализов лабораторий исходных материалов и готовой продукции, а также экспертные оценки по состоянию технологического оборудования. **Результаты.** Приведены результаты решения задачи поиска оптимального значения производства доменного цеха с точки зрения минимума себестоимости чугуна и максимума эффективности ведения доменной плавки, а также коэффициенты влияния производственных факторов на основные показатели доменного производства: производительность доменных печей и удельный расход кокса. **Заключение.** Разработанная автоматизированная информационно-управляющая система оптимального планирования доменного производства может быть использована в качестве инструмента поддержки принятия решений как для мастеров, начальника доменного цеха, так и для экономических служб промышленного предприятия. Полученные результаты могут применяться специалистами для объемного планирования работы агло-коксо-доменного производства в целом.

Ключевые слова: искусственный интеллект, доменное производство, кластеризация, оптимизация, информационно-управляющая система

Для цитирования: Automated information control system for optimal planning of blast-furnace ironmaking / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova, E.V. Bauman et al. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 103–112. DOI: 10.14529/ctcr240409

Introduction

The iron and steel industry plays an important role in the global economy, influencing key industries. The largest countries all over the world support and develop the metallurgical products production as one of the promising areas of economic development. Due to increasing competition on the metallurgical products markets, enterprises need to solve problems to increase economic efficiency.

One of the key elements of the metallurgical industry is blast furnace ironmaking. It accounts for 50–75% of the energy costs of full-cycle enterprises. In this regard, it is necessary to reduce the energy and resource intensity of the resulting products.

The literature presents several strategies for increasing the economic efficiency of blast furnace ironmaking. The main strategy is to optimize the blast furnace smelting process itself. At different times, well-known Russian and foreign researchers N.N. Babarykin studied this issue [1], S.A. Zagajnov and L.Ju. Gileva [2, 3], Ju.N. Ovchinnikov [4], O.P. Onorin [5], N.A. Spirin [6], I.G. Tovarovskij [7], V.N. Andronov [8], B.P. Dovgaljuk [9] and many others. Another strategy for increasing the economic efficiency of blast furnace ironmaking is the optimal distribution of raw materials and fuel and energy resources between blast furnaces. The solutions to the resource allocation problem are presented in [10–11]. This strategy is also successfully used in other sectors of the economy [12].

This article solves the problem of optimal planning of blast furnace ironmaking using artificial intelligence methods. These methods allow to analyze large volumes of data, determine hidden patterns and dependencies, and solve complex optimization problems. In order to increase the efficiency and economical operation of blast furnace smelting, an automated information and control system (AICS) was developed. The functionality of the system determines the relevance of the research work. AICS allows to plan optimal volumes of pig iron production, taking into account production, technological and contractual restrictions, as well as the actual influence of quality indicators of coke, iron ore raw materials and operating parameters of blast furnaces on the efficiency of the blast furnace process.

System description

The automated information and control system for optimal planning of blast furnace ironmaking is a hardware/software package. It provides information resources and functionality for searching optimal production parameters taking into account production, technological and contractual restrictions. The system is flexible and adaptable to the operating conditions of the blast-furnace shop and the enterprise demands.

Fig. 1 shows a generalized functional flow diagram of the automated information and control system for optimal planning of blast-furnace ironmaking.

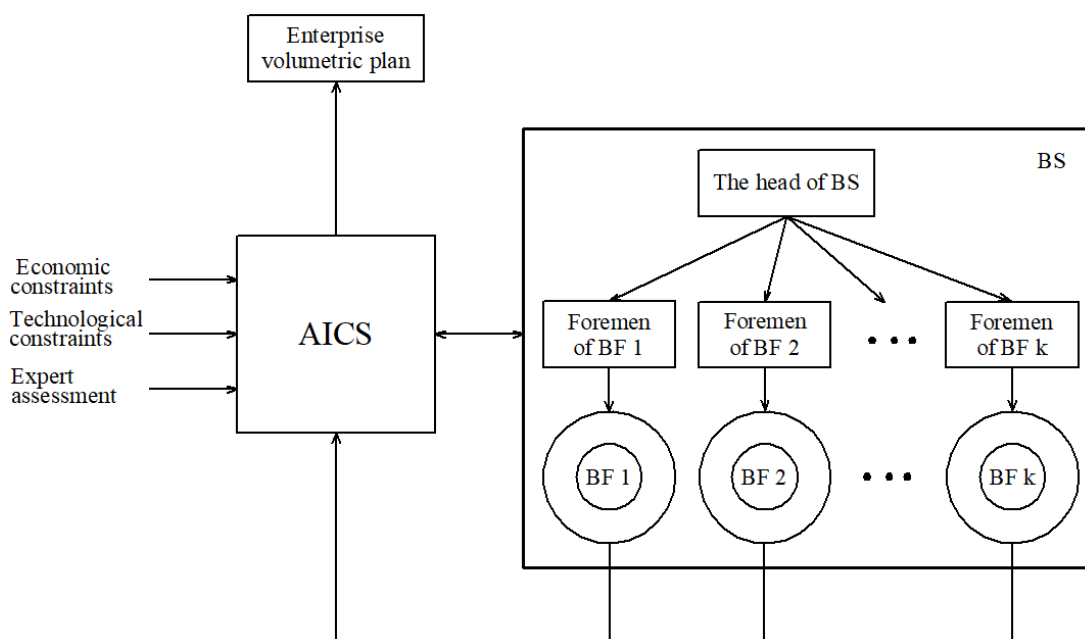


Fig. 1. The functional flow diagram of AICS of optimal planning of blast-furnace ironmaking

The system receives input data from various sources, such as blast furnace process monitoring and control systems, laboratory analyses of charge materials and smelting products, process reports, and log books. The system's functionality also provides the ability to manual entry of economic and technological constraints and expert assessments in the user interface. Based on this data, the system solves the optimization problem and provides the user with recommendations on changing the parameter values, which will increase the efficiency of blast furnace smelting and minimize the iron production costs. The obtained results are available to blast furnace shop (BS) specialists for effective control of the technological process and to economic services for volumetric planning of the metallurgical enterprise work as a whole.

Blast furnace efficiency index

To assess the efficiency of blast furnace smelting, it is proposed to use an indicator determined by the formula:

$$E_i = \alpha \cdot \frac{IP_i}{IP_{maxi}} + (1 - \alpha) \cdot \left(\frac{SCR_i}{SCR_{base}^{BS}} \right)^{-1},$$

where $i = 1, 2, \dots, k$ – blast furnace number;

E – efficiency index;

IP – predicted iron productivity, t/day;

IP_{maxi} – maximum iron productivity, t/day;

SCR – predicted specific coke rate, kg/t;

SCR_{base}^{BS} – average specific coke rate of blast furnace shop for current period, kg/t;

α – weighting coefficient reflecting the importance of taking into account productivity and coke rate as part of the efficiency index.

Nowadays, factor models are widely used to predict productivity and SCR. These models are based on statistical data and do not require a detailed description of all processes occurring in the furnace. Factor models have the form of linear functions with coefficients determined on statistical data and expert assessments:

$$SCR_i = SCR_{base\ i} + \frac{SCR_{base\ i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{SCR} \cdot \Delta P_{ij}) + k_{i\ NG}^{SCR} \cdot \Delta NG_{sp\ i} + k_{n\ i}^{SCR} + SCR_{rep};$$

$$IP_i = IP_{base\ i} + \frac{IP_{base\ i}}{100} \cdot \sum_{j=1}^n (k_{ij}^{IP} \cdot \Delta P_{ij}) + k_{n\ i}^{IP},$$

where $j = 1, 2, \dots, n$ – parameter number influencing the SCR and productivity;

$SCR_{base\ i}$ – specific coke rate of i -th blast furnace in base period, kg/t;

$IP_{base\ i}$ – iron productivity of i -th blast furnace in base period, t/day;

ΔP_{ij} – change of j -th technological parameter of i -th blast furnace relative to the base period;

$k_{ij}^{SCR}, k_{ij}^{IP}$ – coefficient of influence of the j -th parameter of the i -th blast furnace on the SCR and productivity, respectively;

$k_{i\ NG}^{SCR}$ – coefficient of influence of specific rate of natural gas of the i -th blast furnace on the SCR;

$\Delta NG_{sp\ i}$ – change of specific rate of natural gas relative to the base period, m³/t;

SCR_{rep} – specific coke rate for repairs, kg/t;

$k_{n\ i}^{SCR}$ – coefficient of technology nonuniformity for SCR of the i -th blast furnace, kg/t;

$k_{n\ i}^{IP}$ – coefficient of technology nonuniformity for iron productivity of the i -th blast furnace, t/day.

The technology nonuniformity coefficients provided in the formulas are determined by a BS specialist based on his experience and knowledge of the operating characteristics of blast furnaces. The addition of these coefficients into the model allows to take into account the influence of parameters that are not included in factor models or cannot be measured and assessed quantitatively. Also, to improve the accuracy of the forecast of productivity and SCR using factor models, data mining methods are used in this research work to determine the coefficients of influence of parameters in the current operating conditions of the blast furnace shop.

Cluster analysis of blast furnace operating modes

The cluster analysis methods allow to automatically divide the statistical data of blast furnaces into groups (clusters) that correspond to different operating modes of the furnace. So, it becomes possible to compare and select the most suitable modes, taking into account the current operating conditions of the blast furnace shop.

Data pre-processing step is a necessary for the successful application of clustering methods, since the interpretability and utility of the results directly depends on the data quality. To reduce data volume

and highlight the most significant features the data preprocessing step includes removing noise and omissions, converting data into a single format, aggregation and selecting. The random forest method was used to fill in the data gaps. This method allows taking into account nonlinear dependencies between variables and is highly accurate and resistant to noise [13]. Data corresponding to non-steady-state mode of blast furnace were also removed from the original data samples, as they could reduce the accuracy of the analysis and cause erroneous results. Data were aggregated daily to average variations in parameters throughout the day.

For cluster analysis, we used self-organizing Kohonen maps – neural networks with unsupervised learning. This method allows to display a multidimensional array of information on a two-dimensional grid, preserving the data topological properties. At the beginning of training, each grid node is a prototype of a cluster with a certain vector of weights that characterizes its position in the original space. When an input vector is received, the network finds the winning neuron that is closest to it, and adjusts its weights and the weights of its neighbors so that they become more similar to the input vector. This process is repeated for all input vectors until the specified accuracy or number of iterations is achieved [14]. As a results of the neural network training, we obtain data divided into clusters. The final number of clusters was selected using the silhouette coefficient.

After identifying the operating modes of blast furnaces, linear regression models were built and the corresponding factor coefficients for the influence of parameters on the efficiency of blast furnace smelting were determined in each cluster. Figs. 2–5 show the dependences of blast furnace productivity and specific coke rate (SCR) on abrasion coke strength (M10) and iron content in the charge.

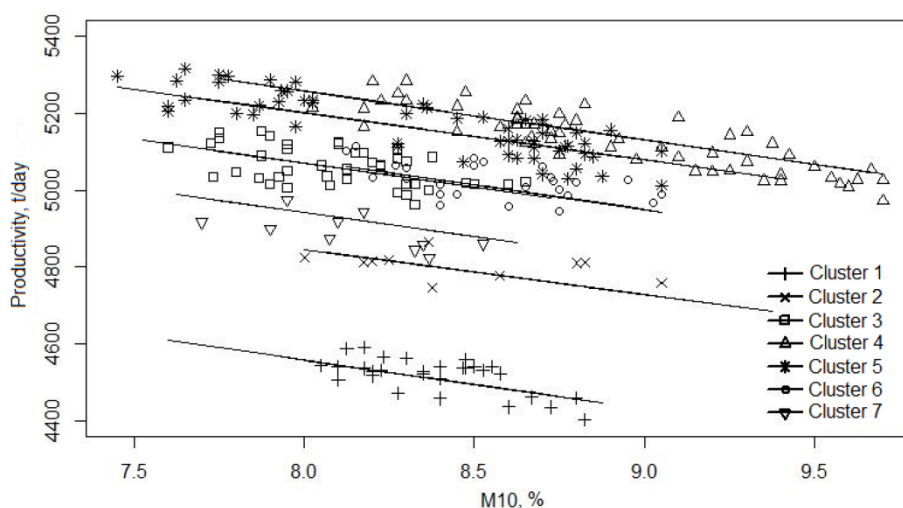


Fig. 2. Graph of blast furnace productivity versus abrasion coke strength (M10)

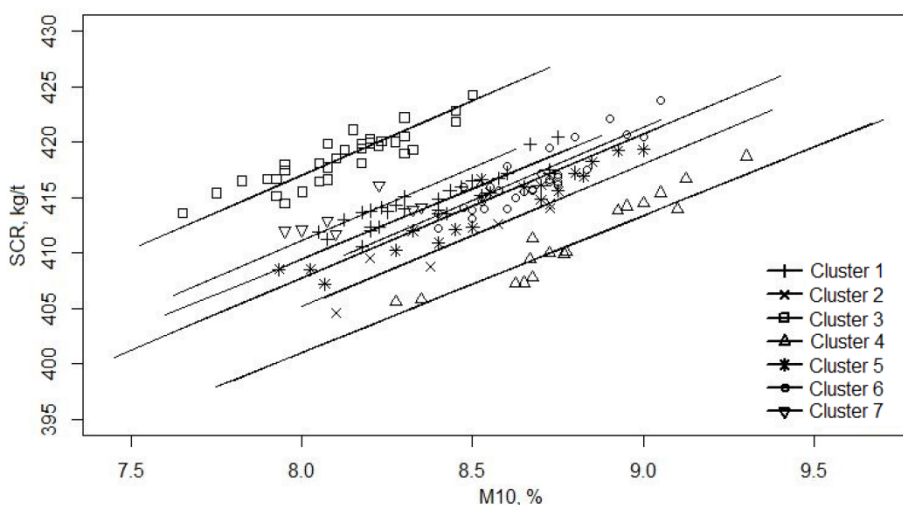


Fig. 3. Graph of coke rate versus abrasion coke strength (M10)

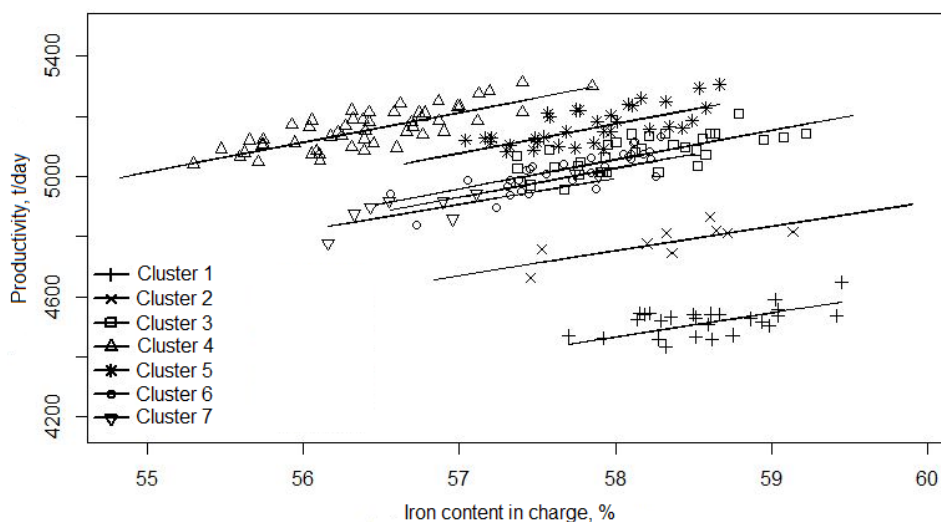


Fig. 4. Graph of blast furnace productivity versus the iron content in the charge

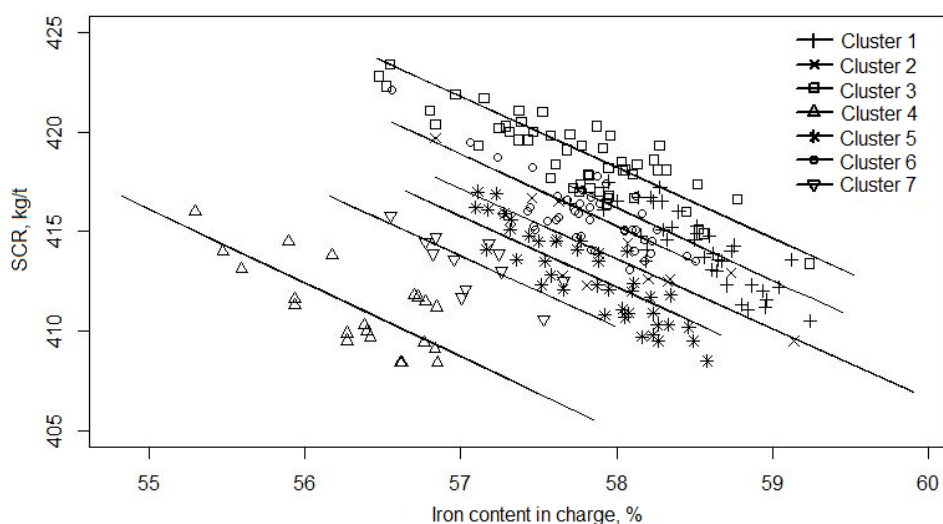


Fig. 5. Graph of coke rate versus the iron content in the charge

The Table 1 contains coefficients calculated in each cluster for the influence of abrasion coke strength and iron content in the charge on productivity and SCR.

Table 1

Coefficients of influence of abrasion coke strength (M10) and iron content in the charge

Operating mode	Change in productivity (%) with an increase in M10 by 1 %	Change in specific coke rate (%) with an increase in M10 by 1 %	Change in productivity (%) with an increase in iron content in the charge by 1 %	Change in specific coke rate (%) with an increase in iron content in the charge by 1 %
1	-2.8	3.06	1.77	-0.88
2	-2.46	3.12	1.70	-0.85
3	-2.45	3.20	1.92	-0.85
4	-2.46	3.01	1.91	-0.90
5	-2.38	3.14	1.90	-0.86
6	-2.57	3.18	1.94	-0.87
7	-2.56	3.18	1.77	-0.86
Average	-2.53	3.13	1.84	-0.87

The cluster database is constantly updated and adapts to changes in blast furnace smelting technology. The AICS for optimal planning of blast furnace ironmaking analyzes information about the operation of blast furnaces in the current period, determines the nearest cluster for each furnace and calculates the coefficients of the influence of selected parameters on productivity and SCR which are used in factor models.

The solution of the optimization problem

During planning of blast furnace ironmaking, the problem of multicriteria optimization is solved using a generalized optimality criterion.

The objective function is obtained by combining the weighted values of partial criterions and has the following form:

$$\beta_1 \cdot PC - \beta_2 \cdot \sum_{i=1}^k E_i \rightarrow \min,$$

where β_1, β_2 – weighting coefficient;

PC – production cost of cast iron;

E – efficiency index of i -th blast furnace.

The goal of optimization is to find such values of technological parameters that provide maximum efficiency and minimum costs for the production of cast iron under given constraints.

To calculate the production cost of cast iron, we use models obtained from the subsystem for optimizing the supply and consumption of coal and iron ore raw materials [15]. In this subsystem, the selection of the share participation of suppliers is carried out according to the criterion of minimum costs for the purchase and transportation of raw materials, taking into account technological and economic constraints. At the output of the subsystem, several charge variations are formed, for each of which their qualitative and quantitative characteristics are given, as well as the cost of coke and iron ore raw materials. One of the tasks of the AICS is to select the optimal charge option from those presented at the output of the subsystem to ensure a minimum of the objective function.

The production cost of cast iron also depends on the blast operating mode of blast furnaces. Therefore, the model takes into account not only the characteristics of the charge, but also the following parameters: oxygen content in the blast, specific rate of natural gas, rate of enriched blast, its temperature, pressure and humidity.

In this optimization problem, the following constraints were set:

1. The values of the optimized technological parameters should not exceed the minimum and maximum limits determined by the technical capabilities of the equipment, as well as the requirements for the quality of the products:

$$P_{\min ij} \leq P_{ij} \leq P_{\max ij},$$

where P_{ij} – predicted value of j -th parameter of i -th blast furnace;

$P_{\min ij}, P_{\max ij}$ – minimum and maximum values of j -th parameter of i -th blast furnace.

2. The volumes of natural gas, blast and oxygen, as well as the volume of top gas should not exceed the permitted maximum value for the blast furnace shop:

$$V_{NG}^{BS} \leq V_{NG \max}^{BS}, V_{O_2}^{BS} \leq V_{O_2 \max}^{BS}, V_{Blast}^{BS} \leq V_{Blast \max}^{BS}, V_{TG}^{BS} \leq V_{TG \max}^{BS},$$

where $V_{NG}^{BS}, V_{O_2}^{BS}, V_{Blast}^{BS}, V_{TG}^{BS}$ – predicted volume of natural gas, blast, oxygen and top gas for blast furnace shop respectively, m^3 ;

$V_{NG \max}^{BS}, V_{O_2 \max}^{BS}, V_{Blast \max}^{BS}, V_{TG \max}^{BS}$ – maximum values of volume of natural gas, blast, oxygen and top gas for blast furnace shop respectively, m^3 .

3. The theoretical combustion temperature for each blast furnace should not exceed the prescribed limits:

$$TCT_{\min i} \leq TCT_i \leq TCT_{\max i},$$

where TCT_i – calculated theoretical combustion temperature for the i -th blast furnace in the forecast period, $^{\circ}$;

$TCT_{\min i}, TCT_{\max i}$ – specified minimum and maximum values of the theoretical combustion temperature for the i -th blast furnace, $^{\circ}$.

4. Constraints on SCR and blast furnace productivity should not exceed the prescribed limits:

$$SCR_{\min i} \leq SCR_i \leq SCR_{\max i};$$

$$IP_{\min i} \leq IP_i \leq IP_{\max i}.$$

5. The value of the ratio of natural gas and oxygen content in the blast for each furnace should be close to the optimal value from the forecast cluster:

$$Opt_i - \Delta_{opt} \leq \frac{Q_{NGi}}{Q_{O2i}} \leq Opt_i + \Delta_{opt},$$

where Q_{NGi} – natural gas content in the blast for the i -th blast furnace, %;

Q_{O2i} – oxygen content in the blast for the i -th blast furnace, %;

Opt_i – optimal value of the ratio of natural gas and oxygen content from the forecast cluster;

Δ_{opt} – permissible deviation of the ratio of natural gas and oxygen content from the optimum.

To solve the problem under discussion, we used the differential evolution algorithm for global optimization with nonlinear constraints and self-adaptive parameters [16]. Fig. 6 shows an example of how the objective function depends on pig iron production of the blast furnace shop per month. In this case, the optimal production of cast iron was 843 thous. tons.

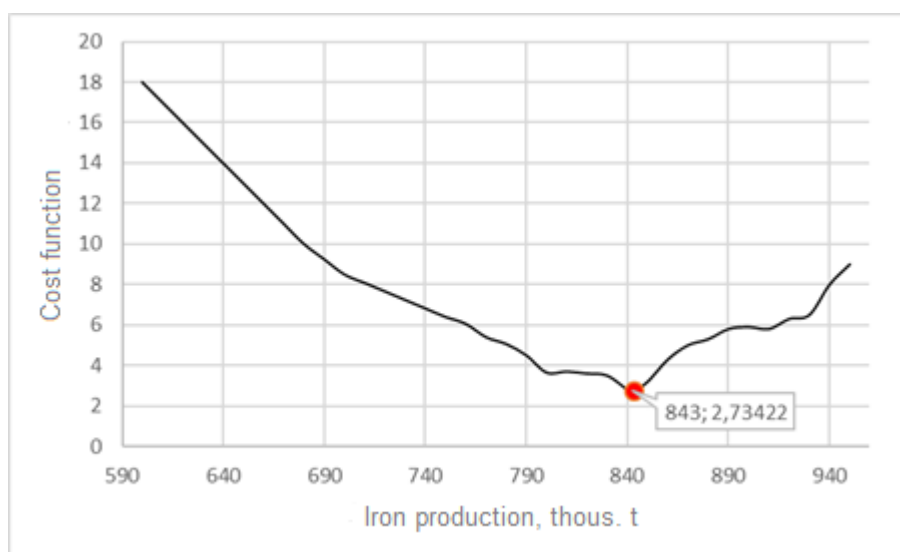


Fig. 6. The results of optimal productivity value search

As a result of solving the optimization problem, the optimal values of the technological parameters of the blast furnaces operation were obtained according to the criterion of minimum costs and maximum efficiency of blast furnace smelting.

Conclusion

During the study, an automated information and control system for optimal planning of blast furnace production was developed. AICS is based on modern technologies for data processing and analysis, as well as artificial intelligence methods, such as clustering, dimensionality reduction and nonlinear optimization.

This system makes allow to evaluate the influence of technological factors on the efficiency indicators of blast furnace smelting under various operating modes of blast furnaces and to predict the optimal values of the blast furnace shop operating parameters, taking into account the given constraints. The results obtained in proposed system can be useful for making decisions at the technical and economic level of managing metallurgical production.

References

1. Babarykin N.N. *Teoriya i tekhnologiya domennoy plavki* [Theory and technology of blast-furnace smelting]. Magnitogorsk, MSTU; 2009. 257 p. (In Russ.)
2. Zagaynov S.A., Onorin O.P., Gileva L.Yu., Volkov D.N., Tleugobulov B.S. [Development and implementation of mathematical support and software for flexible technological operating modes of blast furnaces]. *Steel*. 2000;(9):12–15. (In Russ.)
3. Zagaynov S.A., Onorin O.P., Spirin N.A., Yaroshenko Y.G. Mathematical model of the blast-furnace process. *Steel in Translation*. 2003;33(12):1–5.

4. Ovchinnikov Yu.N., Moykin V.I., Spirin N.A., Bokovikov B.A. *Nestatsionarnyye protsessy i povyshenie effektivnosti domennoy plavki* [Unsteady processes and increasing the efficiency of blast furnace smelting]. Chelyabinsk: Metallurgiya; 1989. 120 p. (In Russ.)
5. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L., Gileva L.Yu., Rybolovlev V.Yu., Kosachenko I.E., Lavrov V.V., Terent'ev A.V. *Komp'yuternyye metody modelirovaniya domennogo protsessa* [Computer methods for modeling the blast furnace process]. Ekaterinburg: USTU-UPI; 2005. 301 p. (In Russ.)
6. Spirin N.A., Lavrov V.V., Parshakov S.I., Denisenko S.G. *Optimizatsiya i identifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v metallurgii* [Optimization and identification of technological processes in metallurgy]. Ekaterinburg, USTU-UPI; 2006. 307 p. (In Russ.)
7. Tovarovskiy I.G. *Domennaya plavka* [Blast furnace smelting]. Dnepropetrovsk: Porogi; 2009. 765 p. (In Russ.)
8. Andronov V.N. *Ekstraktsiya chernykh metallov iz prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya. Domenny protsess* [Extraction of ferrous metals from natural and technogenic raw materials. Blast Furnace process]. Donetsk: Nord-Press; 2009. 377 p. (In Russ.)
9. Dovgalyuk B.P. [Methods for monitoring the efficiency of using fuel additives and process oxygen and their optimal distribution between blast furnaces]. *Steel*. 1987;(8):9–14. (In Russ.)
10. Gurin I.A., Spirin N.A., Lavrov V.V., Noskov V.Yu. Algorithmic provision and the software for optimal allocation of fuel-energy resources in blast furnaces production. *Automation. Modern technologies*. 2017;71(5):202–207. (In Russ.)
11. Spirin N.A., Gilyova L.Y., Lavrov V.V., Istomin A.S., Gurin I.A., Buriykin A.A., Shchipanov K.A. The optimization of natural gas distribution in a blast furnace when changing the parameters of melting. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2014;57(6):45–49. (In Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2014-6
12. 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
13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer; 2008. 784 p.
14. Kohonen T. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*. 1990;78(9):1464–1480.
15. Lipatnikov A.V., Shmelyova A.E., Stepanov E.N., Shnayder D.A. Mathematical modeling and optimization of raw coal consumption in PJSC “MMK”. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*. 2018;16(4):30–38. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38
16. DEoptimR: Differential Evolution Optimization in Pure R. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/DEoptimR/DEoptimR.pdf> (accessed 24 June 2023).

Список литературы

1. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменной плавки. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 257 с.
2. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей / С.А. Загайнов, О.П. Онорин, Л.Ю. Гилева и др. // *Сталь*. 2000. № 9. С. 12–15.
3. Современные принципы построения математической модели доменного процесса для решения технологических задач / С.А. Загайнов, О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, Ю.Г. Ярошенко // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2003. № 12. С. 3–7.
4. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спиринов, Б.А. Боковиков. Челябинск: Металлургия, 1989. 120 с.
5. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, В.Л. Терентьев и др. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. 301 с.
6. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, С.И. Паршаков, С.Г. Денисенко. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. 307 с.
7. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Днепропетровск: Пороги, 2009. 765 с.
8. Андронов В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс. Донецк: Норд-Пресс, 2009. 377 с.
9. Довгалоук Б.П. Методы контроля эффективности использования топливных добавок и

технологического кислорода и их оптимального распределения между доменными печами // Сталь. 1987. № 8. С. 9–14.

10. Алгоритмическое и программное обеспечение оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в доменном производстве / И.А. Гурин, Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Носков // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71, № 5. С. 202–207.

11. Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе при изменении параметров плавки / Н.А. Спирин, Л.Ю. Гилёва, В.В. Лавров и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57, № 6. С. 45–49. DOI: 10.17073/0368-0797-2014-6

12. 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

13. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction. Springer, 2008. 784 p.

14. Kohonen T. The self-organizing map // Proceedings of the IEEE. 1990. Vol. 78, no. 9. P. 1464–1480.

15. Оптимизация потребления угольного сырья в ПАО ММК на основе математического моделирования / А.В. Липатников, А.Е. Шмелёва, Е.Н. Степанов, Д.А. Шнайдер // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. № 4 (1). С. 30–38. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-30-38

16. DEoptimR: Differential Evolution Optimization in Pure R. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/DEoptimR/DEoptimR.pdf> (дата обращения: 24.06.2023).

Information about the authors

Lev S. Kazarinov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kazarinovls@susu.ru.

Tatiana A. Barbasova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Automatics and Control, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; barbasovata@susu.ru.

Ekaterina V. Bauman, Postgraduate student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bauman.e.v@yandex.ru.

Polina A. Samoletova, Lecturer, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; samoletovapa@susu.ru.

Svetlana A. Cherepanova, Lecturer, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; cherepanovasa@susu.ru.

Информация об авторах

Казаринов Лев Сергеевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматизации и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kazarinovls@susu.ru.

Барбасова Татьяна Александровна, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой автоматизации и управления, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; barbasovata@susu.ru.

Бауман Екатерина Вячеславовна, аспирант, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bauman.e.v@yandex.ru.

Самолетова Полина Алексеевна, преподаватель, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; samoletovapa@susu.ru.

Черепанова Светлана Андреевна, преподаватель, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; cherepanovasa@susu.ru.

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

The authors declare no conflicts of interests.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted 31.05.2024

Статья поступила в редакцию 31.05.2024

Краткие сообщения Brief reports

Краткое сообщение
УДК 004.94 + 69.003.13
DOI: 10.14529/ctcr240410

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСА СВЯЗИ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА (BIM) И СМЕТНОЙ СТОИМОСТИ ОБЪЕКТА

С.И. Бородин, borodinsi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2115-4549>

Е.В. Гусев, gusev@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8458-1222>

А.М. Коровин, korovinam@susu.ru

С.Г. Некрасов, nekrasovsg@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В настоящий момент информационная модель объекта строительства (BIM-модель) является неотъемлемой частью проекта на этапах проектирования и строительства. BIM-модель содержит в себе параметрические данные об объекте, используемых ресурсах и служит основой для принятия, как правило, технологических решений. Существует необходимость прозрачно обозначить связь BIM-модели со стоимостью объекта, которая является ключевым показателем при принятии управленческих решений. Информационная модель выполняется в формате IFC, а сметные программы не поддерживают такой вариант передачи данных. В частности, передача сметных данных происходит с использованием файлов формата XML. Это несоответствие требует доработки на концептуальном и программном уровнях, в том числе организуя среду общих данных.

Цель работы. Статья связана с выявлением связи между свойствами информационной модели объекта и сметными свойствами, которые должны включаться в параметры модели на всех этапах жизненного цикла объекта. **Материалы и методы.** В процессе написания статьи были задействованы общенаучные методы и приемы исследования: описательный метод, метод сравнения, метод аналогий, метод обобщения, а также системный подход. При подготовке работы использовались данные нормативных и методических документов в области информационного моделирования в Российской Федерации и международные стандарты к содержанию и наполнению информационной модели объекта. Для апробации была задействована проектно-сметная документация по ремонту элемента административного здания. **Результаты.** Особенностью работы является проработка наполнения BIM-модели сметными свойствами в зависимости от уровня проработки модели (LOD) с учетом требований нормативно-методических документов в области строительства и международных стандартов. Предложен способ к формированию набора сметных свойств, который можно в дальнейшем адаптировать под нужды заказчика в зависимости от типа строительства, стадии жизненного цикла проекта и сметных нормативов. **Заключение.** Результаты работы могут быть использованы для формирования методических документов по организации среды общих данных на этапах жизненного цикла капитального объекта.

Ключевые слова: информационная модель, сметная стоимость, сметные свойства, экспертная оценка, BIM-модель

Для цитирования: Исследование вопроса связи информационной модели строительства объекта (BIM) и сметной стоимости объекта / С.И. Бородин, Е.В. Гусев, А.М. Коровин, С.Г. Некрасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 4. С. 113–122. DOI: 10.14529/ctcr240410

RELATIONSHIP BETWEEN THE BUILDING INFORMATION MODEL (BIM-MODEL) AND THE ESTIMATED COST

S.I. Borodin, borodinsi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2115-4549>

E.V. Gusev, guseev@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8458-1222>

A.M. Korovin, korovinam@susu.ru

S.G. Nekrasov, nekrasovsg@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. An information model of a construction project (BIM-model) is an integral part of the project at the design and construction stages now days. The BIM-model contains parametric data about the object, the resources used and serves as a basis for making, as a rule, technological decisions. There is a need to transparently indicate the connection between the BIM model and the cost of the object, which is a key indicator when making management decisions. The information model is implemented in the IFC format, and estimating programs do not support this option for data transfer. In particular, the transfer of estimate data occurs using XML files. This discrepancy requires revision at the conceptual and software levels, including organizing a common data environment. **The purpose of the work.** The article is related to identifying the connection between the properties of the information model of the object and the estimate properties that should be included in the model parameters at all stages of the object's life cycle. **Materials and methods.** In the process of writing the article, general scientific methods and research techniques were used: descriptive method, comparison method, analogy method, generalization method, and systems approach. In preparing the work, the data of regulatory and methodological documents in the field of information modeling in the Russian Federation and international standards for the content and filling of the information model of the object were used. For testing, design and estimate documentation for the repair of an element of an administrative building was used. **Results.** A feature of the work is the development of the filling of the BIM-model with estimate properties depending on the level of development of the model (LOD), taking into account the requirements of regulatory and methodological documents in the field of construction and international standards. A method is proposed for the formation of a set of estimate properties, which can be further adapted to the needs of the customer depending on the type of construction, stage of the project life cycle and estimate standards. **Conclusion.** The results of the work can be used to form methodological documents on the organization of the general data environment at the stages of the life cycle of a capital facility.

Keywords: information model, estimated cost, estimated properties, expert assessment, BIM model

For citation: Borodin S.I., Gusev E.V., Korovin A.M., Nekrasov S.G. Relationship between the building information model (BIM-model) and the estimated cost. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(4):113–122. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240410

Введение

В последние годы тема цифровой трансформации в сфере строительства окончательно перешла в стратегическую повестку государства и бизнеса. Относительно молодая технология информационного моделирования объекта строительства (в дальнейшем BIM-моделирование, building information modelling) для России уже начала выходить за рамки проектной среды, информационное моделирование перешло в нечто большее: на этапы строительства и даже эксплуатации. Теперь это принципиально новый подход к управлению жизненным циклом строительного объекта, включая экономическую составляющую этого процесса. Прозрачность, обоснованность и максимальная приближенность сведений о текущем состоянии объекта и отдельных его элементов к существующей ситуации снижает уровень инвестиционных рисков. BIM-моделирование способно решить многие такие задачи, в качестве примера приведем следующие [1–10]:

- разработка конкретных проектных решений;
- расчет узлов и компонентов здания;
- предсказание эксплуатационных качеств объекта;

- создание проектной и рабочей документации;
- составление смет и строительных планов;
- заказ и изготовление материалов и оборудования;
- организация возведения здания;
- управление эксплуатацией объекта;
- управление зданием как объектом коммерческой деятельности;
- проектирование и управление реконструкцией или ремонтом здания;
- снос и утилизация здания.

Не секрет, что судьба реализации проекта во многом зависит от экономической эффективности инвестиционно-строительного комплекса в целом, а не только одной составляющей. При этом экономические оценки в строительстве основываются на сметных расчетах. Целью исследования является разработка методического подхода внедрения технологий информационного моделирования при оценке стоимости строительства в организациях, осуществляющих архитектурно-проектную деятельность.

Особенностью работы является проработка наполнения BIM-модели сметными свойствами в зависимости от уровня проработки модели с учетом требований нормативно-методических документов в области строительства и международных стандартов. Предложен методический подход к формированию набора сметных свойств, который можно в дальнейшем адаптировать под нужды заказчика в зависимости от типа строительства и стадии жизненного цикла проекта.

Термины и историческая справка

Информационное моделирование строительного объекта представляет собой набор данных об объекте (геометрических, параметрических, стоимостных и прочих), формируемых в электронной форме, с помощью которых можно производить управление состоянием объекта. Ключевой особенностью подхода является использование «технологии PLM» (product life management, управление жизненным циклом изделия). Классически стадии жизненного цикла объекта строительства включают проектирование, строительство, эксплуатацию, реконструкцию, снос объекта. При этом необходимо понимать, что BIM-модель строительного объекта постоянно находится в наполнении, обновляется. Применение информационного моделирования предполагает, что будет использовано программное обеспечение, без этого вопрос управления электронными данными не реализуется и их сбор просто бесполезен.

Вопрос внедрения BIM-моделирования в России осуществляется с 2014 г.¹ В этот момент были предприняты первые шаги по разработке комплексной программы внедрения нового инструмента в деятельность целого комплекса за достаточно короткий срок: до 2017 г. (за 3 года!) «объять необъятное» не получилось. Результат был плачевный: не удалось добиться и малого. Однако важно то, что была предпринята первая попытка вложить в достаточно консервативную область, с точки зрения внедрения информационных технологий, – строительство, саму идею о том, что нужны изменения, чтобы повысить производительность труда.

Достаточно быстрее пошло дело после того, как Президент России обратил внимание на эту проблему в своем поручении Правительству РФ в 2018 г.² На основании данного поручения Правительство РФ проанализировало текущее состояние вопроса и построило программу реализации данного проекта более адекватную, нежели первоначальный вариант действий³.

Последняя итерация по внедрению BIM-моделирования была достаточно активной и постепенно достигает своей цели – построение цифровой платформы «Цифровое строительство». В настоящее время уже действуют и активно используются отдельные государственные информационные системы в строительстве (ГИС):

¹ Приказ Минстроя России № 926/пр от 29.12.2014 г. «Об утверждении Плана поэтапного внедрения технологий информационного моделирования в области промышленного и гражданского строительства».

² Поручения Президента Российской Федерации от 19 июля 2018 г. № Пр-1235 Д.А. Медведеву «В целях модернизации строительной отрасли и повышения качества строительства».

³ Поручение Правительства РФ 2468п-П9 от 11.04.2017 г. «План мероприятий по внедрению оценки экономической эффективности обоснования инвестиций и технологий информационного моделирования на всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства».

- Информационная система обеспечения градостроительной деятельности;
- Федеральная государственная информационная система ценообразования в строительстве;
- Единый государственный реестр заключений;
- Федеральная государственная информационная система территориального планирования;
- Единый государственный реестр недвижимости.

Серьезным вызовом для реализации информационного моделирования послужили санкции, которые ограничили использование программного обеспечения зарубежного производства в BIM-моделировании. Несмотря на это, отечественные разработчики не сдались и активно наращивают свой потенциал в данной области, что позволяет использовать уже истинно российские разработки в России. Эти разработки, безусловно, требуют многих доработок. Но, как и при любом развитии, доработки будут требоваться всегда.

При подготовке информационной модели необходимо понимать, что модель развивается вместе с объектом, только в цифровой форме, как некоторый цифровой двойник, и наполняется данными об объекте постепенно: начиная с архитектурного решения (когда данных небольшое количество) до конкретного реализованного объекта (представляющего полный набор всех характеристик реализованного объекта).

Уровень проработки модели позволяет управлять, контролировать и планировать обмен информацией между участниками всех этапов строительства объекта в допустимом объеме. Для обозначения наполненности модели используется термин LOD (level of development, уровень наполнения модели). В мировой практике наполнение LOD реализуется посредством разработки спецификации для каждого элемента модели: имеются в виду данные, которые требуется включить в модель с точки зрения целесообразности их использования на данном этапе жизненного цикла объекта строительства. В частности, на этапе обоснования инвестиций нет смысла включать все характеристики элементов здания (стен, колонн, окон, дверей и прочего), достаточно включения ориентировочных геометрических характеристик (LOD100). На основании этого можно построить архитектурную дизайн-модель. Если включать на этом этапе все данные об объекте, то на это уйдет много времени архитектора и проектировщика, а объект, может быть, не будет принят заказчиком для дальнейшей разработки. В момент проектирования переходят к следующему уровню наполнения модели (LOD200 или LOD300 в зависимости от требований заказчика), здесь уже целесообразно включать дополнительные технические характеристики объектов, которые носят атрибутивный характер: геометрические характеристики устанавливаются точные, присутствует информация о ресурсах (материалах, модели оборудования и прочее). На основании этих данных возможно уже проводить имитационные инженерные эксперименты над моделью, искать проектные и технические решения. Заключительным уровнем проработки считается LOD500, который, как правило, представляет собой набор данных об элементе модели в виде конкретной сборки с фактическими размерами, формой, пространственным положением, ориентацией и атрибутивной информацией, достаточной для передачи модели в эксплуатацию, в том числе с приложением исполнительной документации.

К сожалению, на данный момент не принято единых международных стандартов и спецификаций для определения уровня проработки, но первые шаги в данном направлении уже начались. В качестве примера международной практики использования можно привести BIM Object/Element Matrix (США). Для России BIM-стандарты – еще в стадии наполнения и согласования, концепция уровней проработки модели также претерпела изменения. Первоначально действовал свод правил СП 333.1325800.2017, в рамках которого использовался заимствованный термин LOD (level of development, уровень наполнения модели). Термин был представлен (в буквальном смысле переведен) на основе спецификации американской модели LOD и затрагивал этапы проектирования и строительства. В настоящий момент действующим стандартом в области наполнения модели является СП 333.1325800.2020 (далее СП-333)⁴, который был выпущен в 2020 г. В документе сокращение LOD не упоминается, предложены названия пяти базовых уровней по циклам жизни объекта, включая эксплуатацию, демонтаж и снос (табл. 1).

⁴ СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла (приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 31 декабря 2020 г. № 928/пр).

Таблица 1

Типы информационных моделей и их характеристика

Table 1

Types and characteristics of information models

Наименование модели	Обозначение	Характеристика
Модель инженерных изысканий	A	Здание целиком и территория
Проектная модель	B	Конструктивные решения основных элементов здания и прочие объекты в пределах земельного участка
Строительная модель	C1	Проектные решения всех элементов здания и прочих объектов с конкретизацией МТР в пределах земельного участка
Исполнительная модель	C2	Фактическое исполнение технических решений всех элементов здания и прочих объектов с указанием использованных МТР
Эксплуатационная модель	D	Существующие параметры объекта, регламентов и технологических карт технического обслуживания
Модель сноса и демонтажа	G	Проектные решения по сносу объекта, включая производства работ и МТО

Построение информационной модели объекта с наполнением сметными атрибутами

При оценке сметной стоимости объекта используется сметно-нормативная база (СНБ), которая представляет собой комплекс методических документов и сметных сборников и сведения об объекте (рис. 1).

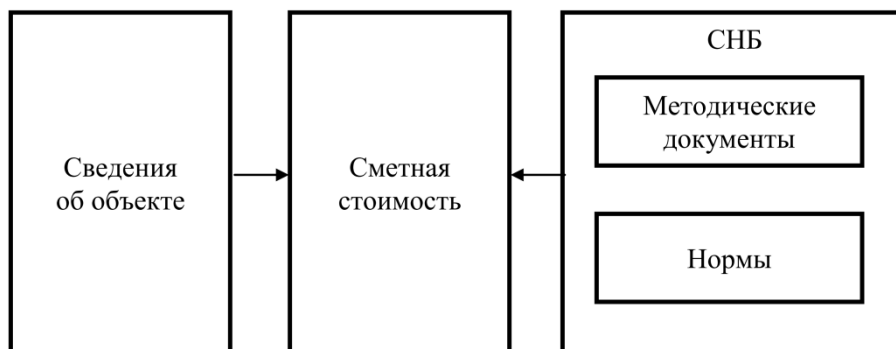


Рис. 1. Схема определения сметной стоимости объекта
Fig. 1. Determining scheme for estimated object cost

Государственная сметно-нормативная база в последние годы претерпевает значительные изменения в связи с внедрением ресурсного метода в практику оценки стоимости строительства объекта. Обновления происходят регулярно в связи с наполнением базы новыми строительными материалами, включением новых технологий и одновременно исключением устаревших, неиспользуемых ресурсов. Подчеркнем, что в настоящий момент построение сметы без использования специального программного обеспечения является сверхсложной задачей, требующей значительных усилий не только с точки зрения использования правильных методических документов в строительстве, связки с изменяющимися характеристиками объекта, но и правильного оформления выходных документов.

Неустойчивым звеном в данной схеме являются сведения об объекте, которые могут измениться в зависимости от решений застройщика в связи с изменением конъюнктуры рынка. При этом результат осмечивания предлагаемых изменений должен быть представлен заказчику, как правило, моментально.

Основные сложности связаны с тем, что сметно-нормативная база (наполнение классификатора строительных ресурсов, корректировка сметных нормативов и прочее) и методики расчета изменяются и в связи с этим необходимо вносить корректировки в программный продукт, кото-

рый занимается построением BIM-модели. При анализе схемы цифрового взаимодействия участников инвестиционно-строительного комплекса с использованием BIM-модели стало очевидно, что необходим промежуточный переходный программный продукт (модуль), который будет выступать посредником между цифровой моделью и сметной программой, в которой будет происходить доработка данных (рис. 2). Из информационной модели с помощью этого сметного модуля получают адаптированные исходные данные для сметного расчета, а потом с ее помощью добавляются в модель получившиеся стоимостные показатели как атрибуты модели. На российском рынке программного обеспечения готовые сметные модули возможно найти [11–15].



Рис. 2. Взаимодействия информационной модели со сметной программой
Fig. 2. Interaction of the information model with the estimating program

Подготовка наборов сметных свойств для разных уровней проработки информационной модели выполняется в несколько этапов (рис. 3).

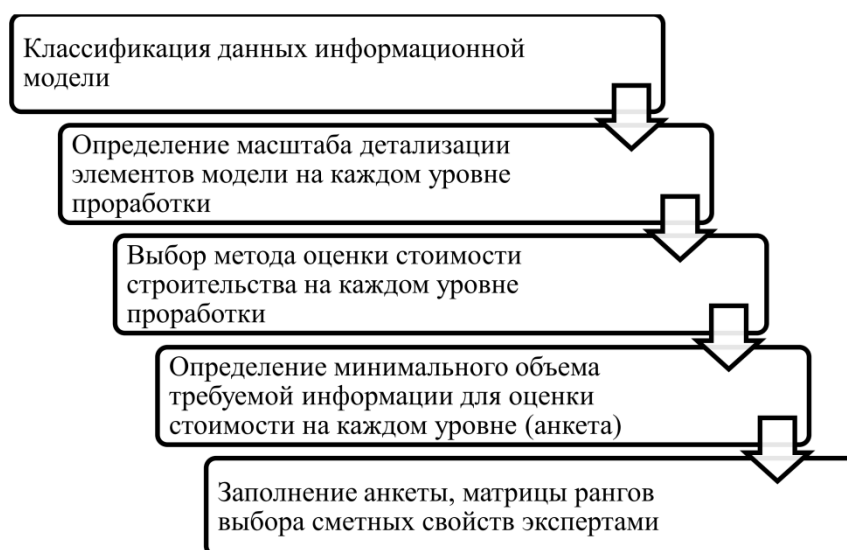


Рис. 3. Выбор сметных свойств, актуальных для подготовки информационной модели на разных этапах жизненного цикла
Fig. 3. Selection of estimate attributes for an BIM-model at different stages of the life cycle

1-й этап. Классификация сметных свойств. Подготовлен набор характеристик, необходимых для проведения оценки стоимости объекта. Например, физические данные, требуемые для расчета объемов работ: геометрические данные, объемные характеристики, единицы площади, весовые характеристики и т. п. атрибутивные данные: функция элемента, материал, технология производства работ, условия производства работ и т. п.

2-й этап. Определение масштаба детализации элементов модели для уровней проработки модели. Требуемые уровни проработки модели определены СП-333.

3-й этап. Выбор метода оценки стоимости строительства для уровня проработки модели. Использование укрупненных нормативов, использование ресурсного метода, ресурсно-индексного метода.

4-й этап. Определение минимального объема требуемой информации для наполнения уровня проработки модели. Например, минимальным набором требований для уровня проработки модели типа «А» будет:

- тип и назначение объекта строительства;
- мощность объекта строительства;
- регион строительства.

5-й этап. Проведение экспертной оценки выбора сметных свойств [16]. Выбор сметных свойств предлагается проводить методом ранговой корреляции.

Итогом будет формирование набора атрибутивных признаков для разных уровней проработки модели и включение их в модель взаимодействия BIM-модели для построения сметной стоимости (рис. 4).

Для проведения апробации предлагаемого подхода к определению сметных свойств объекта, необходимых для оценки сметной стоимости, был выбран комплекс работ по ремонту кровли административного здания в г. Челябинске.

Была составлена анкета для экспертизы необходимых сметных свойств для трех уровней проработки модели: модель инженерных изысканий, проектная модель и строительная модель в соответствии с установленными характеристиками в СП-333. Анализируя полученные экспертные оценки, можно констатировать высокую степень согласованности экспертов: полученным результатам можно доверять и использовать их в дальнейших исследованиях.

Итоговый сметный расчет для каждого уровня наполнения модели представлен в табл. 2.

Рис. 4. Пример информационного наполнения
элемента модели

Fig. 4. Example of content of a model element

Оценка сметной стоимости моделей по набору сметных свойств

Estimation of the estimated cost of models

Наименование модели	Модель инженерных изысканий	Проектная модель	Строительная модель
Обозначение (табл. 1)	А	В	С1
Сметная стоимость, тыс. руб.	212 608,80	241 239,02	248 657,22

Сравнивая между собой стоимости разного уровня наполнения моделей сметными свойствами, видим, что разница между моделью инженерных изысканий и проектной моделью 13 %. Разница в стоимости проектной и строительной модели сокращается до 3 %, что можно признать допустимой ошибкой.

Заключение

Оценка стоимости строительно-монтажных работ является одним из ключевых этапов при принятии решения о проведении строительства или ремонта объектов. Работа носит регламентированный характер, заключенный в методических документах и сметных нормативах, соответственно, при наличии инструмента по переводу

Раньше подготовка сметной документации начиналась на финальной стадии проекта (в BIM возможно на ранних уровнях проработки модели), при сформированных спецификациях, которые передавались сметчику, после чего начинался трудоемкий процесс подсчета объема работ, подбор подходящих расценок и материалов, это выполнялось вручную, поэтому отличалось длительными сроками подготовки сметной документации. При внесении изменений в проект и предоставлении новой спецификации сметчик вновь вручную прорабатывал документацию, внося изменения. Отсутствие единой системы взаимосвязи также приводило к значительному увеличению сроков выпуска сметной документации. В данной ситуации высок риск появления ошибок в сметной документации.

С использованием сметных надстроек для BIM-модели значительно сокращаются сроки подготовки документации за счет автоматизации рутинных процессов. Связь атрибутивных элементов внутри модели позволяет узнать об изменениях, внесенных в информационную модель, то есть при внесении конструктивных или объемно-планировочных изменений в модель происходят соответствующие изменения итоговой стоимости объекта. Такая связь двухсторонняя, при завершении расчетов сметчик отправляет стоимостные показатели в модель, проектировщик или инвестор может увидеть цену любого элемента информационной модели. Помимо сокращения трудозатрат и длительности выпуска сметной документации, также с помощью проверок на коллизии минимизируется количество ошибок.

Список литературы

1. Huang M. Using BIM technology to improve construction management of renovation projects // Installation. 2018. Vol. 11. P. 19–21.
2. Niu M. Comprehensive application and practice of BIM technology in the rapid construction of hospitals // Automation Application. 2023. P. 171–173.
3. Шалина Д.С., Тихонов В.А., Степанова Н.Р. Визуальное представление реализации BIM-проекта для упрощения управления жизненным циклом проекта // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 2. С. 116–123. DOI: 10.17513/snt.39532. EDN: YBYQYC.
4. Хрусталева Б.Б., Каргин А.А. Основные вопросы внедрения технологии информационного моделирования в деятельности предприятий инвестиционно-строительного комплекса // Друкеровский вестник. 2022. № 3 (47). С. 104–112. DOI: 10.17213/2312-6469-2022-3-104-112. EDN: PIELQG.
5. Мещерякова М.А., Чуканова Е.Н. Особенности внедрения технологии информационного моделирования в строительную организацию // Цифровая и отраслевая экономика. 2022. Т. 27, № 2. С. 4–8. EDN: VEMSAN.
6. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry // Leadership and Management in Engineering. 2011. Vol. 11 (3). P. 241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
7. Bryde D., Broquetas M., Volm J.M. The project benefits of Building Information Modeling (BIM) // International Journal of Project Management. 2013. Vol. 31. P. 971–980. DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001
8. Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management / B. Becerik-Gerber, F. Jazizadeh, N. Li, G. Calis // Journal of Construction Engineering and Management. 2012. Vol. 138. P. 431–442. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000433
9. Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction / R. Sacks, L. Koskela, B.A. Dave, R. Owen // Journal of Construction Engineering and Management. 2010. Vol. 136 (9). P. 968–980. DOI: 10.1061/ASCECO.1943-7862.0000203
10. Azhar S, Khalfan M., Maqsood T. Building information modeling (BIM): Now and beyond // Australasian Journal of Construction Economics and Building. 2012. Vol. 12(4). P. 15–28. DOI: 10.5130/ajceb.v12i4.3032

11. Коровина М.В. BIM-сметчик: новые цифровые подходы к определению сметной стоимости строительных работ // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 31 января 2023 года. М.: 1С-Паблишинг, 2023. Т. 1. С. 444–448. EDN: JSLVVP.
12. Попов А., Манин П. Технология BIM и сметы // САПР и графика. 2022. № 2 (304). С. 19–21. EDN: INMKEJ.
13. Житлова В.А., Петренева О.В. Пример определения сметной стоимости с помощью программного комплекса Гектор: 5D Смета на основе BIM-модели Autodesk Revit // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 2. С. 107–112. EDN: GTXHJO.
14. Подолянский К. Время, деньги, ОБИВК. 4D и 5D в BIM-модели и экспертиза сметной стоимости // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2022. № 3 (243). С. 26–29. EDN: HWXSHN.
15. Соколова В.В., Герман Н.М. Определение сметной стоимости строительства средствами программного комплекса РИК с использованием BIM-технологий // Ползуновский альманах. 2021. № 1. С. 167–169. EDN: JHZZER.
16. Тарасевич В.М. Ценовая политика предприятия: учеб. для вузов / под общ. ред. Г.Л. Багиева. 3-е изд. СПб.: Питер, 2010. 320 с. ISBN 978-5-498-07193-0. EDN: SDPTVX.

References

1. Huang M. Using BIM technology to improve construction management of renovation projects. *Installation*. 2018;11:19–21.
2. Niu M. Comprehensive application and practice of BIM technology in the rapid construction of hospitals. *Automation Application*. 2023:171–173.
3. Shalina D.S., Tikhonov V.A., Stepanova N.R. Visual Representation of BIM-project Implementation to Simplify Project Life Cycle Management. *Modern high technologies*. 2023;(2):116–123. (In Russ.) DOI: 10.17513/snt.39532. EDN: YBYQYC.
4. Khrustalev B.B., Kargin A.A. The Main Issues of the Introduction of Information Modeling Technology in the Activities of Enterprises of the Investment and Construction Complex. *Drukerovskij vestnik*. 2022;3(47):104–112. (In Russ.) DOI: 10.17213/2312-6469-2022-3-104-112. EDN: PIELQG.
5. Mescheryakova M.A., Chukanova E.N. Features of the Introduction of Information Modeling Technology in a Construction Organization. *Tsifrovaya i otraslevaya ekonomika*. 2022;27(2):4–8. (In Russ.) EDN: VEMSAN.
6. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*. 2011;11(3):241–252. DOI: 10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
7. Bryde D., Broquetas M., Volm J.M. The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*. 2013;31:971–980. DOI: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001
8. Becerik-Gerber B., Jazizadeh F., Li N., Calis G. Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2012;138:431–442. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000433
9. Sacks R., Koskela L., Dave B.A., Owen R. Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2010;136(9):968–980. DOI: 10.1061/ASCECO.1943-7862.0000203
10. Azhar S., Khalfan M., Maqsood T. Building information modeling (BIM): Now and beyond. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*. 2012;12(4):15–28. DOI: 10.5130/ajceb.v12i4.3032
11. Korovina M.V. BIM Estimator: Novel Digital Approaches to Determining the Estimated Cost of Construction Works. In: *Novyye informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii* [Materials of the XXIII International scientific and practical conference]. Moscow; 2023. Vol. 1. P. 444–448. (In Russ.) EDN: JSLVVP.
12. Popov A., Manin P. BIM Technology and Estimates. *CAD and graphics*. 2022;2(304):19–21. (In Russ.) EDN: INMKEJ.

13. Zhitlova V.A., Petreneva O.V. Example of determining the estimated cost using the Gector: 5D Estimate software package based on the Autodesk Revit BIM model. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2020;2:107–112. (In Russ.) EDN: GTXHJO.
14. Podolyanskiy K. Time, Money, OViVK. 4D and 5D in BIM-model and Expertise of Estimated Cost. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2022;3(243):26–29. (In Russ.) EDN: HWXSHN.
15. Sokolova V.V., German N.M. Determining the Estimated Cost of Construction by Means of the RICS software package using BIM Technologies. *Polzunovskiy al'manakh*. 2021;(1):167–169. (In Russ.) EDN: JHZZER.
16. Tarasevich V.M. *Tsenovaya politika predpriyatiya: ucheb. dlya vuzov* [Pricing Policy of the Enterprise. Textbook for universities]. Saint Petersburg: Piter; 2010. 320 p. (In Russ.) ISBN 978-5-498-07193-0. EDN: SDPTVX.

Информация об авторах

Бородин Сергей Игоревич, канд. экон. наук, доц. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; borodinsi@susu.ru.

Гусев Евгений Васильевич, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gusevev@susu.ru.

Коровин Александр Михайлович, канд. техн. наук, доц, доц. кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korovinam@susu.ru.

Некрасов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru.

Information about the authors

Sergey I. Borodin, Cand. Sci. (Econ), Ass. Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; borodinsi@susu.ru.

Evgeny V. Gusev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gusevev@susu.ru.

Aleksandr M. Korovin, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korovinam@susu.ru.

Sergey G. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 29.04.2024

The article was submitted 29.04.2024

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 подраз рубрики. Надписи и подписи к иллюстрированному материалу приводят на языке текста статьи и повторяют на английском языке;

- заключение.

После основного текста статьи приводят:

- Список литературы (в порядке цитирования, по ГОСТ Р 7.0.5–2008 для затекстовых библиографических ссылок);
- References (составляется согласно Vancouver Style, при транслитерации используется стандарт BGN), doi предпочтительнее приводить в форме электронного адреса в сети Интернет.

Приводят на языке текста статьи и затем повторяют на английском языке (если статья на английском языке, то повторяют на русском языке):

- дополнительные сведения об авторе (авторах): фамилия, имя, отчество автора (полностью), ученая степень, ученое звание, должность, наименование организации (учреждения), адрес организации (город, страна), e-mail, ORCID;
- сведения о вкладе каждого автора, указание об отсутствии или наличии конфликта интересов;
- даты поступления статьи в редакцию, одобрения после рецензирования, принятия статьи к опубликованию.

3. **Параметры набора:** шрифт – Times New Roman, кегль – 14, интервал между абзацами 0 пт, межстрочный интервал – одинарный, выравнивание – по ширине.

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю Захарову В.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: zakharovvv@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

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

Главный редактор – д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ Логиновский Олег Витальевич.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций 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, статистика (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»
2024. Том 24, № 4

16+

Редактор *С.И. Уварова*
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 31.10.2024. Дата выхода в свет 08.11.2024. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,41. Тираж 500 экз. Заказ 286/366. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.