

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 24 № 4 / 2020



Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 24 № 4 / 2020



**Известия Юго-Западного
государственного университета
(Izvestiya Yugo-Zapadno gosudarstvenno universiteta)**

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1997 г.

До 2011 года журнал издавался под названием
«Известия Курского государственного технического университета».

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как технология и оборудование механической и физико-технической обработки, сварка, роботы, мехатроника и робототехнические системы, управление в социальных и экономических системах, методы и системы защиты информации, информационная безопасность, автоматизация и управление технологическими процессами, строительные конструкции, теплоснабжение, вентиляция, газоснабжение и освещение, строительная механика.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Машиностроение и машиноведение: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Строительство: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Информатика, вычислительная техника и управление: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Российской академии архитектуры и строительных наук, Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Бредихин Владимир Викторович, д-р экон. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г.Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агеев Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Алексеев Юрий Владимирович, д-р архитектуры, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (г. Москва, Россия);

Бобырь Максим Владимирович, д-р техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Бок Томас, д-р техн. наук, профессор, Мюнхенский технический университет (г.Мюнхен, Германия);

Бьянко Лино, д-р философии (PhD), профессор международной академии архитектуры, профессор Университета архитектуры, строительства и геодезии (г. София, Болгария), старший преподаватель Университета Мальты (Мальта);

Дегтярев Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Димитров Любомир Ванков, д-р техн. наук, профессор, Технический университет Софии (г.София, Болгария);

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич, д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Колчунов Виталий Иванович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, Юго-Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Кузнецов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Россия);

Кукарас Даниэль, д-р философии (PhD), профессор, факультет гражданского строительства, Нови-Садский университет (г.Суботица, Сербия);

Куц Вадим Васильевич, д-р техн. наук, доцент,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Пановко Григорий Яковлевич, д-р техн. наук,
профессор, Институт машиноведения
Российской академии наук (г.Москва, Россия);

Сизов Александр Семенович, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Смирнов Игорь Михайлович, д-р техн. наук,
доцент, АО «Научно-исследовательский
инженерный институт» (г. Балашиха, Россия);

Сотникова Ольга Анатольевна, д-р техн. наук,
профессор, Воронежский государственный
технический университет (г.Воронеж, Россия);

Титов Виталий Семенович, д-р техн.наук,
профессор, заслуженный деятель науки России,
Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Турков Андрей Викторович, д-р техн. наук,
профессор, Орловский государственный университет
им. И.С.Тургенева (г.Орел, Россия);

Щербаков Владимир Иванович, д-р техн. наук,
доцент, Воронежский государственный технический
университет (г.Воронеж, Россия);

Яцун Сергей Федорович, д-р техн. наук, профессор,
Заслуженный деятель науки России,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Емельянов Сергей Геннадьевич, (председатель)
д-р техн.наук, профессор, чл.-кор. Российской академии
архитектуры и строительных наук, Лауреат
премии правительства РФ в области науки и техники,
ректор, Юго-Западный государственный университет»
(г.Курск, Россия)

Бертрам Торстен, д-р техн. наук, профессор, Институт
теории управления и системного проектирования
Технического университета (г. Дортмунд, Германия);

Гриднев Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, доцент,
Воронежский государственный технический
университет (г.Воронеж, Россия);

Ежов Владимир Сергеевич, д-р техн. наук,
профессор, Изобретатель СССР, Юго-Западный
государственный университет (г.Курск, Россия);

Зотов Игорь Валерьевич, д-р техн. наук, профессор,
Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Ивахненко Александр Геннадьевич, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Колмыков Валерий Иванович, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный университет
(г.Курск, Россия);

Колчунов Владимир Иванович, д-р техн.наук,
профессор, член Российской академии архитектуры
и строительных наук, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Корневский Николай Алексеевич, д-р техн. наук,
профессор, Заслуженный деятель науки России, Юго-
Западный государственный университет (г.Курск, Россия);

Латыпов Рашид Абдулхакович, д-р техн. наук,
профессор, Московский политехнический университет
(г.Москва, Россия);

Локтионова Оксана Геннадьевна, д-р техн. наук,
профессор, Юго-Западный государственный
университет (г.Курск, Россия);

Шах Райнер, д-р техн. наук, профессор, Дрезденский
технический университет (г.Дрезден, Германия).

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Адрес учредителя, издателя и редакции:

305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

Телефон: +7(4712) 22-25-26,

Факс: +7(4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

Сайт журнала: <https://science.swsu.ru>

© Юго-Западный государственный университет, 2020



Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г.Курск,
ул. 50 лет Октября, д. 94

Подписка и распространение:

журнал распространяется
по подписке.
Подписной индекс журнала 41219
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре выпуска в год

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 30.12.2020. Формат 60х84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 29,8.
Тираж 1000 экз. Заказ 77.

16+

Proceedings of the Southwest State University



Peer-reviewed scientific journal

Published since 1997

Before 2011

“Proceedings of the Kursk State Technical University”

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as mechanical technologies and equipment; machine building; physical and engineering processing of materials; welding; robotics, mechatronics and robot systems, management and administration of social and economic systems; information protection methods and systems; information security; production process automation and control; building structures; heat supply; ventilation; gas supply and lightning systems; construction mechanisms and machines.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU.

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctoral or candidate thesis in the following areas:

Mechanical engineering and machine science: 05.02.05; 05.02.07; 05.02.10.

Construction: 05.23.01; 05.23.03; 05.23.17.

Computer science, computer engineering and control: 05.13.01; 05.13.05; 05.13.06; 05.13.10; 05.13.18; 05.13.19.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering), Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Vladimir V. Bredikhin, Dr. of Sci. (Economic), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Yevgenii V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Yurii V. Alekseev, Dr. of Sci. (Architecture), Professor, Moscow State National Research University of Civil Engineering (Moscow, Russia);

Maksim V. Bobyr, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Thomas Bock, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Munich (Munich, Germany);

Lino Bianco, Dr. of Sci. (Philosophy), Professor of IAA, Visiting Professor at University of Architecture, Civil Eng. and Geodesy (Sofia), Senior Lecturer, University of Malta (Malta);

Sergey V. Degtyarev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Lyubomir V. Dimitrov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria);

Zhanybaj T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Vitalii I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Southwest State University (Kursk, Russia);

Sergey N. Kuznetsov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Danijel Kukaras, Associate Professor, PhD, University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering (Subotica, Serbia);

Grigorii Ya. Panovko, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia);

Alexander S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor M. Smirnov, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, JSC "Research engineering
Institute» (Balashikha, Russia);

Olga A. Sotnikova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia);

Vitalii S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Andrey V. Turkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russia);

Vladimir I. Shcherbakov, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Voronezh State Technical University
(Voronezh, Russia);

Sergey F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

Sergei G. Emelianov, Chairman, Dr. of Sci. (Engineering),
Correspondent Member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences, a Holder
of the Russian Government Prize in the Field of Science
and Engineering, Rector of the Southwest State
University (Kursk, Russia)

Torsten Bertram, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Institute of Control Theory and System Design,
Technical University of Dortmund (Dortmund, Germany);

Sergey Yu. Gridnev, Dr. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Voronezh State Technical
University (Voronezh, Russia);

Vladimir S. Ezhov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Igor V. Zotov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Alexander G. Ivakhnenko, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Valerii I. Kolmykov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia);

Vladimir I. Kolchunov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences Advisor, Southwest State
University (Kursk, Russia);

Nikolay A. Korenevskii, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Rashit A. Latypov, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia);

Oksana G. Loktionova, Dr. of Sci. (Engineering),
Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);

Schah R., Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Technical University of Dresden (Dresden, Germany)

Founder and Publisher:
"Southwest State University"

Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

Phone: +7 (4712) 22-25-26,

Fax: +7 (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:

The Federal Supervising Authority in the Field of Communication,
Information Technology and Mass media
(ПИ №ФС77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

Web-site: <https://science.swsu.ru>

Printing office:

Printing Center

of the Southwest State University,

50 Let Oktyabrya str. 94,

Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:

the journal is distributed by subscription.

Subscription index 41219

in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

16+

© Southwest State University, 2020



Publications are available in accordance with
the Creative Commons Attribution 4.0 License

Singed to print 30.12.2020. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 29,8.

Circulation 1000 copies. Order 77.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Исследование процесса аддитивного формирования легкоплавких материалов с использованием твердотельного малоомощного лазера	8
--	---

Куц В. В., Меркулов В.С., Гречухин А. Н.

Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров	18
--	----

Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Воронин В.В.

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Исследование особенностей выбора способа прокладки тепловых сетей, влияющих на их энергоэффективность	29
---	----

Бирюзова Е.А., Глуханов А.С.

Инструментальный метод определения показателей энергоэффективности многоквартирных жилых зданий	42
---	----

Монастырев П.В., Макаров А.М., Чех А.С., Куценко О.И.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Идентификация человека по походке в видеопотоке	57
---	----

Уздаяев М.Ю., Яковлев Р.Н., Дударенко Д.М., Жебрун А.Д.

Моделирование конфигурации робототехнического захвата для манипуляций с сельскохозяйственной продукцией	76
---	----

Ву Д.К., Ронжин А.Л.

Комплексный анализ рисков грузового порта на основе логико-вероятностного и имитационного моделирования	91
---	----

Бондарева И.О.

Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве	107
---	-----

Захаров К.С., Савельев А.И.

Анализ результатов применения метода пчелиной колонии в задаче раскраски графов общего вида	126
---	-----

Пшеничных А. О., Ватулин Э. И.

Формализация этапов жизненного цикла создания геоинформационной продукции на научно-производственном предприятии	146
--	-----

Зайцев Е.М., Коломиец Е.А., Николаев В. Н.

Алгоритм управления малогабаритным беспилотным подводным комплексом	166
---	-----

Бондырев В. Е., Князев С. И., Королев В. И., Яцун С. Ф.

Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах	180
---	-----

Галин Р.Р., Серебряный В.В., Тевяшов Г.К., Широкий А.А.

Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата	200
--	-----

Нгуен В.В., Усина Е.Е.

Автоматизированное проектирование системы управления роботизированной платформы с применением Adams и Matlab	217
--	-----

Порхало В.А., Рубанов В.Г., Бажанов А.Г., Луценко О.В.

Применение адаптивного трёхпозиционного регулирования в системе автоматизированного управления тепловым объектом	230
--	-----

Рубанов В. Г., Величко Д. В., Бушуев Д. А.

Структурно-параметрическая модель системы проектирования	244
--	-----

Мешков В. Г., Искра Д. Е.

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Study of the Process of Additive Formation of Low-Melting Materials by Means of a Low-Power Solid-State Laser.....	8
---	----------

Kuts V. V., Merkulov V. S., Grechukhin A. N.

Rapid diagnostic Test of Metal Turning Using Vibration Parameters Analysis.....	18
--	-----------

Artamonov E. V., Vasil'yev D. V., Voronin V. V.

CONSTRUCTION

Original articles

Studying the Features of Method Choice of Heat Networks Laying Which Affect Their Energy Efficiency	29
--	-----------

Biryuzova E. A., Glukhanov A. S.

Instrumental Method for Determining Energy Efficiency Indicators of Apartment Residential Houses	42
---	-----------

Monastyrev P. V., Makarov A. M., Chekh A. S., Kutsenko O. I.

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Identification of a Person by Gait in a Video Stream	57
---	-----------

Uzdiaev M. Yu., Iakovlev R. N., Dudarenko D. M., Zhebrun A. D.

Modeling the Configuration of a Robotic Gripper for Handling Agricultural Products	76
---	-----------

Vu Q. D., Ronzhin A. L.

Comprehensive Risk Analysis of a Cargo Port Based on Logic-Probabilistic and Simulation Modeling	91
---	-----------

Bondareva I. O.

Smoothering the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space	107
--	------------

Zakharov K. S., Saveliev A. I.

Analysis of the Results of Applying the Bee Colony Method in the Problem of Coloring General Graphs	126
--	------------

Pshenichnykh A. O., Vatutin E. I.

Formalization of Life Cycle Stages of Geographic Information Products Creation at Research and Production Enterprises	146
--	------------

Zaitsev E. M., Kolomiets E. A., Nikolaev V. N.

Small-size Unmanned Control Algorithm of an Underwater Complex.....	166
--	------------

Bondyrev V. E., Knyazev S. I., Korolev V. I., Jatsun S. F.

Human-robot Interaction in Collaborative Robotic Systems	180
---	------------

Galin R. R., Serebrennyy V. V., Tevyashov G. K., Shiroky A. A.

Dynamic Models of Unmanned Aerial Vehicle Manipulator Control and Stabilization	200
--	------------

Nguyen V. V., Usina E. E.

Computer-Aided Design of the Robotic Platform Control System Using Adams and Matlab.....	217
---	------------

Rubanov V. G., Porkhalo V. A., Bazhanov A. G., Lutcenko O. V.

Application of adaptive three-position control in the system of automated control of a thermal object	230
--	------------

Rubanov V. G., Velichko D. V., Bushuev D. A.

Structural-parametric model of the design system	244
---	------------

Meshkov V. G., Iskra D. E.

Исследование процесса аддитивного формирования легкоплавких материалов с использованием твердотельного маломощного лазера

В. В. Куц ¹, В.С. Меркулов ¹, А. Н. Гречухин ¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Аппробация способа аддитивного формирования легкоплавких материалов, с применением твердотельного (иттербиевого) лазера низкой мощности (максимальная мощность 50 Вт). Проведены серии экспериментов, в результате которых были получены элементы режима формообразования, обеспечивающие формообразование изделий без полного расплавления материала построения с сохранением формы заготовки. Таким образом, была подтверждена возможность использования данного типа оборудования для формообразования аддитивным способом изделий из легкоплавких материалов, что является основой для дальнейших исследований на других материалах, а также дополнительного применения защитной атмосферы.

Методы. Для проведения экспериментов были применены методы планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных.

Результаты. Подтверждена возможность использования лазера низкой мощности для поставленных задач. Получены диапазоны значений режимов формообразования, которые обеспечивают формирование аддитивным способом изделий из легкоплавких материалов методом частичного оплавления.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность применения твердотельного лазера низкой мощности для формообразования аддитивным методом изделий из легкоплавких материалов. Использование результатов данного исследования позволит проводить дальнейшие разработки формообразования аддитивным методом других металлов (таких, как медь или алюминий), для которых необходимо модернизировать оборудование в части создания защитной атмосферы в зоне расплава, а также увеличения мощности лазера.

Ключевые слова: аддитивные технологии; эксперимент; твердотельный лазер; плавление; лазерная наплавка.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Куц В. В., Меркулов В.С., Гречухин А. Н. Исследование процесса аддитивного формирования легкоплавких материалов с использованием твердотельного маломощного лазера // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-8-17>.

Поступила в редакцию 31.07.2020

Подписана в печать 28.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Study of the Process of Additive Formation of Low-Melting Materials by Means of a Low-Power Solid-State Laser

Vadim V. Kuts¹, Vadim S. Merkulov¹, Alexander N. Grechukhin¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

Abstract

Purpose of research. Testing a method for additive formation of low-melting materials through the use of a low-power solid-state (ytterbium) laser (maximum power 50 W). A series of experiments have been carried. As a result of those experiments, the elements of shaping mode have been obtained. They ensure the shaping of products without complete melting of the construction material while preserving the shape of a rough workpiece. Thus, the possibility of using this type of equipment for shaping products from low-melting materials in an additive way has been confirmed, which is the basis for further research on other materials, as well as the additional use of a shielding atmosphere.

Methods. Methods of experiment planning and empirical data processing have been used for conducting experiments.

Results. The possibility of using a low-power laser for the set tasks has been confirmed. Values ranges of shaping modes have been obtained, which ensure the formation of products made of low-melting materials by the partial melting technique through an additive method.

Conclusion. The experimental studies have shown that a low-power solid-state laser can be applied for shaping products made of low-melting materials using an additive method. Applying the results of this study will allow further development of additive shaping of other metals (such as copper or aluminum), for which it is necessary to upgrade the equipment in terms of creating a shielding atmosphere in the melt zone, as well as increasing the laser power.

Keywords: additive technologies; experiment; solid-state laser; melting; laser surface coating.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kuts V. V., Merkulov V. S., Grechukhin A. N. Study of the Process of Additive Formation of Low-Melting Materials by Means of a Low-Power Solid-State Laser. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 8-17 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-8-17>.

Received 31.07.2020

Accepted 28.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

Аддитивные технологии – это технологии послойного наращивания и синтеза объектов. Они нашли широкое применение в производстве и промышленности и позволяют в короткие сроки получить изделие или его прототип, выполненный с достаточно высокой точностью. Основным недостатком данных технологий является сравнительно высокая стоимость оборудования, а также сложность при получении изделий и деталей высокой точности, не требующих дальнейшей обработки [1-3].

Одним из методов аддитивного формообразования является формообразование лазером. Лазером возможно сплавлять как порошки, так и твердые материалы. Применение твердотельного лазера низкой мощности для аддитивного формирования легкоплавких материалов методом частичного оплавления оправдано благодаря сравнительно низкой стоимости оборудования, возможности изменения большого числа параметров работы и точного позиционирования лазерного луча [4-6].

Лазерное оборудование нашло широкое применение в промышленности для наплавки, гравировки, резки, сварки и других процессов. Основными преимуществами использования твердотельного лазера низкой мощности являются:

- возможность точно дозировать энергию, время воздействия, глубину

проплавления, ширину зоны воздействия;

- отсутствие термических поволок и минимизация зоны термического влияния вследствие быстрого локального нагрева и охлаждения;

- сравнительно невысокая стоимость оборудования [8-10].

Целью данного исследования является выявление возможности использования твердотельного лазера низкой мощности (до 50 Вт) для аддитивного формирования легкоплавких материалов методом частичного оплавления. Частичное оплавление необходимо для того, чтобы была возможность сплавлять большое количество слоев без потери формы заготовки. Задачей эксперимента является выявление режимов аддитивного формообразования твердотельным лазером, при котором происходит частичное оплавление предыдущего и последующего слоев.

Материалы и методы

Для эксперимента были использованы заготовки из олова диаметром 1 мм в связи с тем, что данный материал имеет невысокую стоимость, хорошую обрабатываемость, сохраняет форму после укладки и сравнительно низкую температуру плавления [7, 11].

Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования. Суть экспериментальных исследований заключалась в выявлении элементов режимов образования твер-

дотельным лазером изделий из легкоплавких материалов, а также построение диапазонов регулирования параметров, которые обеспечивают частичное оплавление предыдущего и последующих слоев. К таким элементам режимов относятся: мощность лазера P , Вт; скорость перемещения луча, мм/с; фокусное расстояние, мм. Эксперименты будут проводиться без применения защитного газа. Оборудование, которое будет использовано: лазер твердотельный (иттербиевый) максимальной мощностью 50 Вт (производство Россия). Зона воздействия лазера была подобрана исходя из диаметра заготовки и составляет его половину – 0,5 мм. Для вывода общего режима было решено использовать одну заготовку диаметром 1 мм для большей наглядности оплавления поверхности.

Результатом экспериментов является подтверждение возможности исполь-

зования твердотельного лазера низкой мощности (до 50 Вт) для аддитивного формирования легкоплавких материалов методом частичного оплавления, а также получения элементов режима формообразования без полного расплавления с сохранением формы заготовки [12-14].

Результаты и их обсуждение

Первая серия экспериментов включает в себя зависимость оплавления от фокусного расстояния и мощности лазера. Скорость перемещения лазера была неизменна – 50 мм/с. Результаты эксперимента представлены на рис. 1. В частности, заштрихованная область означает числовое значение режимов элементов формообразования, такое, как фокусное расстояние и мощность, при которых обеспечивается частичное оплавление последующего и предыдущего слоя.

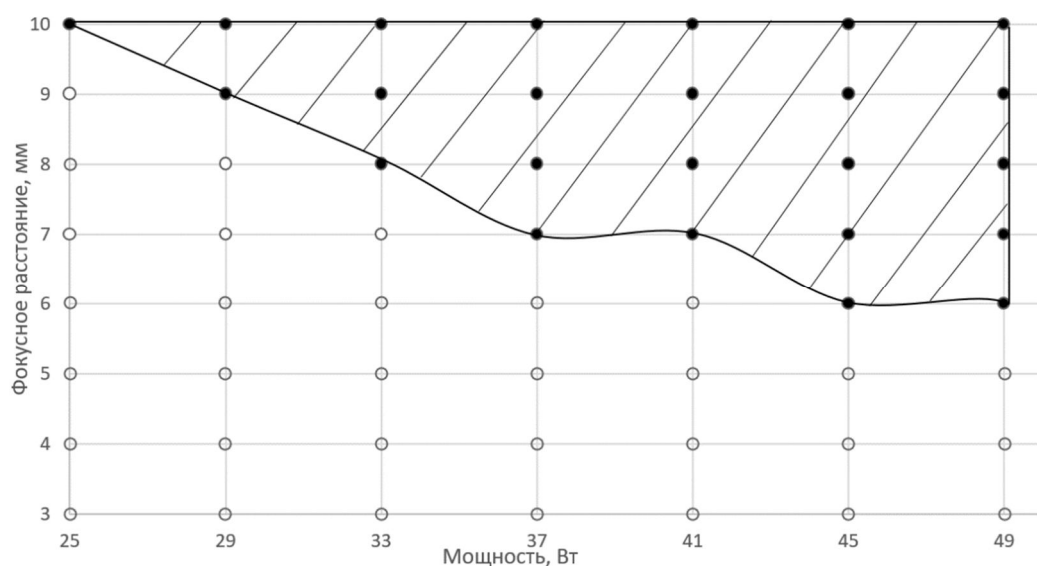


Рис. 1. Режимы аддитивного формообразования, обеспечивающие частичное оплавление последующего и предыдущего слоя

Fig. 1. Additive shaping modes that provide partial melting of the next and previous layer

В нижней части рис. 1 при фокусном расстоянии меньше 5 мм наблюдалось испарение металла. На рис. 2 показано расплавление при фокусном расстоянии + 5 мм и мощности 45 Вт. Наиболее удовлетворительные результаты расплавления достигнуты при мощности 40-50 Вт и наибольшем для данного эксперимента фокусном расстоянии.

Следующая серия экспериментов была направлена на выявление зависимости расплавления от скорости перемещения и фокусного расстояния. Исходя из результатов прошлой серии опытов мощность установлена равной 40 Вт. Результаты эксперимента представлены на рис. 3. В частности, заштрихованная область означает числовое значение режимов элементов форм-

мообразования, такое, как скорость перемещения и фокусное расстояние, при которых обеспечивается частичное оплавление последующего и предыдущего слоя.

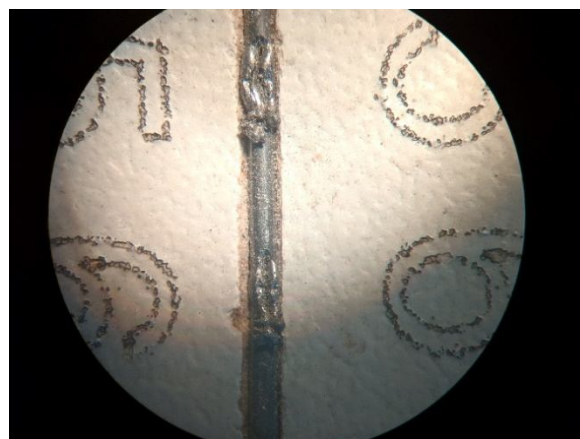


Рис. 2. Внешний вид оплавления при высокой мощности и фокусном расстоянии +5 мм

Fig. 2. Appearance of reflow at high power and focal length +5 mm

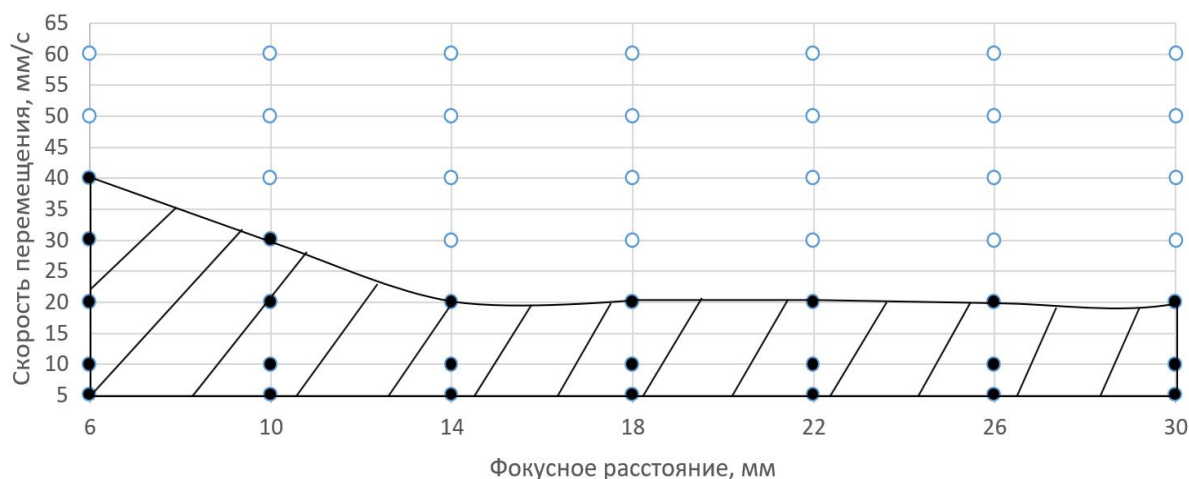


Рис.3. Режимы аддитивного формообразования, обеспечивающие частичное оплавление последующего и предыдущего слоя

Fig. 3. Additive shaping modes that provide partial melting of the next and previous layer

В данной серии экспериментов при фокусном расстоянии до 6 мм наблюдался прожиг заготовки. При дальнейшем увеличении фокусного расстояния

поверхностное оплавление заготовки становилось более равномерным и точным. При высокой скорости перемещения температурное влияние слишком

мало для плавления на установленной мощности, как видно на рис. 4 и в верхней части графика. Фокусное расстояние, необходимое для частичного расплавления заготовки, находится в диапазоне 20-30 мм при скорости перемещения 5-20 мм/с.

В третьей серии экспериментов за основу взято фиксированное фокусное расстояние, а изменяются мощность и скорость перемещения. Исходя из результатов прошлой серии опытов фокусное расстояние установлено 20 мм. Результаты эксперимента представлены на рис. 5. В частности, заштрихованная область означает числовое значение режимов элементов формообразования, такое, как мощность и скорость пере-

мещения, при которых обеспечивается частичное оплавление последующего и предыдущего слоя.

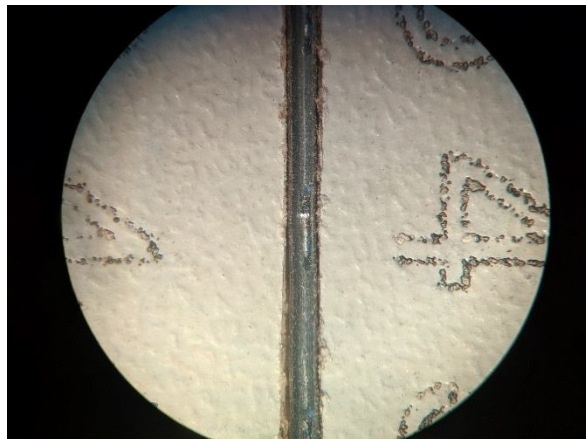


Рис. 4. Внешний вид оплавления при низкой мощности лазера и высокой скорости перемещения

Fig. 4. Appearance of reflow at low laser power and high travel speed

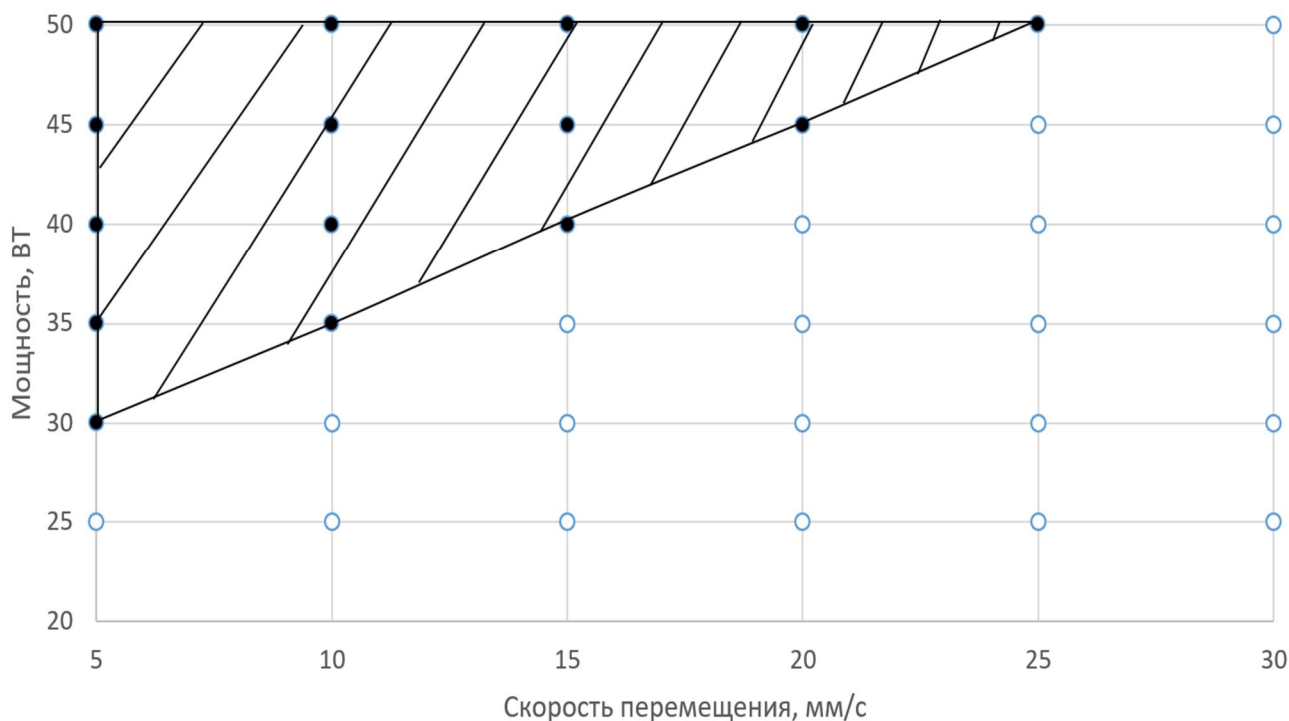


Рис. 5. Режимы аддитивного формообразования, обеспечивающие частичное оплавление последующего и предыдущего слоя

Fig. 5. Additive shaping modes that provide partial melting of the next and previous layer

При высокой скорости перемещения и низкой мощности лазерного луча энергии для расплавления недостаточно. Как видно из графика, параметры, необходимые для частичного расплавления заготовки, находятся в следующих пределах:

- мощность: от 35 до 45 Вт;
- скорость перемещения: от 5 до 15 мм/с.

На рис. 6 показан внешний вид искомого оплавления при параметрах, указанных выше. Заготовка равномерно оплавляется без прожигов, и при этом сохраняет первоначальную форму.

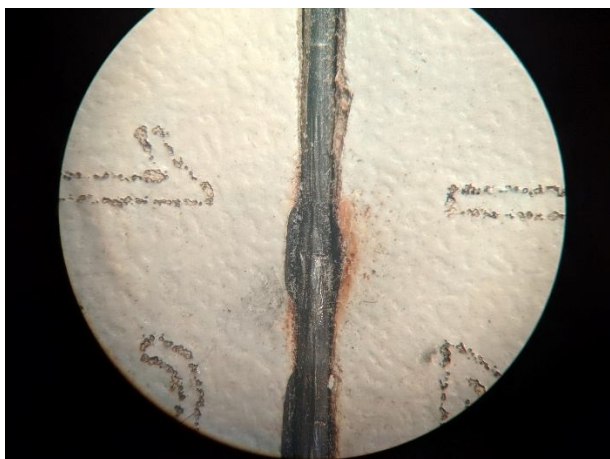


Рис. 6. Внешний вид оплавления при мощности лазера 45 Вт и скорости перемещения 10 мм/с

Fig. 6. Appearance of reflow at a laser power of 45 W and a travel speed of 10 mm / s

В ходе дальнейшего анализа на основе результатов проведенных экспериментов были установлены режимы для формообразования аддитивным методом изделий из легкоплавких матери-

алов (материал – олово, диаметр заготовки – 1 мм).

После проведения серии опытов, целью которых было формообразование аддитивным методом без полного расплавления, был выведен точный режим:

- ширина линии лазерного луча: 0,5 мм;
- скорость: 9 мм/с;
- мощность: 38 Вт;
- фокусное расстояние: +25 мм от уровня стола.

Выводы

Таким образом, подтверждена возможность применения твердотельного (иттербиевого) лазера низкой мощности (максимальная мощность 50 Вт) для решения задачи формообразования аддитивными методами. Проведены серии экспериментов и были выявлены зависимости режимов оплавления проволоки от изменения параметров (мощности, Вт; фокусного расстояния, мм; скорости перемещения, мм/с). На основе проведенных экспериментов были получены режимы формообразования аддитивным методом без полного расплавления легкоплавких материалов. Для дальнейших исследований возможности формообразования аддитивным методом других металлов (таких, как медь или алюминий), необходимо модернизировать оборудование, создать защитную атмосферу в зоне расплава, а также увеличить мощность лазера.

Список литературы

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И.Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки / под. ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. С. 641.
2. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Особенности формирования структуры и микрогеометрии поверхности лазерных наплавов с использованием многоканального CO₂ - лазера // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №11 (143). С. 19-22.
3. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Тарлыков В.А. Основы лазерной техники. Л.: Машиностроение, 1990. С. 316.
4. Лазерная наплавка как перспективный метод упрочнения штамповой оснастки / Ф. Берtrand, И. Мовчан, М.Н. Самодурова, Н.С. Джигун // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 44-52.
5. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных и исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С.664.
6. Промышленная лазерная наплавка: современное состояние и тенденции / Е.М. Биргер, Г.В. Москвитин, А.Н. Поляков, В.Е. Архипов // Сварочное производство. 2009. № 9. С. 32-42.
7. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Чжан Цин. Формирование наплавленных слоев с использованием лазерного импульсно-периодического излучения // Сварочное производство. 2007. № 8. С. 18-21.
8. Технологические особенности формирования структуры лазерных наплавов с использованием излучения мощных волоконных лазеров / Р.Н. Корешков, В.Н. Петровский, П.С. Джумаев, В.И. Польский // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 5. С. 30-34
9. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А. Лазерная и криогенная обработка быстрорежущей стали. Тверь, 2014. 96 с.
10. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным CO₂-лазером / Л.Е. Афанасьева, И.А. Барабонова, Е.В. Ботянов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8 (104). С. 10-13.
11. Югов В.И. Лазерное термоупрочнение – высокоэффективная технология ресурсосбережения // Лазер-Информ. 2008. № 23. С. 1-8.
12. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application. Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2005. 576 p.
13. Thivillon L., Pervushin D., Bertrand Ph., Smurov I. Industrial technology of laser assisted direct metal deposition // International Thermal Spraying Conference (ITSC-2008), Maastricht, June 2-4, 2008.
14. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser cladding. Boca Raton: CRS Pres, 2005. 280 p.

References

1. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ. Moscow, 2006. 641 p. (In Russ.).
2. Yugov V. I., Afanasyeva L. E., Novoselova M. V. Osobennosti formirovaniya struktury i mikrogeometrii poverkhnosti lazernykh naplavok s ispol'zovaniem mnogokanal'nogo CO₂ - lazera [Features of formation of structure and microgeometry of the surface of laser surfacing using a multichannel CO₂ laser]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2016, no. 11 (143), pp. 19-22 (In Russ.).
3. Krylov K. I., Prokopenko V. T., Tarlykov V. A. *Osnovy lazernoi tekhniki* [Fundamentals of laser technology]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990. 316 p. (In Russ.).
4. Bertrand F., Movchan I., Samodurova M. N., Dzhigun N. S. Lazernaya naplavka kak perspektivnyi metod uprochneniya shtampovoi osnastki [Laser cladding as a promising hardening method of stamping equipment]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 44-52 (In Russ.).
5. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nykh i issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental and applied research and developments]. Edited by V. Ya. Panchenko. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. (In Russ.).
6. Birger E. M., Moskvitin G. V., Polyakov A. N., Arkhipov V. E. Promyshlennaya lazernaya naplavka: sovremennoe sostoyanie i tendentsii [Industrial laser surfacing: current state and trends]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2009, no. 9, pp. 32-42 (In Russ.).
7. Grigoryants A. G., Misyurov A. I., Zhang Qing. Formirovanie naplavlennykh sloev s ispol'zovaniem lazernogo impul'sno-periodicheskogo izlucheniya [Formation of deposited layers using laser pulse-periodic radiation]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2007, no. 8, pp. 18-21 (In Russ.).
8. Koreshkov R.N., Petrovsky V. N., Dzhumaev P. S., Polsky V. I. Tekhnologicheskie osobennosti formirovaniya struktury lazernykh naplavok s ispol'zovaniem izlucheniya moshchnykh volokonnykh lazerov [Technological features of forming the structure of laser surfacing using high-power fiber laser radiation, metal Science and heat treatment of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2014, no. 5, pp. 30-34 (In Russ.).
9. Afanasieva L. E., Barabanov I. A. *Lazernaya i kriogennaya obrabotka bystrorezhushchei stali* [Laser and cryogenic treatment of high speed steel]. Tver, 2014. 96 p. (In Russ.).
10. Afanasyeva L. E., Barabanova I. A., Botyanov E. V. et al. Strukturnye fazovye prevrashcheniya v bystrorezhushchei stali pri lazernoi zakalke s oplavlaniem poverkhnosti

mnogokanal'nym CO₂-lazerom [Structural phase transformations in high-speed steel during laser quenching with surface reflow with a multi-channel CO₂ laser]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2013, no. 8 (104), pp. 10-13 (In Russ.).

11. Yugov V. I. Lazernoe termouprochnenie - vysokoeffektivnaya tekhnologiya resursosberezheniya [Laser thermal strengthening - a highly efficient resource-saving technology]. *Laser-inform = Laser-inform*, 2008, no. 23, pp. 1-8 (In Russ.).

12. Ion J. C. *Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application*. Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 576 p.

13. Thivillon L., Pervushin D., Bertrand Ph., Smurov I. Industrial technology of laser assisted direct metal deposition. *International Thermal Spraying Conference (ITSC-2008)*, Maastricht, June 2-4, 2008.

14. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. *Laser cladding*. Boca Raton: CRS Pres, 2005. 280 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Куц Вадим Васильевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-1359>

Vadim V. Kuts, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-1359>

Меркулов Вадим Сергеевич, аспирант, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mikul46@yandex.ru

Vadim S. Merkulov, Post-Graduate Student Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mikul46@yandex.ru

Гречухин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Alexander N. Grechukhin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28>

Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров

Е.В. Артамонов¹, Д.В. Васильев¹, В.В. Воронин¹ ✉

¹ Тюменский индустриальный университет
ул. Володарского 38, г. Тюмень 625000, Российская Федерация

✉ e-mail: vladislavalbus@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Работа посвящена доказательству, что вибрация державки режущего инструмента несет в себе информацию о текущей силе резания и виде сходящей стружки, а спектральный анализ виброускорения позволит извлечь данную информацию в полном объеме, что имеет потенциал для проведения оперативной диагностики режима резания и позволит, путем динамического корректирования параметров, соблюдать условия наилучшей обрабатываемости. Информация о виде стружки позволяет оценить температуру резания, как определяющий фактор стружкообразования, которую весьма проблематично измерить напрямую с достаточной точностью.

Методы. В работе логически обосновывается научное предположение о возможности оперативной диагностики процесса токарной обработки с помощью анализа спектра виброускорения державки режущего инструмента. Для подтверждения состоятельности предположения проведен натурный эксперимент. Предположение об изменении спектра следует из анализа причин, влияющих на величину проекций силы резания, а именно, вертикальной составляющей. Величина этой проекции определяется давлением стружки на переднюю поверхность резца.

Результаты. Проведена серия экспериментов по регистрации изменений спектрального состава вибрации режущего инструмента. Было доказано, что вибрация действительно несет информацию об основных параметрах процесса резания, то есть при изменении вида стружки качественно меняется состав спектра виброускорения. Адекватность полученных временных сигналов вертикальной составляющей виброускорения подтверждается их точным сходством с зависимостями вертикальной составляющей силы резания, поскольку эти характеристики связаны как причина и следствие.

Заключение. Спектральный анализ вибрации может стать основой оперативной диагностики токарной обработки металлов и лечь в основу Адаптивной системы управления режимами резания в станках с числовым программным управлением.

Ключевые слова: вибрация; спектральный анализ; оперативная диагностика; токарная обработка.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Воронин В.В. Диагностика токарной обработки металлов резанием посредством анализа вибрационных параметров // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 18-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28>.

Поступила в редакцию 15.10.2020

Подписана в печать 06.11.2020

Опубликована 30.12.2020

© Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Воронин В.В., 2020

Rapid Diagnostic Test of Metal Turning Using Vibration Parameters Analysis

Evgeny V. Artamonov¹, Dmitriy V. Vasil'yev¹, Vladislav V. Voronin¹ ✉

¹ Tyumen Industrial University
38 Volodarskogo str., Tyumen 625000, Russian Federation

✉ e-mail: vladislavalbus@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The work is devoted to the proof that the vibration of the cutting tool holder carries information about the current cutting force and the type of coming off chips, and the spectral analysis of vibration acceleration will allow to extract this information in full.

Methods. The work logically substantiates a scientific assumption about the possibility of prompt diagnostics of the turning process by analyzing the vibration acceleration spectrum of the cutting tool holder. To confirm the consistency of the assumption, a full-scale experiment was carried out.

Results. A series of experiments was carried out to register changes in the spectral composition of the vibration of the cutting tool. It has been proven that vibration really carries information about the basic parameters of the cutting process.

Conclusion. Spectral analysis of vibration can become the basis for operational diagnostics of metal turning by cutting and form the basis of the Adaptive System for Controlling Cutting Conditions in numerically controlled machines.

Keywords: vibration; spectral analysis; operational diagnostics; turning

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Artamonov E.V., Vasil'yev D. V., Voronin V. V. Rapid Diagnostic Test of Metal Turning Using Vibration Parameters Analysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 18-28 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-18-28>.

Received 15.10.2020

Accepted 06.11.2020

Published 30.12.2020

Введение

Обработка металлов резанием - многогранный процесс, который требует набора знаний из обширного списка технических наук, и вибродиагностика является одним из них. На практике вибрация является неотъемлемой частью механической обработки и полностью исключить ее невозможно, поскольку каждый узел станка и операция

технологического процесса вносят свой вклад в общий вибрационный фон.

Негативное влияние колебаний известно: быстрый износ инструмента, снижение качества поверхности, увеличение энергопотребления. Однако можно использовать вибрацию и как диагностический параметр, поскольку анализ вибрации может дать информацию о процессах, вызвавших ее.

С одной стороны, очевидно, вибрация – вредный фактор, разрушающее действие которого отрицательно сказывается на ресурсе режущего инструмента (РИ), механике и электронике станка, ухудшает условия труда цехового персонала, оказывая негативное влияние на здоровье человека. Контроль уровня вибрации производится на всех этапах ответственных и особо ответственных операций и технических процессов на производстве.

С другой стороны, вибрация – информативный параметр. От нее нельзя избавиться, но можно использовать как источник диагностических данных. Цель данного исследования – доказать, что вибрация державки режущего инструмента несет в себе информацию о текущей силе резания и виде сходящей стружки, а спектральный анализ виброускорения позволит извлечь данную информацию в полном объеме. Информация о виде стружки позволяет узнать

температуру резания, как определяющий фактор стружкообразования, которую весьма проблематично измерить напрямую с достаточной точностью [1-18].

Материалы и методы

Значительная польза от такого рода диагностики ожидается при механической обработке металлов. В частности, при обработке жаропрочных сплавов имеет место диапазон, в котором наблюдается минимальная величина износа и максимальная стойкость инструмента – максимальное значение коэффициента обрабатываемости. При входе режима обработки в этот диапазон происходит изменение вида стружки со сливной в элементную, что изменяет тип и величину нагрузки на РИ, следовательно, изменятся и состав спектра возбуждаемой вибрации. На рис. 1 приведена классификация стружки по И.А. Тиме. Выделены следующие виды: сливная, суставчатая, элементная, надлома.

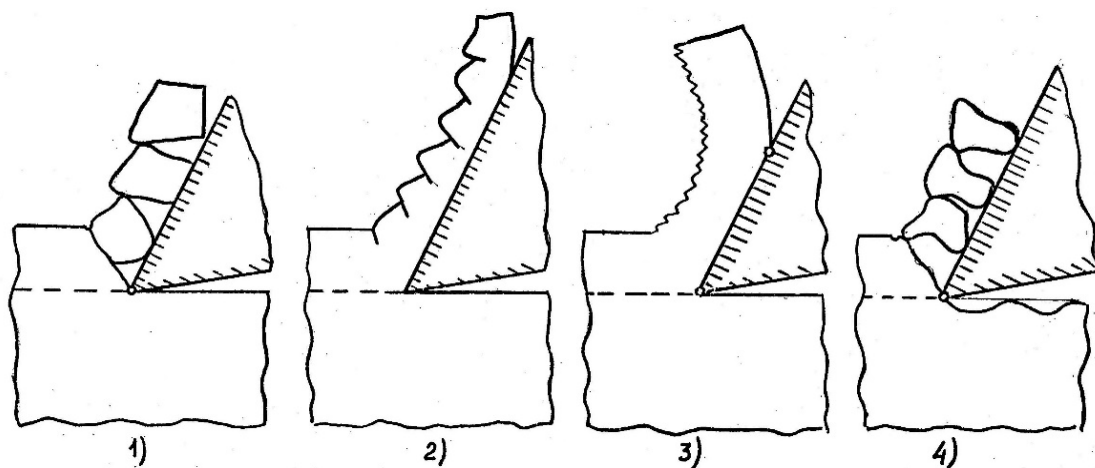


Рис. 1. Классификация видов стружки (И.А. Тиме): 1 – элементная; 2 – суставчатая; 3 – сливная; 4 – надлома

Fig. 1. Classification of shavings types (I.A.Time): 1 – elemental; 2 – articular; 3 – drain; 4 – breakage

Сливная стружка непрерывна, элементная состоит из отдельных «элементов» схожей формы и размера, несвязанных между собой. Границу, отделяющую образовавшийся элемент от срезаемого слоя, называют поверхностью сдвига. Суставчатая стружка является промежуточным звеном, плоскость сдвига между элементами только намечалась, она хорошо различима, но не пронизывает стружку по всей толщине.

Для каждого вида стружки характерна различная площадь контакта с передней поверхностью резца, причем для элементной и суставчатой прослеживается периодичность в воздействии на резец, в то время как сливная стружка предполагает стабильное, безотрывное нагружение. Ожидается, что переход из сливной, безотрывно скользящей по передней поверхности резца, стружки в суставчатую, состоящую из слабо связанных между собой частиц, сопровождается изменением спектрального состава колебаний режущего инструмента. Предположение об изменении спектра следует из анализа причин, влияющих на величину проекций силы резания, а именно, вертикальной составляющей P_z . Величина этой проекции определяется давлением стружки на переднюю поверхность резца.

Отслеживание этих изменений имеет потенциал для проведения оперативной диагностики режима резания и позволит, путем динамического коррек-

тирования параметров, соблюдать условия наилучшей обрабатываемости.

Экспериментальное исследование заключается в сборе данных о виде сходящей стружки, записи сигналов составляющей силы резания P_z и вертикальной составляющей виброускорения a_z в процессе резания (рис. 2). Эксперимент повторяется до тех пор, пока не будут получены параметры режима для ярко выраженных сливной и суставчатой стружек.

Затем, синтез полученной информации дает спектры виброускорения и силы резания в ожидаемом диапазоне частот образования сегментов суставчатой стружки.

Частота образования сегментов суставчатой стружки f определяется размером элемента Δx и скоростью резания V :

$$f = \frac{V}{\Delta x}, \quad (1)$$

где f – расчетная частота образования элементов [Гц]; V – скорость резания, [м/с]; Δx – расстояние между гребешками (или впадинами) суставчатой стружки [7].

$$V = \pi \cdot D \cdot n, \quad (2)$$

где D – диаметр заготовки, [м]; n – число оборотов в секунду, [Гц].

Результаты и их обсуждение

Измерение Δx проводилось по фотографиям с цифрового микроскопа. Величина Δx принята равной среднему арифметическому по 10 измерениям (рис. 3).

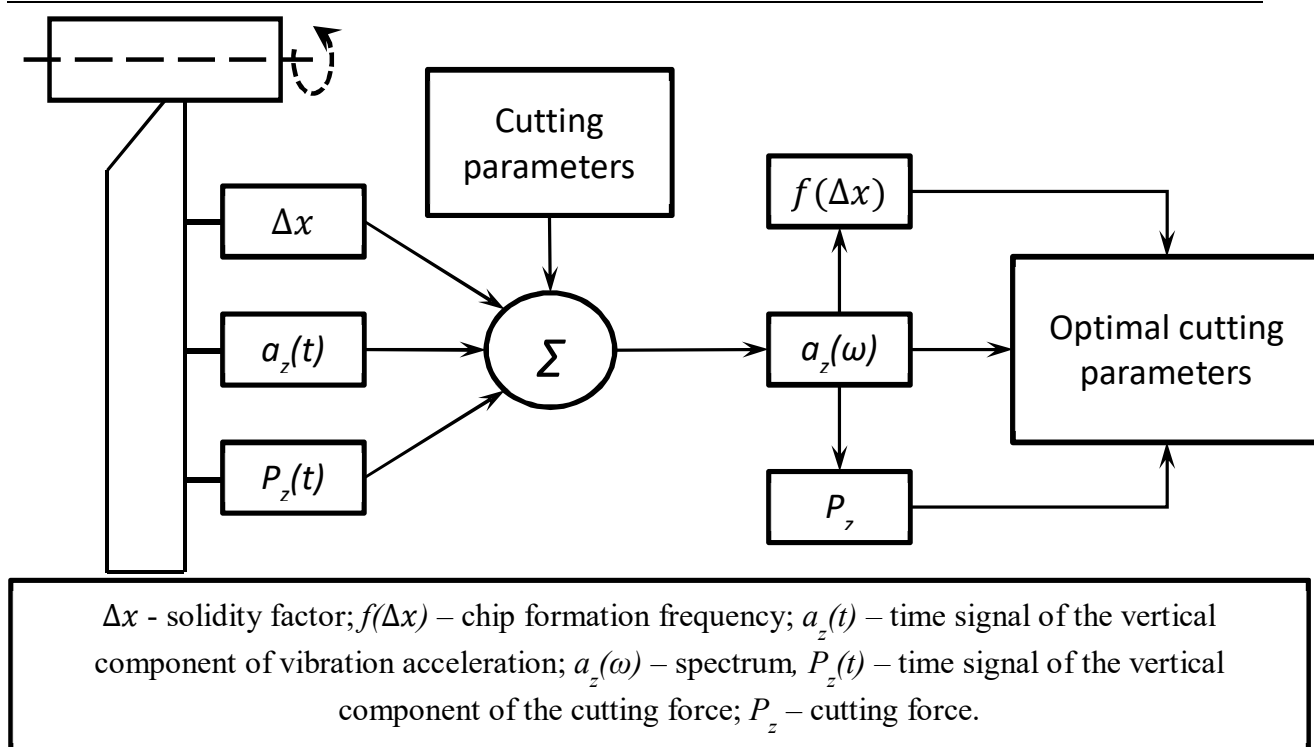


Рис. 2. Методика проведения эксперимента

Fig. 2. Technique of the experiment

Изменения в спектре необходимо искать в окрестностях расчетной частоты стружкообразования (сегментообразования) f , для этого посредством цифровой

обработки данных, а именно полосового КИХ фильтра, выделим область $f_{low} > f > f_{high}$ и сравним спектры, относящиеся к сливной и суставчатой стружкам.

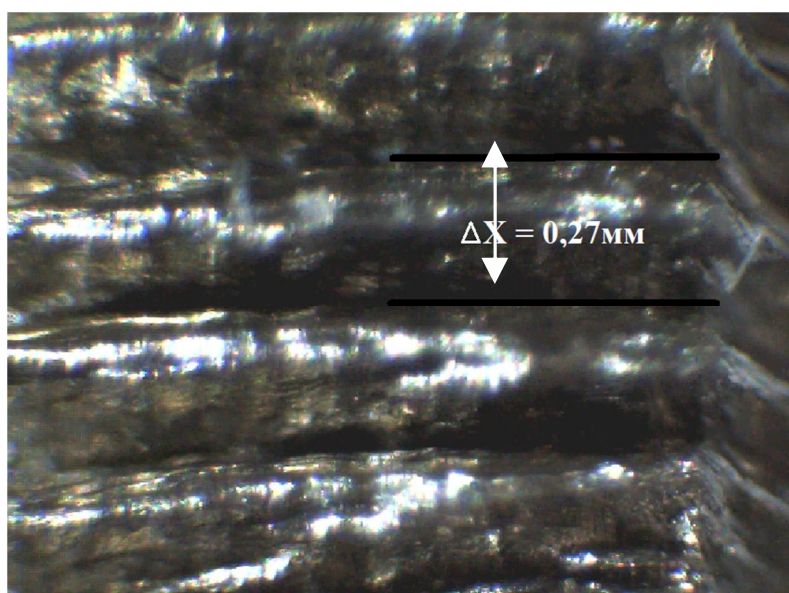


Рис. 3. Фото суставчатой стружки. Сталь 1X18H9T. Режущий инструмент T15K6. $S = 0.39$ мм/об., $t = 1$ мм, $D = 54$ мм

Fig. 3. Articular shavings. Steel 1X18H9T. Cutting tool T15K6. $S = 0.39$ мм/об., $t = 1$ мм, $D = 54$ мм

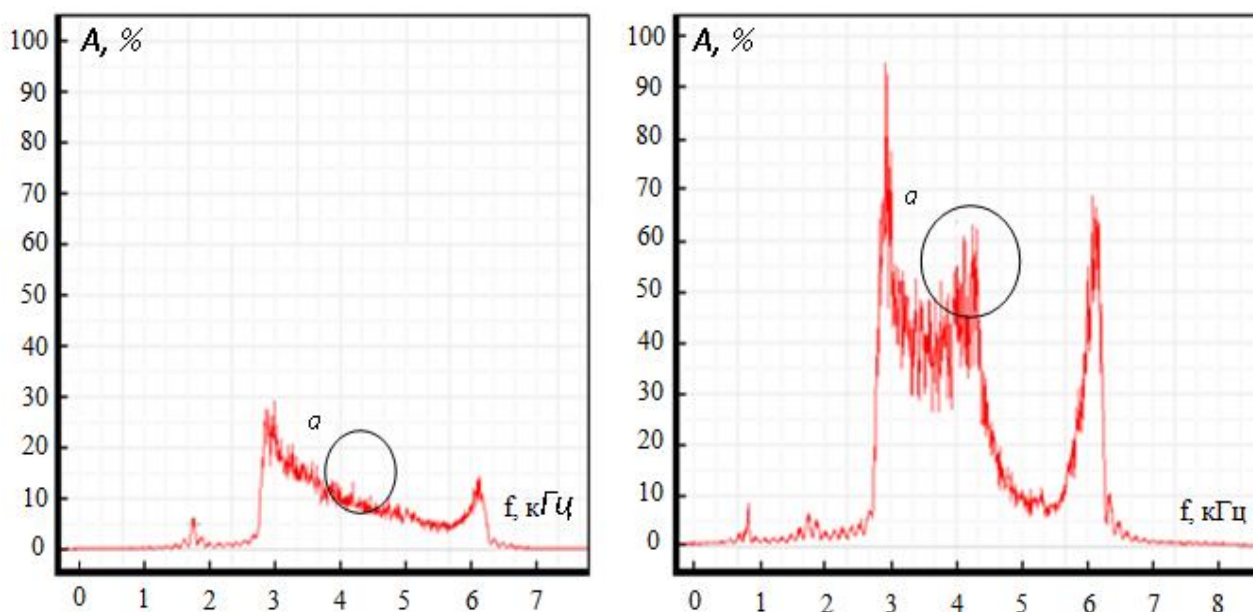


Рис. 4. Сравнение спектров

Fig. 4. Comparison of spectra

На рис. 4 приведены два спектра вертикальной составляющей виброускорения державки режущего инструмента. Левый соответствует точению со сходящей сливной стружкой: $n = 100$ об/мин; $S = 0,39$ мм/об.; $t = 1$ мм; $D = 54$ мм; правый спектр – с суставчатой стружкой: $n = 400$ об/мин; $S = 0,39$ мм/об.; $t = 1$ мм, $D = 54$ мм. Отчетливо видно наличие пика в области a на спектре справа на ожидаемой частоте стружкообразования f , в то время как на левом спектре пики отсутствуют. Расчет средней частоты сегментообразования приведен ниже:

$$f = \frac{\pi D n}{\Delta x} = \frac{\pi * 54 * 400}{0,27 * 60} = 4189 \text{ Гц.} \quad (3)$$

Выражение (3) определяет среднюю частоту сегментообразования, поскольку в расчет берется средняя величина Δx . В реальном спектре наблюдается группа пиков, соответствующих ряду

наиболее часто встречающихся значений Δx . Девиация частоты оценивается предельным значением в 300 Гц в момент изменения вида стружки, далее величина отклонения уменьшается. Однако данное наблюдение требует дальнейшей проверки, поскольку необходима более обширная база экспериментальных данных.

Таким образом, вибрация державки резца определенно несет в себе информацию о виде стружки, образующейся в момент наблюдения.

Чтобы подтвердить адекватность снятого вибросигнала необходимо сравнить его с силой резания, поскольку именно она является вынуждающей силой исследуемых осцилляций.

На рис. 5 представлены спектр вертикальной составляющей силы резания P_z и спектр вертикальной составляющей виброускорения a_z .

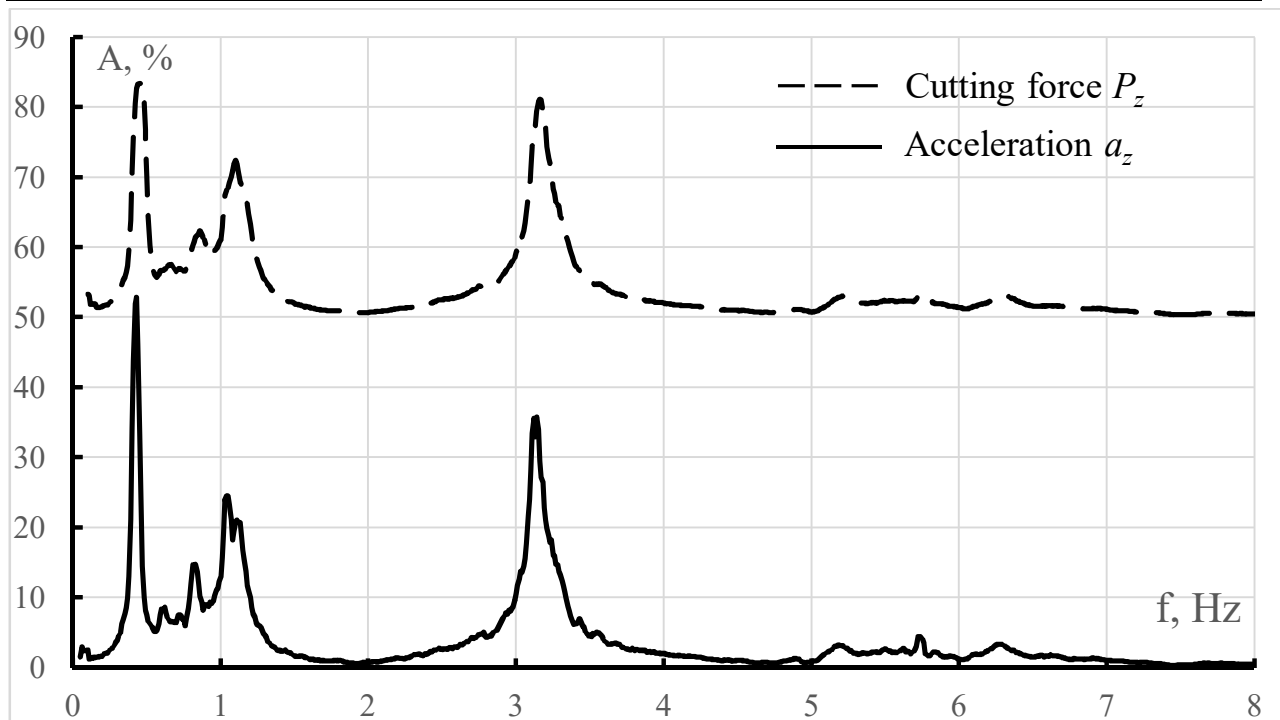


Рис. 5. Сравнение спектров виброускорения и составляющей силы резания P_z

Fig. 5. Comparison of the spectra vibration acceleration and the cutting force component P_z

Они качественно повторяют друг друга на всех наблюдаемых частотах, поскольку связаны как причина и следствие.

Выводы

Таким образом, было доказано, что вибрация действительно несет информа-

цию об основных параметрах процесса резания. Следовательно, спектральный анализ вибрации может стать основой оперативной диагностики токарной обработки металлов резанием и лечь в основу Адаптивной системы управления режимами резания в станках с числовым программным управлением.

Список литературы

1. Артамонов Е.В., Васильев Д.В., Утешев М.Х. Формирование условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании // СТИН. 2016. № 9. С. 21-24.
2. Бражкин Ю.А. Виброконтроль станочного оборудования и технологических процессов обработки металлов // Известия МГТУ. 2007. №2 (4).
3. Васин Л. А., Васин С. А., Кошелева А. А. Эмерджентный подход к созданию виброустойчивых режущих инструментов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №11-2.

4. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. Серия «Библиотека инструментальщика». М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
5. Взаимосвязь явлений при резании металлов и температурный фактор / Е. В. Артамонов [и др.]. Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. 152 с.
6. Вибродиагностика : моногр. / Г. Ш. Розенберг, Е. З. Мадорский [и др.]; под ред. Г.Ш. Розенберга. СПб.: ПЭИПК, 2003. 284 с.
7. Динамический виброгаситель с системой автоматической настройки на частоту колебаний / А. Н. Гаврилин, П. С. Рожков, О. О. Ангаткина, Б. Б. Мойзес // Известия ТПУ. 2011. №2.
8. Голосной С. В., Чукарин А. Н. Экспериментальные исследования спектров шума и вибрации копировально-фрезерных станков // Вестник ДГТУ. 2016. №4 (87).
9. Григорьев С. Н., Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Диагностика автоматизированного производства. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
10. Завгородский В.И., Маслов А.Р. Управление виброустойчивостью технологической системы // Комплект: ИТО. 2009. № 10. С. 22–25.
11. Ивович В.А., Онищенко В.Я. Защита от вибраций в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
12. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования / Е. Н. Ишметьев, Д. В. Чистяков, А. Н. Панов, Е. Э. Бодров, М. Вrabел // ЭС и К. 2019. №1 (42).
13. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Маслов А. Р. Станки с ЧПУ с системами диагностики // Комплект: ИТО. 2010. № 6. С. 34–35.
14. Козочкин М. П. Особенности вибраций при резании материалов // СТИН. 2009. № 1. С. 29–35.
15. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Оперативная диагностика при металлообработке – проблемы и задачи // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. №3.
16. Литвинчук А.Ю. Анализ спектра вибрации режущего инструмента // Решетневские чтения. 2011. №15.
17. Матюшкова О. Ю., Тэттэр В. Ю. Современные методы виброакустического диагностирования // Омский научный вестник. 2013. №3 (123).
18. Метод формирования условий максимальной обрабатываемости жаропрочных материалов путем высокотемпературного охрупчивания при резании / Е. В. Артамонов [и др.]. Тюмень : ТИУ, 2016. 181 с.
19. Несмеянов Е. А. Демпфирование колебаний несущей системы многошпиндельных фрезерных станков // Вестник ВГТУ. 2010. №3.

20. Хоменко А. П., Елисеев С. В., Засядко А. А. Формирование концепции вибродиагностических методов неразрушающего контроля. Современные представления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. №1.

References

1. Artamonov E.V., Vasil'yev D.V., Uteshev M.Kh. Formirovanie uslovii maksimal'noi obrabatyvaemosti zharoprochnykh materialov putem vysokotemperaturnogo okhrupchivaniya pri rezanii [Formation of conditions for maximum machinability of heat-resistant materials by high-temperature embrittlement during cutting]. *STIN*, 2016, no. 9, pp. 21-24 (In Russ.).

2. Brazhkin Yu.A. Vibrokontrol' stanochnogo oborudovaniya i tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov [Vibration control of machine tools and technological processes of metal processing]. *Izvestiya MGTU = Proceedings of the MSTU*, 2007, no. 2 (4) (In Russ.).

3. Vasin L.A., Vasin S.A., Kosheleva A.A. Emerdzhentnyi podkhod k sozdaniyu vibroustoichivyykh rezhushchikh instrumentov [Emergent approach to creation of vibration-resistant cutting tools]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the TSU. Technical Science*, 2014, no.11-2 (In Russ.).

4. Vasin S.A. *Prognozirovanie vibroustoichivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii. Seriya "Biblioteka instrumental'shchika"* [Prediction of tool vibration resistance at turning and milling. Set "Library of Tool Maker"]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 384 p. (In Russ.).

5. Artamonov E. V. [and others]. *Vzaimosvyaz' yavlenii pri rezanii metallov i temperaturnyi faktor* [The relationship of phenomena when cutting metals and the temperature factor]. Tyumen, 2014. 152 p. (In Russ.).

6. Rosenberg G. Sh., Madorsky E. Z. [and others]. *Vibrodiagnostika* [Vibration diagnostics]. St. Petersburg, PEIPK Publ., 2003. 284 p. (In Russ.).

7. Gavrilin A. N., Rozhkov P. S., Angatkina O. O., Moyzes B. B. Dinamicheskii vibrogasitel' s sistemoi avtomaticheskoi nastroyki na chastotu kolebaniy [Dynamic vibration damper with a system of automatic tuning to the vibration frequency]. *Izvestiya TPU = Proceedings of the TSU*, 2011, no.2 (In Russ.).

8. Golosnoy, S.V., Chukarin, A.N. Eksperimental'nye issledovaniya spektrov shuma i vibratsii kopiroval'no-frezernykh stankov [Experimental studies on noise and vibration spectra of copy milling machines]. *Vestnik DGTU = Vestnik DonSTU*, 2016, no.4 (87) (In Russ.).

9. Grigoriev S. N., Kozochkin M. P., Sabirov F. S. *Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva* [Diagnostics of automated production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011. 600 p. (In Russ.).

10. Zavgorodsky V.I., Maslov A.R. Upravlenie vibroustoichivost'yu tekhnologicheskoi sistemy [Vibration resistance control of the technological system]. *Komplekt: ITO = Complete Set: ITO*, 2009, no. 10, pp. 22-25 (In Russ.).
11. Iovovich V. A., Onishchenko V. Ya. Zashchita ot vibratsii v mashinostroenii [Vibration protection in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 272 p. (In Russ.).
12. Ishmetiev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Sistemy vibrozashchity, vibrokontrolya i vibrodiagnostiki promyshlennogo oborudovaniya [Vibration protection, control and analysis systems for industrial application]. *Elektricheskie sistemy i komplekсы = Electrical Systems and Complexes*, 2019, no.1 (42) (In Russ.).
13. Kozochkin M. P., Sabirov F. S., Maslov A. R. Stanki s ChPU s sistemami diagnostiki [CNC machines with diagnostic systems]. *Komplekt: ITO = Complete Set: ITO*, 2010, no. 6, pp. 34–35 (In Russ.).
14. Kozochkin M.P. Osobennosti vibratsii pri rezanii materialov [Features vibrations when cutting materials]. *STIN*, 2009, no. 1, pp. 29-35 (In Russ.).
15. Kozochkin M.P., Sabirov, F.S. Operativnaya diagnostika pri metalloobrabotke – problemy i zadachi [operational diagnostics in metalworking - problems and tasks]. *Vestnik MGTU «Stankin» = Vestnik MSTU “Stankin”*, 2008, no. 3 (In Russ.).
16. Litvinchuk A. Yu. Analiz spektra vibratsii rezhushchego instrumenta [Analysis of vibration spectrum of cutting tool]. *Reshetnevskie chteniya = Reshetnev Readings*, 2011, no. 15 (In Russ.).
17. Matyushkova O.Yu., Tetter V.Yu. Sovremennyye metody vibroakusticheskogo diagnostirovaniya [Modern methods of vibroacoustic diagnostics]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 3 (123) (In Russ.).
18. Artamonov E.A. [and others]. *Metod formirovaniya uslovii maksimal'noi obrabatyvaemosti zharoprochnykh materialov putem vysokotemperaturnogo okhrupchivaniya pri rezanii* [Method of conditions forming for maximum workability of heat-resistant materials by high-temperature embrittlement during cutting]. Tyumen, 2016. 181 p. (In Russ.).
19. Nesmeyanov E.A. Dempfirovanie kolebaniy nesushchei sistemy mnogoshpindel'nykh frezernykh stankov [Damping fluctuations of bearing system many spindle of milling machine tools]. *Vestnik VGTU = Vestnik VSTU*, 2010, no.3 (In Russ.).
20. Khomenko A. P., Eliseev S. V., Zasyadko A. A. Formirovanie kontseptsii vibrodiagnosticheskikh metodov nerazrushayushchego kontrolya. Sovremennyye predstavleniya [Formation of the concept of vibrodiagnostic methods of non-destructive testing]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern Concepts. Modern technologies, System analysis, Modeling*, 2008, no. 1 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Артамонов Евгений Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Evgeny V. Artamonov, Dr. of Sci.
(Engineering), Professor, Head of the Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: artamonovev@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>

Васильев Дмитрий Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Станки и инструменты»,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: vasil'evdv@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Dmitriy V. Vasil'yev, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Machines
and Tools Department, Industrial University
of Tyumen, Tyumen, Russian Federation,
e-mail: vasil'evdv@tyuiu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7436-091X>

Воронин Владислав Вадимович, аспирант,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», г. Тюмень, Российская Федерация,
e-mail: vladislavalbus@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8398-740X>

Vladislav V. Voronin, Post-Graduate Student,
Industrial University of Tyumen,
Tyumen, Russian Federation,
e-mail: vladislavalbus@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8398-740X>

Исследование особенностей выбора способа прокладки тепловых сетей, влияющих на их энергоэффективность

Е.А. Бирюзова ¹✉, А.С. Глуханов ²

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
ул. 2-я Красноармейская 4, г. Санкт-Петербург 190005, Российская Федерация

² Университет ИТМО
Кронверкский пр. 49, г. Санкт-Петербург 197101, Российская Федерация

✉ e-mail: biryuzova@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Большинство трубопроводов тепловых сетей в нашей стране имеют значительный срок эксплуатации, превышающий 25 лет. Из-за применения морально и физически устаревших материалов тепловой изоляции, не обоснованного выбора способа прокладки тепловой сети, не отвечающих современным требованиям НТД, большой протяженности трубопроводов, при транспортировке теплоносителя теряется около 60% тепловой энергии. Вследствие чего, внедрение мероприятий по энергосбережению и повышение энергетической эффективности тепловых сетей, не требующих значительных капиталовложений, в настоящее время наиболее актуально.

Методы. В статье рассмотрен один из способов энергосбережения в системе теплоснабжения – за счет выбора наиболее эффективного способа прокладки трубопроводов. Выполнены тепловые расчеты, с учетом наличия различного оборудования тепловой сети, однотипных участков трубопроводов тепловой сети с применением одинакового материала тепловой изоляции при различных способах прокладки.

Результаты. В статье приведены результаты аналитического исследования требований, предъявляемых к выбору способа прокладки трубопроводов тепловых сетей, с целью систематизации и обобщения данных справочной и современной нормативной литературы, а так же обобщенные результаты проектных работ и рекомендаций экспертных организаций, что играет немаловажную роль при выборе площадки строительства, а так же выявлении факторов, позволяющих повысить энергоэффективность тепловых сетей. Одним из таких факторов является выбор наиболее эффективного способа прокладки трубопроводов.

Заключение. Всестороннее рассмотрение комплекса условий (геологических, климатических, конструктивных и других), в которых будут эксплуатироваться проектируемые трубопроводы тепловых сетей, позволяет выбрать наиболее эффективный способ прокладки, за счет применения которого возможно снижение потерь тепловой энергии на 50–80%.

Ключевые слова: способ прокладки трубопроводов; надземная прокладка; подземная канальная прокладка; подземная бесканальная прокладка; энергоэффективность; энергосбережение; потери теплоты.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Бирюзова Е.А., Глуханов А.С. Исследование особенностей выбора способа прокладки тепловых сетей, влияющих на их энергоэффективность // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 29-41. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-29-41>.

Поступила в редакцию 25.09.2020

Подписана в печать 19.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Studying the Features of Method Choice of Heat Networks Laying Which Affect Their Energy Efficiency

Elena A. Biryuzova ¹ ✉, Aleksander S. Glukhanov ²

¹ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
2 Krasnoarmeykaya str. 4, Saint-Petersburg 190005, Russian Federation

² ITMO University,
49 Kronverkskiy ave., Saint-Petersburg 197101, Russian Federation

✉ e-mail: biryuzova@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. Most of the heating network pipelines in our country have a significant service life exceeding 25 years. Due to the use of obsolete thermal insulation materials, not a reasonable choice of heat networks installation methods which not meet modern requirements of standards and technical documentation, long-haul pipelines, during the coolant transportation around 60% of heat energy is lost. As a result, the implementation of energy saving measures and improving the energy efficiency of heating networks that do not require significant investment is currently most relevant.

Methods. The paper considers one of the ways to save energy in the heat supply system by choosing the most effective method of pipelines laying. There have been performed thermal calculations, taking into account the availability of different equipment of the heat network, the same type of pipeline sections of the heat network using the same thermal insulation material for different laying methods.

Results. The given paper presents the results of an analytical study of the requirements for choosing a method for laying heating network pipelines in order to systematize and summarize the data of reference and modern regulatory literature, as well as generalized results of design work and recommendations of expert organizations, which plays a significant role in choosing a construction site, as well as identifying factors that can improve the energy efficiency of heat networks. One of these factors is the choice of the most effective method of pipelines laying.

Conclusion. A comprehensive review of the set of conditions (geological, climatic, structural and others) in which the projected heat network pipelines will be operating allows us to choose the most effective method of laying. Owing to that method, it is possible to reduce heat energy losses by 50-80%.

Keywords: pipelines laying method; above-ground pipe laying; subsurface canal pipe laying; underground trenchless pipe laying; energy efficiency; energy saving; heat loss.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Biryuzova E. A., Glukhanov A. S. Studying the Features of Method Choice of Heat Networks Laying Which Affect Their Energy Efficiency. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 29-41 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-29-41>.

Received 25.09.2020

Accepted 19.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

В случае необходимости решения задачи по выбору участка местности для строительства, а затем и эксплуатации зданий и сооружений, немаловажную роль в структуре затрат имеет обеспечение данного объекта инженерными ресурсами, такими, как водоснабжение, электроснабжение, газоснабжение и теплоснабжение^{1,2,3}. Учитывая климатические особенности нашей страны, одним из ключевых моментов при строительстве, а также реконструкции зданий и сооружений, является обеспечение их тепловой энергией.

Обеспечение объекта тепловой энергией возможно следующими способами:

– возможность подключения к существующей сети теплоснабжения (строительство магистрального тепло-

провода или реконструкция существующей сети);

– возможность использования природного газа в качестве топлива;

– строительство котельной на жидком или твердом топливе.

Алгоритм оценивания затрат на теплоснабжение представлен на рис. 1.

Вариант организации теплоснабжения оценивается по десятибалльной шкале:

1) подключение к существующей сети теплоснабжения – 10 баллов;

2) использование природного газа в качестве топлива – 8 баллов;

3) использование твердого или жидкого топлива – 5 баллов;

4) использование электроэнергии с целью получения тепла – 3 балла.

Возможность подключения к существующей сети определяет ресурсоснабжающая организация.

При организации теплоснабжения объекта следует также учитывать способ прокладки и материал труб.

Материалы и методы

В соответствии с требованиями НТД^{1,2,3} трубопроводы тепловых сетей прокладываются, как правило, подземно бесканально или в каналах.

¹ СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. М.: Минрегион России, 2012.

² СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. М.: Минрегион России, 2012.

³ РМД 41-11-2012. Устройство тепловых сетей в Санкт-Петербурге. СПб.: ЗАО «Инженерная ассоциация «Ленстройинжсервис», 2012.

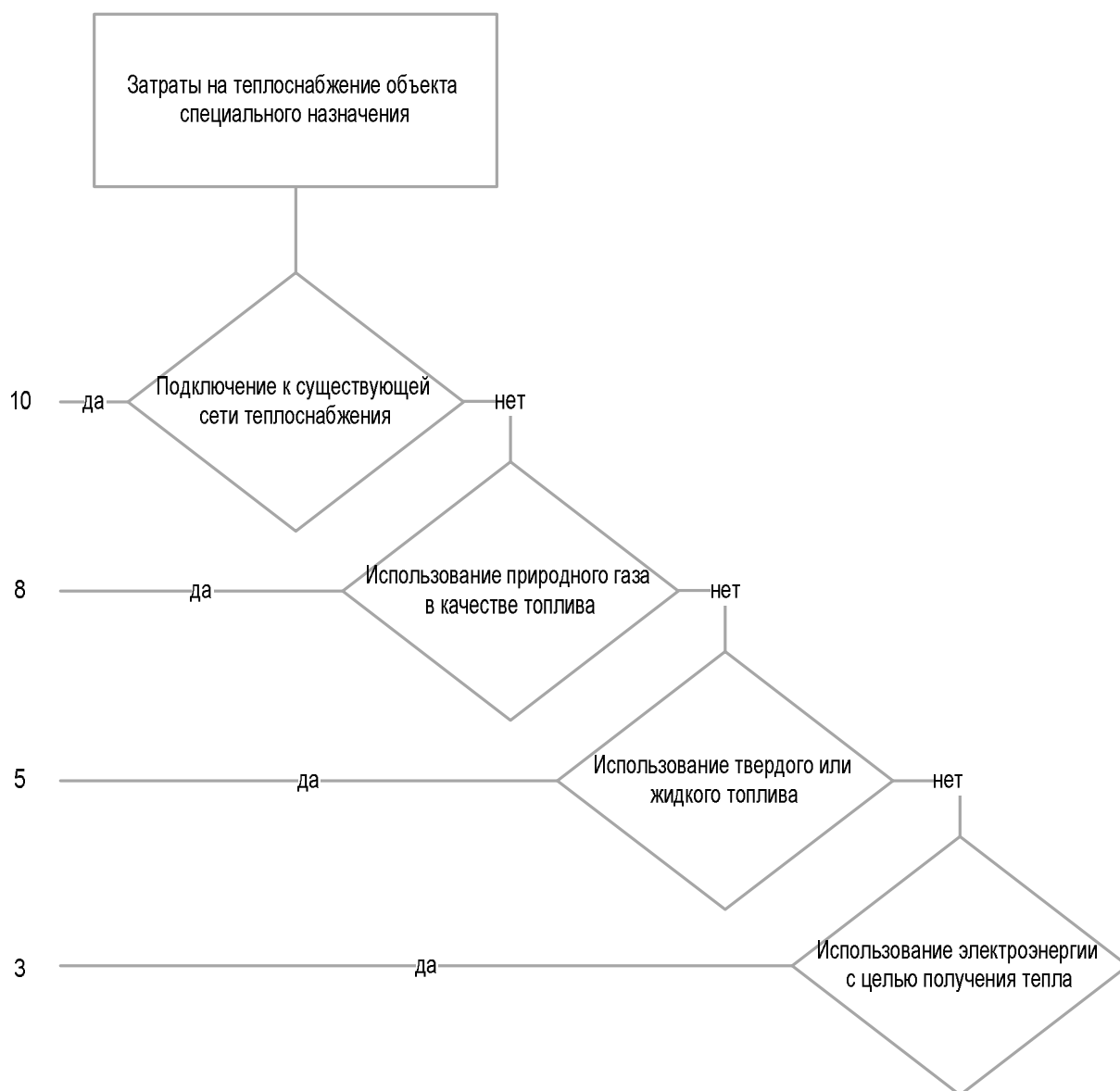


Рис. 1. Алгоритм оценивания затрат на теплоснабжение объекта

Fig. 1. Algorithm for estimating the cost of heat supply to an object

Выбор того или иного способа прокладки производится с учетом следующих условий¹ [1]:

– геологических особенностей района расположения трубопровода (вид

грунта, сезонные колебания уровня грунтовых вод и др.);

– наличие в непосредственной близости от трубопровода фундаментов зданий и сооружений или других строительных конструкций, влияющих на возможность соблюдения нормируемых расстояний между конструкциями и трубопроводом;

¹ ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация (с Поправками). М.: Стандартинформ. 2018.

- загруженность рассматриваемого участка другими инженерными коммуникациями;
- наличие весовых нагрузок на трубопровод (при прокладке под автомобильными дорогами различной категории);
- прокладка по территории детских дошкольных учреждений (с целью подключения ИТП);
- наличие пересечения с пешеходными дорожками;
- вид материала, применяемого в качестве тепловой изоляции трубопроводов;
- внедрение энергосберегающих мероприятий;
- другие индивидуальные особенности проектируемой тепловой сети.

На выбор надземной (воздушной) прокладки оказывают влияние, в основном, особенности грунта и характеристика территории, по которой планируется прокладка трубопровода. Например, на территории промышленных предприятий используется надземная прокладка, из-за наличия большого количества подземных коммуникаций. А на территории жилых районов, в основном, тепловые сети прокладываются подземно.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрев весь комплекс требований, предъявляемых к надземной и под-

земной прокладке, был разработан алгоритм действий, который позволяет выбрать наиболее эффективный в данных условиях^{1,2} способ (табл. 1, 2, рис. 2) [1–9].

Для более точного анализа выбора наиболее эффективного способа прокладки тепловой сети, а так же возможности использования выбора способа прокладки в качестве энергосберегающего мероприятия, необходимо определить потери тепловой энергии через теплоизолированную поверхность трубопроводов тепловых сетей с учетом наличия различного оборудования тепловой сети, Вт [1, 10-16]:

$$Q=q_l \cdot L_p=q_l \cdot (K_n \cdot L + \sum L_{\text{доп}}),$$

где L – действительная длина рассчитываемого участка, м; L_p – расчетная длина трубопровода с учетом дополнительных потерь, м; K_n – коэффициент, учитывающий дополнительный тепловой поток через опоры и подвески; L_p – дополнительная длина изолированного трубопровода, эквивалентная тепловому потоку установленной на трубопроводе арматуре и фланцевом соединении, м.

¹ СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. М.: Минрегион России, 2012.

² СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003. М.: Минрегион России, 2012.

Таблица 1. Особенности выбора надземного и подземного способа прокладки трубопроводов тепловых сетей**Table 1.** Features of the choice of above-ground and subsurface methods of heating network pipelines laying

№ пункта / No	Особенности и требования к способу прокладки / Features and requirements for the laying method	Способ прокладки трубопроводов тепловых сетей / The method of laying pipelines of heating networks		
		надземная (воздушная) / aboveground (air)	подземная / underground	
			бесканальная / channelless	канальная / channel
1	Прокладка по территории населенных пунктов	+	+	+
2	Прокладка по территории, не подлежащей застройке вне населенных пунктов	+	—	—
3	Сложные грунты (скальные, пучинистые, вечная мерзлота, заболоченные и другие)	+	—	+
4	Загруженность территории подземными коммуникациями (в том числе территория промышленных предприятий)	+	—	—
5	Необходимость применения защитного (покровного) слоя, в качестве которого используются материалы, стойкие к воздействию атмосферных осадков и ультрафиолетовому излучению	+	—	—
6	Прокладка тепловых сетей по территории зданий и сооружений детских дошкольных, школьных и лечебно-профилактических учреждений	—	—	+
Примечание: знак «+» – возможность применения; знак «—» – отсутствие возможности применения				

Таблица 2. Особенности выбора способа подземной канальной и бесканальной прокладки трубопроводов тепловых сетей**Table 2.** Features of the choice of the method of underground channel and non-channel laying of heating network pipelines

№ пункта / No	Особенности и требования к способу прокладки / Features and requirements for the laying method	Подземная прокладка трубопроводов тепловых сетей / Underground laying of pipelines of heating networks	
		бесканальная / channelless	канальная / channel
1	Любые грунты, пригодные для подземной прокладки	+	+
2	Мокрые грунты (при наличии попутного дренажа)	+	+
3	Высокий уровень грунтовых вод (с возможным сезонным колебанием)	–	+
4	Прокладка в непосредственной близости от территории объектов с загрязнением почвы опасными химическими и биологическими веществами, а так же при отсутствии экологического мониторинга	–	+
5	Прокладка в особых условиях строительства: биогенные грунты (торф) и илистые грунты, просадочные, засоленные и набухающие грунты, вечномёрзлые грунты	–	+
9	Применение различных теплоизоляционных материалов, кроме пенополиуретана и ППМ, отвечающих современным требованиям НТД (СП 124.1333.2012, СП 61.13330.2012)	–	+
10	Расстояние до фундамента зданий до 5 метров	–	+
11	Пересечение с инженерными коммуникациями, восприимчивыми к воздействию высоких температурных полей	–	+
12	Прокладка по территории детских дошкольных, школьных учреждений, лечебно-профилактических учреждений (для подключения к ИТП)	–	+
13	Необходимость внедрения энергосберегающих мероприятий	–	+
Примечание: знак «+» – возможность применения; знак «–» – отсутствие возможности применения			

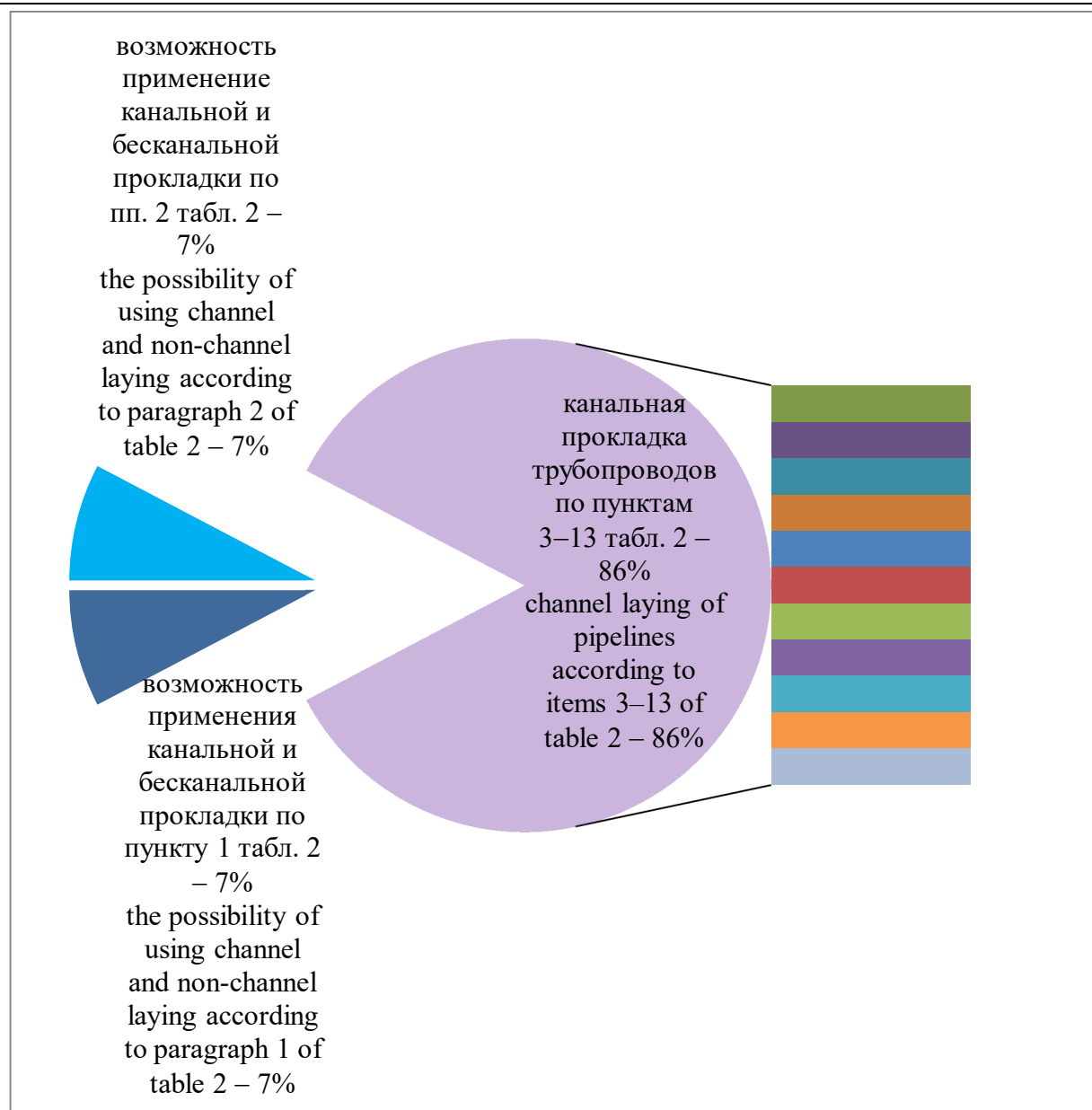


Рис. 2. Возможность применения подземной прокладки трубопроводов тепловых сетей

Fig. 2. The possibility of using underground heating network pipelines

Выводы

Проанализировав полученные результаты можно сделать вывод о том, что при наличии даже одного из пунктов 3–13 табл. 2 необходимо использовать только подземную канальную прокладку трубопроводов тепловых сетей. Преимущество этого способа прокладки

подтверждается и результатами расчетов (табл. 3). Следовательно, грамотный и качественный выбор способа прокладки трубопроводов тепловых сетей позволяет использовать его в качестве энергосберегающего мероприятия, позволяющего повысить энергоэффективность тепловой сети.

Таблица 3. Результаты расчета потерь теплоты через изолированную поверхность трубопровода тепловой сети при различных способах прокладки**Table 3.** The results of the calculation of heat losses through an insulated surface of a heating network pipeline with various laying methods

Величи- на / Size	Способ прокладки / Laying Method					
	надземная (воздушная) / above- ground (air)		подземная бесканальная / under- ground channelless		подземная канальная / underground channel	
	трубопровод / pipeline					
	подающий / bowler	обратный / rearward	подающий / bowler	обратный / rearward	подающий / bowler	обратный / rearward
q_l	99,85	33,03	53,20	7,74	18,48	4,03
Q	62404	20645	33253	4839	11552	2521
L	500					
Тепловая изоляция	Пенополиуретан					

Например, на 50% снизить потери теплоты при выборе подземной бесканальной прокладки по отношению к надземной, или на 80% снизить потери

теплоты при выборе подземной канальной прокладки по сравнению с надземной при прочих равных условиях.

Список литературы

1. Тепловая изоляция: справочник строителя / Г.Ф. Кузнецов, В.И. Бельский, В.П. Горбачев [и др.]; под ред. Г.Ф. Кузнецова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985. 421 с.
2. Майзель И. Л., Петров-Денисов В. Г. Еще раз об экономической и технической целесообразности применения трубопроводов с индустриальной пенополиуретановой изоляцией для теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2003. №3. 26 с. URL: http://www.nts.ru/3_2003.html
3. Семенов В.Г. Стратегия повышения энергоэффективности коммунальной инфраструктуры Российской Федерации: отчет о НИР / отв. исполн. Некоммерческое Партнерство «Российское теплоснабжение», Инженерный Центр «Энергетика города». М.: ОАО «ВНИПИЭнергопром», 2010. 308 с. URL: <http://www.rosteplo.ru/news/2007/12/14/1197624105-opublikovan-proekt-otcheta-o-nir-razrabotka-predlojenij>
4. Семенов Б.А., Хомякова О.П., Щербаков В.В. Сравнение оптимальных и нормативных значений удельных линейных тепловых потерь в условиях двухтрубной ка-

нальной прокладки трубопроводов // Вопросы совершенствования систем теплогазоснабжения и вентиляции: межвуз. науч. сб. Саратов, 2002. С. 50–52.

5. О повышении эффективности теплоизоляции трубопроводов и оборудования отечественных систем теплоснабжения / В.А. Рыженков, А.Г. Парыгин, А.Ф. Прищепов, Н.А. Логинова // Энергосбережение и Водоподготовка. 2009. №6. С. 48–49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13029202>

6. Рыженков В.А. Методика расчетной оценки эффективности теплоизоляционных конструкций теплопроводов / В.А. Рыженков, Н.А. Логинова, А.Ф. Прищепов, А.Г. Парыгин // Труды XV-ой Международной научно-технической конференции ГОУВПО МЭИ (ТУ). М., 2009. С. 454–455.

7. Мурашов Р. Предварительно изолированные трубопроводы централизованного теплоснабжения // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2009. №9. С. 40–43. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20556698>

8. Кравчук А. Энергосбережение. Основные источники потерь в тепловых системах и способы их устранения // Журнал энергосервисной компании «Экологические системы». Запорожье, 2007. 15 с. URL: <http://esco-ecosys.narod.ru/>

9. Семенов В.Г. Тепловые сети систем централизованного теплоснабжения // Энергосбережение. 2004. №5. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2624

10. Копко В.М. Теплоизоляция трубопроводов теплосетей. Минск: УП «Технопринт», 2002. 160 с.

11. Плахута А.Д. Определение зон эффективного теплоснабжения // Промышленная энергетика. 2015. №4. С. 2–8. URL: <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/index>

12. Бадах В.Ф., Кузнецова А.Д. Расчет нормативных потерь тепла через изоляцию трубопроводов тепловых сетей // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2011. №4 (18). С. 60–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18843106>

13. Бирюзова Е.А. Повышение энергоэффективности тепловых сетей за счет применения современных теплоизоляционных материалов // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 1. С. 62–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18778211>

14. Бирюзова Е.А. Повышение энергоэффективности современных систем теплоснабжения // Эффективные строительные конструкции: теория и практика: сборник статей XIV Международной научно-технической конференции / под ред. Н.Н. Ласькова. Пенза: ПГУАС, 2014. С. 23–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23544805>

15. Бирюзова Е.А. Исследование энергоэффективности современных теплоизоляционных материалов, применяемых в системах теплоснабжения // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2014. № 4–2 (17). С. 102–109. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22258688>

16. Бирюзова Е.А., Глуханов А.С., Кобелев Н.С. Применение современных трубопроводных систем при проектировании и реконструкции тепловых сетей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2–2. С. 63–68. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20958372>

References

1. Kuznetsov G.F., Belsky V.I., Gorbachev V.P. and others. *Teplovaya izolyatsiya: spravochnik stroitelya* [Thermal insulation. A builder's handbook]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985. 421 p. (In Russ.).

2. Maisel I.L., Petrov-Denisov V.G. Eshche raz ob ekonomicheskoi i tekhnicheskoi tselesoobraznosti primeneniya truboprovodov s industrial'noi penopoliuretanovoi izolyatsiei dlya teplosnabzheniya [Once again on the economic and technical feasibility of using pipelines with industrial polyurethane foam insulation for heat supply]. *Novosti teplosnabzheniya = News of Heat Supply*, 2003, no. 3, 26 p. (In Russ.). Available at: http://www.nts.ru/3_2003.html

3. Semenov V.G. *Strategiya povysheniya energoeffektivnosti kommunal'noi infrastruktury Rossiiskoi Federatsii. Otchet o NIR* [The strategy for improving the energy efficiency of the municipal infrastructure of the Russian Federation. Research report]. Moscow, 2010. 308 p. (In Russ.). Available at: <http://www.rosteplo.ru/news/2007/12/14/1197624105-opublikovan-proekt-otcheta-o-nir-razrabotka-predlozenij>

4. Semenov B.A., Khomyakova O.P., Shcherbakov V.V. [Comparison of optimal and standard values of specific linear heat losses in conditions of two-pipe canal laying of pipelines]. *Voprosy sovershenstvovaniya sistem teplogazo-snabzheniya i ventilyatsii*. Mezhvuz. nauch. sb. [Issues of improving heat and gas supply and ventilation systems. Interuniversity scientific collection]. Saratov, 2002, pp. 50–52 (In Russ.).

5. Ryzhenkov V.A., Parygin A.G., Prischepov A.F., Loginova N.A. O povyshenii effektivnosti teploizolyatsii truboprovodov i oborudovaniya otechestvennykh sistem teplosnabzheniya [On improving the efficiency of thermal insulation of pipelines and equipment of domestic heat supply systems]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka = Energy Saving and Water Treatment*, 2009, no. 6, pp. 48–49 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13029202>

6. Ryzhenkov V.A., Loginova N.A., Prischepov A.F., Parygin A.G. [Methodology for calculating the efficiency of heat-insulating structures of heat pipelines]. *Trudy XV-oi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii GOUVPO MEI (TU)* [Proceedings of the XV-th International Scientific and Technical Conference GOUVPO MPEI (TU)]. Moscow, 2009, pp. 454–455 (In Russ.).

7. Murashov R. Predvaritel'no izolirovannyye truboprovody tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Pre-insulated pipelines of district heating]. *Santekhnika. Otoplenie. Konditsion-*

irovanie = *Sanitary Engineering. Heating. Air Conditioning*, 2009, no. 9, pp. 40–43 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20556698>

8. Kravchuk A. [Energy saving. The main sources of losses in thermal systems and ways to eliminate them]. *Zhurnal energoservisnoi kompanii "Ekologicheskie sistemy"* [The magazine of the energy service company "Ecological Systems"]. Zaporozh'e, 2007. 15 p. (In Russ.). Available at: <http://esco-ecosys.narod.ru/>

9. Semenov V.G. Teplovye seti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Heating networks of district heating systems]. *Energoberezhenie = Energy Saving*, 2004, no. 5. (In Russ.). Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2624

10. Kopko V.M. *Teploizolyatsiya truboprovodov teplosetei* [Thermal insulation of pipelines of heating systems]. Minsk, 2002. 160 p. (In Russ.).

11. Plakhuta A.D. Opredelenie zon effektivnogo teplosnabzheniya [Determination of effective heat supply zones]. *Promyshlennaya energetika = Industrial Energy*, 2015, no. 4, pp. 2-8 (In Russ.). Available at: <http://www.promen.energy-journals.ru/index.php/PROMEN/index>

12. Badakh V.F., Kuznetsova A.D. Raschet normativnykh poter' tepla cherez izolyatsiyu truboprovodov teplovykh setei [Calculation of standard heat losses through the insulation of pipelines of heating networks]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa = Technical and Technological Problems of Service*, 2011, no. 4 (18), pp. 60–72 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18843106>

13. Biryuzova E. A. Povyshenie energoeffektivnosti teplovykh setei za schet primeneniya sovremennykh teploizolyatsionnykh materialov [Improving the energy efficiency of heat networks through the use of modern insulation materials]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo = Regional Architecture and Construction*, 2013, no. 1, pp. 62–66 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18778211>

14. Biryuzova E. A. [Improving the energy efficiency of modern heat supply systems]. *Sbornik statei XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Effektivnye stroitel'nye konstruksii: teoriya i praktika"* [Efficient construction structures: theory and practice. A collection of articles of the XIV International Scientific and Technical Conference]. Penza, 2014, pp. 23–26 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23544805>

15. Biryuzova E.A. Issledovanie energoeffektivnosti sovremennykh teploizolyatsionnykh materialov, primenyaemykh v sistemakh teplosnabzheniya [Research of energy efficiency of modern heat-insulating materials used in heat supply systems]. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya = Engineering Systems and Structures*, 2014, no. 4-2 (17), pp. 102-109 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22258688>

16. Biryuzova E. A., Glukhanov A.S., Kobelev N.S. Primenenie sovremennykh truboprovodnykh sistem pri proektirovanii i rekonstruktsii teplovykh setei [Application of modern pipeline systems in the design and reconstruction of heating networks]. *Izvestiya Yugo-*

Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies, 2012, no. 2-2, pp. 63–68 (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20958372>

Информация об авторах / Information about the Authors

Бирюзова Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: biryuzova@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6382-4814>

Elena A. Biryuzova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: biryuzova@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6382-4814>

Глуханов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: promo19_78@mail.ru

Aleksander S. Glukhanov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, ITMO University, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: promo19_78@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-42-56>

Инструментальный метод определения показателей энергоэффективности многоквартирных жилых зданий

П.В. Монастырев¹ ✉, А.М. Макаров¹, А.С. Чех¹, О.И. Куценко²

¹ Тамбовский государственный технический университет
ул. Советская 106, г. Тамбов 392000, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: arhsit@nnn.tstu.ru

Резюме

Цель исследования. Выявленные несоответствия энергосберегающим нормам, принято рассматривать как совокупность отдельных элементов. Усовершенствование всей системы (стены, окна, перекрытия, покрытия) способствует уменьшению теплопотерь в окружающую среду, что приводит к экономии теплоэнергии в целом по исследуемому объекту. Метод, в котором рассматривается поэлементная составляющая здания, имеет некоторые недостатки, так как вследствие расчетов возникает значительная погрешность в определении удельной характеристики расхода теплоэнергии на отопление и вентиляцию здания и, отсюда, в определении класса энергетической эффективности здания. В данной статье рассматривается метод инструментального контроля показателей. В статье предлагается метод инструментального контроля показателей, по которым определяется класс энергетической эффективности многоквартирного дома в соответствии с текущими требованиями нормативных документов и законодательных актов.

Методы. Предложенная методика позволяет производить оценку с помощью общедомовых приборов учета расхода тепло- и электроэнергии в течение календарного года и краткосрочное инструментальное обследование с целью уточнения некоторых других, необходимых для оценки показателей энергоэффективности многоквартирных жилых зданий параметров. Также в статье предлагается уравнение перевода значения измеренной средней температуры внутреннего воздуха при краткосрочном обследовании на среднее значение температуры воздуха внутри здания за отопительный период.

Результаты. Была произведена апробация Метода при помощи комплексного инструментального обследования многоквартирных жилых зданий типовой серии 1-447с из жилого фонда г. Тамбова. Величина отклонения значения фактического удельного годового расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию с учетом бытовых теплопоступлений рассматриваемого здания от базового уровня (для данного МКД), составляет 151,4,8 кВт·ч/м², что соответствует отклонению в 13,0,1 %. В соответствии с СП рассматриваемому зданию необходимо присвоить класс энергоэффективности – F (Низкий).

Заключение. Приведенный Метод может использоваться жителями МКД, сотрудниками Госжилинспекции и специалистами организаций, проводящих энергетические обследования, при оценке соответствия региональным нормативным показателям энергетической эффективности и энергопотребления, вводимых в эксплуатацию жилых и общественных зданий и зданий, находящихся в эксплуатации при присвоении упомянутым зданиям класса энергетической эффективности.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; энергосбережение; жилищный фонд; многоквартирный дом; энергетическое обследование.

© Монастырев П.В., Макаров А.М., Чех А.С., Куценко О.И., 2020

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Инструментальный метод определения показателей энергоэффективности многоквартирных жилых зданий / П.В. Монастырев, А.М. Макаров, А.С. Чех, О.И. Куценко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 42-56. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-42-56>.

Поступила в редакцию 09.09.2020

Подписана в печать 30.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Instrumental Method for Determining Energy Efficiency Indicators of Apartment Residential Houses

Pavel V. Monastyrev ¹ ✉, Aleksandr M. Makarov ¹, Aleksey S. Chekh ¹,
Olga I. Kutsenko ²

¹ Tambov State technical University
106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: arhsit@nnn.tstu.ru

Abstract

Purpose of research. The identified inconsistencies with energy-saving standards are usually considered as a set of individual elements. Improvement of the entire system (walls, windows, floor structures, coatings) helps to reduce external heat loss, which, on the whole, leads to heat energy saving in the object under study.

The method that considers the element component of a building has some disadvantages, since, as a result of calculations, there is a significant error in determining the specific characteristics of heat consumption for heating and ventilation of a building and, hence, in determining the energy efficiency class of a building. This paper discusses the method of instrumental control of indicators. It offers the method of instrumental control of indicators that determine the class of energy efficiency of an apartment house in accordance with the current requirements of regulatory documents and legislative acts.

Methods. The proposed method makes it possible to perform an assessment using whole-building metering devices for heat and electricity consumption during a calendar year and a short-term instrumental survey in order to clarify some other parameters necessary for evaluating energy efficiency indicators of apartment residential houses. The paper also suggests an equation for converting the value of the measured average internal air temperature during a short-term survey to the average value of air temperature inside the house during the heating period.

Results. The method was tested through the use of a comprehensive instrumental survey of apartment residential houses of standard series 1-447c from the Tambov housing stock. The value of deviation of the actual specific annual heat consumption for heating and ventilation, taking into account the household heat supply of the building in question from the base level (for the given apartment house), is $151 \pm 4.8 \text{ kWh/m}^2$, which corresponds to the deviation of $13 \pm 0.1 \%$. The building under consideration must be assigned an energy efficiency class – F (Low).

Conclusion. The given method can be applied by the residents of apartment houses, the employees of state housing inspections and the specialists of organizations conducting energy audits in assessing compliance with regional energy efficiency and consumption targets, for the residential houses and public buildings being commissioned and buildings that are in use when assigning the mentioned buildings energy efficiency class.

Keywords: energy efficiency; energy saving; housing stock; apartment house; energy survey.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR as a part of the research project № 19-33-90053.

For citation: Monastirev P. V., Makarova A. M., Chekhov A. S., Kutsenko O. I. Instrumental Method for Determining Energy Efficiency Indicators of Apartment Residential Houses. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 42-56 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-42-56>.

Received 09.09.2020

Accepted 30.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

В настоящее время наша жизнедеятельность пришлась на эпоху активного потребления. Каждый день мировые промышленные гиганты удовлетворяют наши прихоти, однако нельзя не отметить, что теперь производителей интересует не только объект продажи, но и каким образом он был создан. Тема рационального использования энергетических ресурсов является актуальной для всех стран этого мира, она затрагивает не только экономическое благополучие, но и эффективное, безопасное использование экологического потенциала. Для создания чего-либо необходима энергия, которую мы производим в большинстве случаев из невозобновляемых источников природы. Как правило, последствием такого потребления становятся различные загрязнения окружающей среды. Экономические лидеры не готовы сокращать или замедлять темп своего производства и потребления энергии, поэтому в данный момент они озадачены вопросом эффективного использования экологических ресурсов [1-6].

Руководство нашей страны уделяет большое внимание повышению энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства, и, в частности, многоквартирного жилого фонда. Принятый в 2009 году Федеральный закон¹, а также целый ряд действующих нормативно-правовых документов в сфере энергосбережения, направлены на создание эффективной правовой базы, способствующей решить ряд вопросов, касающихся повышения эффективности использования энергии и, как результат, энергосбережения в жилищном фонде² [7, 8]. Можно заметить, что каждый год разрабатываются и вводятся в действие новые нормативные документы, регламентирующие различные аспекты в

¹ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (с изменениями и дополнениями): Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ. URL: <http://base.gara-nt.ru/12171109/>.

² Об утверждении Правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов: приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 21.08.2016 №399/пр. URL: www.pravo.gov.ru, 10.08.2016, N 00012016-08100003.

сфере энергосбережения и, в частности, в области энергосбережения при потреблении энергии в жилищном фонде Российской Федерации. Однако при практической реализации требований нормативно-правовых документов при определении количественных характеристик показателей, характеризующих энергетическую эффективность жилого фонда, появится много сложностей. Нормативно-методические документы, регламентирующие вопросы проведения натурных обследований при установлении или подтверждении класса энергоэффективности зданий, «отстают» от нормативно-правовой базы. Поэтому имеющиеся результаты оценки энергоэффективности по присвоенному зданию классу энергетической эффективности имеют низкую точность, и, как следствие этого, низкую достоверность. В этой связи организация «на-турного» контроля фактических показателей энергетической эффективности зданий, находящихся на разных стадиях своего жизненного цикла (новое строительство; реконструкция или капремонт; здание, находящееся в эксплуатации) является в настоящее время одной из основных проблем, решение которой требуется в кратчайшие сроки.

Материалы и методы

К показателям, характеризующим энергетическую эффективность многоквартирного дома (МКД), по которому

определяется класс энергетической эффективности МКД, в соответствии с приказом Министерства энергетики РФ¹, относятся удельный и базовый годовой расход энергетических ресурсов в МКД. Удельный показатель энергетической эффективности рассчитывается как сумма удельных годовых расходов теплоэнергии на нужды отопления (включая расход теплоэнергии на общедомовые нужды, таких, как отопление лестничных клеток, подвальных помещений и т.д.), вентиляции, горячего водоснабжения МКД и затраты электроэнергии на общедомовые нужды.

Удельные затраты энергетических ресурсов рассчитываются исходя из фактического потребления энергетических ресурсов (на нужды отопления, вентиляции, горячего водоснабжения) МКД, затрат электроэнергии на общедомовые нужды, которые, в свою очередь, должны быть определены на основании показаний общедомовых приборов учета энергетических ресурсов. Исходя из состава показателей, характеризующих энергетическую эффективность здания, можно сделать вывод о том, что МКД в обязательном порядке

¹ Об утверждении требований к проведению энергетического обследования и его результатам и правил направления копий энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования (с изменениями на 13 января 2016 года: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30.06.2014 №400. URL: <http://base.garant.ru/70818262/>.

должен быть оснащен общедомовыми приборами учета – теплоэнергии на отопление и горячее водоснабжение и электроэнергии [9-12].

Преимущества использования информации от общедомовых приборов учета по потреблению энергетических ресурсов за один год эксплуатации здания по сравнению с данными, полученными в процессе проведения инструментального энергетического обследования при определении показателей, характеризующих энергетическую эффективность МКД, состоят в следующем [13, 14]:

- сравнительно высокая точность определения расходов тепловой и электрической энергий, основанная на единой системе требований к приборам учета энергетических ресурсов;

- длительность периода измерений (один год);

- возможность объективного контроля результатов измерений всеми заинтересованными сторонами: собственниками помещений в МКД, энергоснабжающими организациями, представителями Госжилинспекции (орган государственного надзора, на который возложена функция контроля и надзора за энергоэффективностью зданий и сооружений в стадии их эксплуатации);

- как правило, наличие архива потребления теплоэнергии за любой период времени.

При установлении базового уровня удельного годового расхода энергетических ресурсов были приняты следующие расчетные условия^{1, 2, 3}:

- температура внутреннего воздуха в квартирах – 20°C;

- общая площадь жилых помещений на одного жителя – 20 м²;

- нормативный воздухообмен на одного жителя – 30 м³/ч;

- удельные бытовые внутренние теплоступления с общей площади – 17 Вт/м²;

- базовый уровень удельного годового расхода электрической энергии на общедомовые нужды для МКД при наличии лифтового оборудования – 10,0 кВт·ч/м² и при его отсутствии – 7,0 кВт·ч/м².

Фактические значения годового расхода энергоресурсов приводятся к расчетным условиям, в зависимости от отклонений фактических климатических характеристик района расположения и этажности МКД, средней температуры внутреннего воздуха в помещениях, плотности заселения, воздухообмена, удельных бытовых внутренних теплоступлений, качества коммунальных услуг (при предоставлении коммуналь-

¹ Об утверждении требований к проведению энергетического обследования и его результатам и правил направления копий энергетического паспорта, составленного по результатам обязательного энергетического обследования (с изменениями на 13 января 2016 года: Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30.06.2014 №400. URL: <http://base.garant.ru/70818262/>.

² СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий. Введ. 2004-06-01 М.: ФГ-УП ЦПП, 20-04. 144 с.

³ СП 50.133.30.2012 Тепловая защита зданий. Введ. 2013-07-01 М.: ФАУ «ФЦС», 2012. 96 с.

ной услуги ненадлежащего качества и/или с перерывами, превышающими установленную продолжительность) [15].

Исходя из текущих требований нормативных документов можно сформулировать область применения и основные положения разработанного метода инструментального контроля показателей энергоэффективности МКД (далее по тексту «Метод») [16, 17].

Результаты и их обсуждение

Данный Метод описывает проведение определения класса энергетической эффективности вновь построенных, реконструированных или капитально отремонтированных зданий, находящихся в эксплуатации не менее 2 лет.

Метод предусматривает проведение длительных фактических натурных измерений с помощью общедомовых приборов учета потребления тепло- и электроэнергии и краткосрочного инструментального обследования для уточнения некоторых параметров.

Измерения проводятся в заселенном доме в течение отопительного и неотопительного сезонов (минимальный срок измерений – 1 полный год).

В предложенном Методе не предусмотрено определение параметров, которые не влияют на класс энергетической эффективности здания в соответствии с [2].

Натурные испытания проводятся в реальных условиях эксплуатации здания с помощью существующих приборов учета тепловой энергии, и последующим

приведением результатов к стандартным условиям, общим для всего дома.

При снятии показания с приборов учета тепловой энергии следует учитывать следующие существующие особенности учета теплоэнергии:

- при наличии в МКД магистральных трубопроводов систем горячего водоснабжения, имеющих врезки трубопроводов секционных систем водоснабжения, количество израсходованной горячей воды определяется разностью количества воды, измеренной приборами учета, установленными на вводах в здание и выводах из здания трубопроводов системы водоснабжения;

- при установке приборов учета воды на подающем и обратном (циркуляционном) трубопроводах систем горячего водоснабжения жилищного фонда, количество горячей воды, подлежащей оплате, определяется как разность количеств воды, прошедших через счетчики на подающем и циркуляционном трубопроводах;

- если за исследуемый период времени, не превышающий 30 календарных дней, осуществлялся ремонт, замена, поверка коллективного (общедомового) прибора учета, то объемы (количество) потребления горячей воды и теплоэнергии исчисляются как среднемесячное потребление энергетических ресурсов, определенные по указанному прибору за последние 6 месяцев, а если период работы индивидуального или коллективного (общедомового) прибора учета составил меньше 6 месяцев, – то

за фактический период работы прибора учета, но не выше существующих нормативов потребления.

При оборудовании МКД многоквартирного дома коллективными приборами учета и наличием нежилых помещений, имеющих отдельно установленные приборы учета тепловой энергии, величину потребления тепловой энергии рассчитывают по формуле

$$Q = Q_D - \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

где Q_D – объем (количество) энергетических ресурсов, фактически потребленный за расчетный период, определенный по показанию коллективного (общедомового) прибора учета в МКД;

$\sum Q_i$ – объем (количество) энергоресурсов, потребленный за расчетный период в i -том нежилом помещении (без учета помещений общего пользования).

Измерения фактической средней температуры внутреннего воздуха в многоквартирном доме в стадии его эксплуатации связаны с большими проблемами, прежде всего по доступу в жилые помещения для произведения замеров. Поэтому наиболее доступный способ измерения температуры внутреннего воздуха – измерения, производимые на выходе из вентиляционной шахты на крыше здания или на техническом этаже.

Датчики температуры должны быть установлены на выходе сборных вентиляционных каналов из кухонь квартир по вертикальной оси на глубине не менее 1 м от их оголовков, но не ниже вентиляционной решетки помещения последнего

этажа. Измеренную температуру необходимо понизить на 1 °С для приведения ее в соответствие с температурой внутреннего воздуха¹.

Натурные испытания фактической средней температуры внутреннего воздуха в обследуемом здании необходимо проводить в отопительный период года со средней температурой наружного воздуха, близкой к средней температуре наружного воздуха за отопительный сезон.

При отличии температур необходимо произвести пересчет измеренной температуры внутреннего воздуха на стандартные климатические условия.

Для пересчета фактической измеренной при инструментальном обследовании величины средней температуры воздуха в здании на стандартные климатические условия воспользуемся известным выражением для расчета количества теплоты, необходимой для отопления зданий на планируемый период [18]

$$Q_o = \frac{Q_{omax}(t_b - t_{от}) \cdot n}{(t_b - t_n)}, \quad (2)$$

где Q_{omax} – расчетное значение часовой тепловой нагрузки отопления, Гкал/ч;

t_b – усредненное расчетное значение температуры воздуха внутри отапливаемых зданий, °С;

t_n – расчетное значение температуры наружного воздуха для данных климатических условий, °С;

¹ ГОСТ 31168-2014 Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление. Введ. 2015-01-01. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014.

t_{om} – среднее значение температуры наружного воздуха за планируемый период, °С;

n – продолжительность функционирования систем отопления в планируемый период, сут.

Записав уравнение (2) для двух периодов (1-й рассматриваемый период – отопительный сезон с полученными при инструментальном обследовании фактическими значениями расхода тепловой энергии в системе отопления $Q_o^{год}$, средней температурой наружного воздуха за отопительный период $t_{от}^{год}$ и неизвестным значением средней температурой воздуха внутри здания за отопительный период $t_{в}^{год}$; 2-й рассматриваемый период – кратковременное инструментальное обследование с измеренными фактическими значениями расхода тепловой энергии в системе отопления $Q_o^{изм}$, средней температуры наружного воздуха за период измерения $t_{от}^{изм}$ и измеренным значением средней температуры внутреннего воздуха в здании за отопительный период $t_{в}^{изм}$) и решив систему уравнений относительно $t_{в}^{год}$, получим

$$t_{в}^{год} = t_{от}^{год} + \frac{Q_o^{год} \cdot n_{инстр}}{Q_o^{изм} \cdot n_{от}} (t_{в}^{изм} - t_{от}^{изм}), \quad (3)$$

где $n_{инстр}$ – продолжительность кратковременного инструментального обследования;

$n_{инстр}^{год}$ – продолжительность длительного инструментального обследования (в течение отопительного периода для системы отопления).

В результате испытаний в соответствии с Методом были получены значения следующих величин:

– расход теплоэнергии на отопление по приборам учета тепловой энергии, Гкал/ч или кВт·ч;

– расход теплоэнергии на вентиляцию по приборам учета тепловой энергии (при наличии данной системы с отдельным вводом теплоносителя), Гкал/ч или кВт·ч;

– расход теплоэнергии на горячее водоснабжение по приборам учета, Гкал/ч или кВт·ч;

– фактическое время работы системы отопления в здании в течение отопительного периода, ч (данный временной параметр может не совпадать с фактическим временем работы источника теплоснабжения, полученным по данным теплоснабжающей организации);

– фактическое время работы системы вентиляции (с потреблением тепловой энергии) в течение отопительного периода, ч;

– фактическая температура окружающей среды в течение работы системы отопления обследуемого здания (данный параметр может не совпадать с фактической температурой окружающей среды в течение отопительного периода, по данным теплоснабжающей организации), °С;

– фактическая средняя температура воздуха внутри обследуемого здания, °С;

– начальные и конечные показания общедомовых приборов учета потребления электроэнергии за исследуемый период времени, кВт·ч;

– объем (количество) электрической энергии, потребленной в жилых и нежилых помещениях МКД (кроме мест общего пользования), кВт·ч.

Полученные данные количества тепловой энергии на отопление по приборам учета за отопительный период необходимо пересчитать на стандартные условия.

Результатами обработки данных, полученных при инструментальных испытаниях, являются:

– определение фактического количества энергии, расходуемого на отопление, приведенного к градусо-суткам (ГСОП) периода испытаний¹.

– определение фактической температуры внутреннего воздуха в период работы системы отопления в здании;

– определение расхода электроэнергии на общедомовые нужды.

Средняя температура внутри отапливаемого здания определяется по результатам фактических измерений за период испытаний как среднеарифметическое значение температур, измеренных на выходе из каждой вытяжной шахты, а также на входе устройств общедомовых и/или квартирных рекуператоров:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (4)$$

где t_i – измеренная температура воздуха внутри шахты;

n – число вытяжных шахт.

Затем необходимо пересчитать полученное значение средней температуры воздуха внутри отапливаемого здания на расчетные условия по формуле (3).

Фактически измеренную величину расхода тепловой энергии на горячее водоснабжение $Q_{\text{гв}}$ при установленном приборе учета и измеренным значением температуры горячей воды в точке разбора, определяют по формуле

$$Q_{\text{гв}} = G_{\text{гв}} \cdot (t_{\text{гв}} - t_{\text{хв}}) \cdot (1 + k_{\text{тр}}) \cdot \rho \cdot c, \quad (5)$$

где $G_{\text{гв}}$ – измеренный за определенный период времени расход воды на горячее водоснабжение, м³;

$t_{\text{гв}}$ – температура горячей воды в точке разбора, °С;

$t_{\text{хв}}$ – температура холодной воды, °С (в зимний (отапливаемый) период принимается равной 5 °С, в летний период – 15 °С);

$k_{\text{тр}}$ – коэффициент, учитывающий потери теплоты трубопроводами систем горячего водоснабжения; для индивидуальных тепловых пунктов жилых зданий с централизованной системой горячего водоснабжения $k_{\text{тр}} = 0,2$, общественных зданий $k_{\text{тр}} = 0,1$; для жилых зданий с квартирными водонагревателями $k_{\text{тр}} = 0,1$;

ρ – плотность горячей воды (при средней температуре), кг/м³;

c – удельная теплоемкость воды, (кДж/кг °С).

Пересчет фактической измеренной величины расхода тепловой энергии в системе отопления Q_o на расчетные условия произведем по формуле

$$Q_o^{\text{станд}} = Q_o^{\text{факт}} \frac{\text{ГСОП}}{\text{ГСОП}_{\text{ф}}}, \quad (6)$$

¹ СП 50.133.30.2012 Тепловая защита зданий. Введ. 2013–07–01 М.: ФАУ «ФЦС», 2012. 96 с.

$$ГСОП_{\phi} = (t_{\phi}^{\text{факт}} - t_{\text{от}}^{\text{факт}}) \cdot z_{\text{от}}^{\text{факт}},$$

где $t_{\text{в}}^{\text{факт}}$ – средняя температура воздуха внутри здания в течение отопительного периода, °С;

$t_{\text{от}}^{\text{факт}}$ – фактическая средняя температура наружного воздуха в течение периода работы системы отопления исследуемого здания, °С;

$z_{\text{от}}^{\text{факт}}$ – фактический период времени работы системы отопления исследуемого здания, сут.

Пересчет фактической измеренной величины расхода тепловой энергии в системе вентиляции $Q_{\text{в}}$ на расчетные условия производится аналогично.

Расчет бытовых внутренних теплопоступлений в течение отопительного периода произведем по формуле

$$Q_{\text{быт}} = 0,024 \cdot q_{\text{быт}} \cdot A_{\text{ж}} \cdot z_{\text{от}}^{\text{факт}}, \text{ (кВт}\cdot\text{ч)}, \quad (7)$$

где $q_{\text{быт}}$ – величина бытовых тепловыделений в здании на 1 м² площади жилых помещений, Вт/м²;

$A_{\text{ж}}$ – общая площадь жилых помещений, м²;

$z_{\text{от}}^{\text{факт}}$ – фактический период времени работы системы отопления исследуемого здания, сут.

Величина бытовых тепловыделений в здании на 1 м² площади жилых помещений составляет^{1,2}:

– для жилых зданий с общей площадью менее 20 м² на человека -

$$q_{\text{быт}} = 17 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2};$$

– для жилых зданий с общей площадью более 45 м² на человека -

$$q_{\text{быт}} = 10 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Для других значений плотности заселения величину бытовых тепловыделений следует найти с помощью метода линейной интерполяции.

Общая удельная величина тепловой энергии на отопление:

$$Q_{\text{от+быт}}^{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{от}}^{\text{станд}} + Q_{\text{быт}}}{A_{\text{ж}}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-2}. \quad (8)$$

Общая удельная величина тепловой энергии на горячее водоснабжение:

$$Q_{\text{гв}}^{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{гв}}}{A_{\text{ж}}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-2}. \quad (9)$$

Удельный расход электрической энергии на общедомовые нужды определяется по формуле

$$V_{\text{он}}^{\text{уд}} = \frac{V_{\text{д}} - \sum_{i=1}^n V_i}{A_{\text{ж}}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-2}, \quad (10)$$

где $V_{\text{д}}$ – объем (количество) электрической энергии, потребленный за расчетный период в МКД и определенный по показаниям коллективного (общедомового) прибора учета электроэнергии, которым оснащен МКД;

V_i – суммарный объем (количество) электрической энергии, потребленный за расчетный период в жилых помещениях (квартирах), с индивидуальным или общим (квартирным) прибором учета.

Далее, полученные удельные значения затрат энергетических ресурсов (на нужды отопления, вентиляции, горячего водоснабжения) МКД суммируются и полученное значение сравнивается с базовым уровнем удельного го-

¹ СП 23-10-1-2004 Проектирование тепловой защиты зданий. Введ. 2004-06-01 М.: ФГ·УП ЦПП, 20-04. 144 с.

² СП 50.133.30.2012 Тепловая защита зданий. Введ. 2013-07-01 М.: ФАУ «ФЦС», 2012. 96 с.

дового расхода энергетических ресурсов в МКД. По результатам данного сравнения (вычисляется величина отклонения значения фактического удельного годового расхода энергетических ресурсов от базового уровня в %) устанавливается класс энергетической эффективности МКД.

Была произведена апробация Метода при помощи комплексного инструментального обследования многоквартирных жилых зданий типовой серии 1-447с из жилого фонда г. Тамбова. Величина отклонения значения фактического удельного годового расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию с учетом бытовых теплопоступлений рассматриваемого здания от базового уровня (для данного МКД), со-

ставляет $151,4,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что соответствует отклонению в $13,0,1 \%$. В соответствии с СП 50.13330.2012 рассматриваемому зданию необходимо присвоить класс энергоэффективности – F (Низкий).

Выводы

Приведенный Метод может использоваться жителями МКД, сотрудниками Госжилинспекции и специалистами организаций, проводящих энергетические обследования, при оценке соответствия региональным нормативным показателям энергетической эффективности и энергопотребления, вводимых в эксплуатацию жилых и общественных зданий и зданий, находящихся в эксплуатации при присвоении упомянутым зданиям класса энергетической эффективности [18].

Список литературы

1. Сазонов Э. В., Леденев В. И., Леденева Г. Л. Экологические проблемы современного градостроительства // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В.И. Вернадского. 2016. Вып. №4(62). С.53-59.
2. Монастырев П. В., Клычников Р. Ю., Кожухина О. Н. Проблемы термомодернизации зданий жилищного фонда Тамбовской области // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В.И. Вернадского. 2009. Вып. №11(25). С.161-165.
3. Кудрявцев В.Ю., Герасимов Б. И. Экономический анализ топливно-энергетического комплекса (на примере Тамбовской области) / под науч. ред. Б. И. Герасимова; Тамб. гос.техн. ун-т. Тамбов: ТГТУ, 2005. 88 с.
4. Гагарин В. Г. [и др.]. Пути повышения энергоэффективности эксплуатируемых зданий // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2009. № 5. С. 38 – 47.
5. Филиппов А. М. Класс энергоэффективности жилых зданий: теория и практика // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2011. №4. С. 23 – 29.
6. Грановский В. Л. Энергоэффективные здания – комплексное решение для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения // Вентиляция, отопление, кон-

диционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2014. №4. С. 20 – 33.

7. Корниенко С.В. Зеленое строительство – комплексное решение задач энергоэффективности, экологии и экономии // Энергосбережение. 2017. № 3. С. 22-27.

8. Горшков А.С., Гладких А.А. Мероприятия по повышению энергоэффективности в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 246-250.

9. Тарасюк П.Н., Трубаев П.А., Сухорослова В.В. Повышение энергоэффективности в индивидуальном жилищном строительстве в условиях Белгородской области // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 410-415.

10. Федюнина Т.В., Материнский С.В. Энергоэффективность строительства и низкоэмиссионное стекло // Наука и современность: сборник статей Международной научно-практической конференции / отв. редактор А. А. Сукиасян. Уфа, 2014. С. 40-41.

11. Пугачев С.В. Техническое регулирование и вопросы энергоэффективности в строительстве // Энергосбережение. 2013. № 2. С. 14-25.

12. Грабовый П.Г., Старовойтов А.С. Инновационное строительство – энергоэффективность и экологичность // Недвижимость: экономика, управление. 2012. № 2. С. 68-71.

13. Чех А.С. К вопросам натурного обследования при определении класса энергетической эффективности // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт: материалы 4-й международной научно-практической конференции института архитектуры, строительства и транспорта ТГТУ. Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2017. С. 434-438.

14. Наумов А.Л., Капко Д.В. Методика определения класса энергетической эффективности эксплуатируемых жилых многоквартирных домов. URL: http://zvt.abok.ru/articles/256/Metodika_opredeleniya_klassa_energeticheskoi_effektivnosti_ekspluatiruemih_zhilih_mnogokvartirnih_domov.

15. Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита. М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2006. 256 с.

16. Макаров А. М., Чех А. С. Проблемы повышения энергоэффективности жилых многоквартирных домов в процессе эксплуатации // Устойчивое развитие региона: Архитектура, строительство, транспорт: материалы междунар. науч.-практ. конференции / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2015. С.148-151.

17. Чех А. С., Макаров А. М. Обоснование выбора научного исследования в области энергоэффективности эксплуатации зданий и сооружений // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2016. №2(14). С.49-53.

18. Макаров А. М., Чех А. С. Энергетические исследования теплозащитных качеств наружных ограждающих конструкций зданий Тамбовской областной клиниче-

ской больницы имени В.Д. Бабенко // В.И. Вернадский: Устойчивое развитие регионов: материалы междунар. науч.-практ. конференции. / Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2016. Т.5. С.111-116.

References

1. Sazonov E. V., Ledenev V. I., Ledeneva G. L. *Ekologicheskie problemy sovremennogo gradostroitel'stva* [Environmental problems of modern urban planning]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki = Journal of Modern Science and Practice University named after V. I. Vernadsky*, 2016, no. 4(62), pp. 53-59 (In Russ.).
2. Monastirev P.V., Klychnikov R.J., Kozhukhin O.N. *Problemy termomodernizatsii zdaniy zhilishchnogo fonda Tambovskoi oblasti* [Problems of modernization of housing stock buildings in Tambov region]. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet imeni V.I. Vernadskogo = Questions Modern Science and Practice V. I. Vernadsky University*, 2009, no.11(25), pp. 161-165 (In Russ.).
3. Kudryavtsev V. Yu., Gerasimov B. I. *Ekonomicheskii analiz toplivno-energeticheskogo kompleksa (na primere Tambovskoi oblasti)* [Economic analysis of the fuel and energy complex (in the case of the Tambov region)]. Tambov, TSTU Publ., 2005. 88 p. (In Russ.).
4. Gagarin V. G. [and others]. *Puti povysheniya energoeffektivnosti ekspluatiruemyykh zdaniy* [Ways to improve the energy efficiency of operated buildings]. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (AVOK) = Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics*, 2009, no. 5, pp. 38-47 (In Russ.).
5. Filippov A.M. *Klass energoeffektivnosti zhilykh zdaniy: teoriya i praktika* [KLACC energy efficiency of residential buildings: theory and practice]. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (AVOK) = Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics*, 2011, no.4, pp. 23 – 29 (In Russ.).
6. Granovskiy V. L. *Energoeffektivnye zdaniya – kompleksnoe reshenie dlya sistem otopeniya, ventilyatsii i gorya-chego vodosnabzheniya* [Energy-Efficient buildings – a comprehensive solution for ICU·the heating, ventilation, and grief·what water]. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (AVOK) = Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics*, 2014, no.4, pp. 20 – 33 (In Russ.).
7. Kornienko S. V. *Zelenoe stroitel'stvo - kompleksnoe reshenie zadach energoeffektivnosti, ekologii i ekonomii* [Green construction - a comprehensive solution to the problems of energy efficiency, ecology and economy]. *Energoberezhenie = Energy Saving*, 2017, no. 3, pp. 22-27 (In Russ.).
8. Gorshkov A. S., Gladkikh A. A. *Meropriyatiya po povysheniyu energoeffektivnosti v stroitel'stv* [Measures to improve energy efficiency in construction]. *Academia. Arkhitektura*

i stroitel'stvo = *Academia. Architecture and Construction*, 2010, no. 3, pp. 246-250 (In Russ.).

9. Tarasyuk P. N., Trubaev P. A., Sukhoroslova V. V. Povyshenie energoeffektivnosti v individual'nom zhilishchnom stroitel'stve v usloviyakh belgorodskoi oblasti [Improving energy efficiency in individual housing construction in the Belgorod region]. *Nauchnoe obozrenie* = *Scientific Review*, 2013, no. 9, pp. 410-415 (In Russ.).

10. Fedyunina T. V., Mothersky S. V. [Energy efficiency of construction and low-emission glass]. *Nauka i sovremennost'. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science and modernity. Collection of articles of the International scientific and practical conference]. Ufa, 2014, pp. 40-41 (In Russ.).

11. Pugachev S. V. Tekhnicheskoe regulirovanie i voprosy energoeffektivnosti v stroitel'stve [Technical regulation and energy efficiency issues in construction]. *Energoberezhenie* = *Energy Saving*, 2013, no. 2, pp. 14-25 (In Russ.).

12. Grabovyi P. G., Starovoitov A. S. Innovatsionnoe stroitel'stvo – energoeffektivnost' i ekologichnost' [Innovative construction – energy efficiency and environmental friendliness]. *Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie* = *Real Estate: Economy, Management*, 2012, no. 2, pp. 68-71 (In Russ.).

13. Chekh A. S. [On the issues of field survey in determining the class of energy efficiency]. *Ustoichivoe razvitie regiona: arkhitektura, stroitel'stvo i transport. Materialy 4-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii instituta arkhitektury, stroitel'stva i transporta TGTU* [Sustainable development of the region: architecture, construction and TRANS-port. Proceedings of the 4th international scientific and practical conference of the Institute of architecture, construction and TRANS-port of TSTU]. Tambov, 2017, pp. 434-438 (In Russ.).

14. Naumov A. L., Capco D. V. *Metodika opredeleniya klassa energeticheskoi effektivnosti ekspluatiruemykh zhilykh mnogokvartirnykh domov* [Methodology for determining the class of energy efficiency of operated residential multi-apartment buildings] (In Russ.). Available at: [Electronic resource]. Access mode: http://zvt.abok.ru/articles/256/Metodika_opredeleniya_klassa_energeticheskoi_effektivnosti_ekspluatiruemih_zhilih_mnogokvartirnih_domov.

15. Fokin V. M. *Osnovy energosberezheniya i energoaudita* [Fundamentals of energy saving and energy audit]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 256 p. (In Russ.).

16. Makarov A. M., Chekh A. S. [Problems of improving the energy efficiency of residential apartment buildings in the process of operation]. *Ustoichivoe razvitie regiona: Arkhitektura, stroitel'stvo, transport. Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* [Sustainable development of the region: Architecture, construction, transport: materials of Intern. scientific and practical conferences]. Tambov, 2015, pp. 148-151 (In Russ.).

17. Chekh A. S., Makarov A. M. Obosnovanie vybora nauchnogo issledovaniya v oblasti energoeffektivnosti ekspluatatsii zdaniy i sooruzhenii [Justification of the choice of scientific research in the field of energy efficiency of buildings and structures operation]. *Bi-*

osfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii = Biosphere compatibility: people, region, technology, 2016, no.2(14), pp. 49-53 (In Russ.).

18. Makarov A. M., Chekh A. S. [Energy research of heat-protective qualities of external enclosing structures of buildings of the Tambov regional clinical hospital named after V. D. Babenko]. *V.I. Vernadskii: Ustoichivoe razvitie regionov: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* [V. I. Vernadsky: Sustainable development of regions: materials of the international journal. scientific and practical conferences]. Tambov, 2016, vol. 5, pp. 111-116 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Монастырев Павел Владиславович, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: arhsit@nnn.tstu.ru

Pavel V. Monastyrev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Construction of buildings and structures Department, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: arhsit@nnn.tstu.ru

Макаров Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: sascha_68@rambler.ru

Aleksandr M. Makarov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Urban Development and Road Department, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: sascha_68@rambler.ru

Чех Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Российская Федерация, e-mail: chekhalex@mail.ru

Aleksey S. Chekh, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Urban Development and Road Department, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, e-mail: chekhalex@mail.ru

Куценко Ольга Ивановна, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pgs_swsu@mail.ru

Olga I. Kutsenko, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pgs_swsu@mail.ru

Идентификация человека по походке в видеопотоке

М.Ю. Уздяев¹, Р.Н. Яковлев¹ ✉, Д.М. Дударенко¹, А.Д. Жебрун¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук
14-я линия В.О., 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Данная работа посвящена проблеме идентификации человека по походке с помощью нейросетевых моделей распознавания, ориентированных на работу с RGB изображениями. Главным преимуществом использования нейросетевых моделей перед существующими методами анализа двигательной активности является получение изображений из видеопотока без предобработки кадров, увеличивающей время анализа.

Методы. В данной работе был предложен подход к идентификации человека по походке, который основывается на идее многоклассовой классификации на видеопоследовательностях. Оценка качества функционирования разработанного подхода производилась на основе набора данных CASIA Gait Database, включающего в себя более 15000 видеопоследовательностей. В качестве классификаторов были апробированы 5 нейросетевых архитектур: трехмерная сверточная нейронная сеть I3D, а также 4 архитектуры, представляющие собой сверточно-рекуррентные сети, такие, как однонаправленная и двунаправленная LSTM, однонаправленная и двунаправленная GRU, скомбинированные со сверточной нейронной сетью архитектуры ResNet, используемой в данных архитектурах в качестве экстрактора визуальных признаков.

Результаты. Согласно результатам проведенного тестирования, разработанный подход предоставляет возможность осуществлять идентификацию человека в видеопотоке в режиме реального времени без использования специализированного оборудования. По результатам его апробации с помощью рассматриваемых нейросетевых моделей точность идентификации человека составила более 80% для сверточно-рекуррентных моделей и 79% для модели I3D.

Заключение. Предложенные модели на основе архитектуры I3D и сверточно-рекуррентных архитектур показали более высокую точность, чем существующие методы решения задачи идентификации человека по походке. За счет возможности пок кадрово й обработки видео наиболее предпочтительным классификатором для разработанного подхода является использование сверточно-рекуррентных архитектур на основе однонаправленной LSTM или GRU моделей соответственно.

Ключевые слова: нейронные сети; компьютерное зрение; сверточные нейронные сети; рекуррентные нейронные сети; I3D; методы идентификации человека.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Идентификация человека по походке в видеопотоке / М.Ю. Уздяев, Р.Н. Яковлев, Д.М. Дударенко, А.Д. Жебрун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 57-75. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-57-75>.

Поступила в редакцию 16.09.2020

Подписана в печать 20.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Identification of a Person by Gait in a Video Stream

Mikhail Yu. Uzdiaev¹, Roman N. Iakovlev¹, Dmitry M. Dudarenko¹,
Aleksandr D. Zhebrun¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The given paper considers the problem of identifying a person by gait through the use of neural network recognition models focused on working with RGB images. The main advantage of using neural network models over existing methods of motor activity analysis is obtaining images from the video stream without frames preprocessing, which increases the analysis time.

Methods. The present paper presents an approach to identifying a person by gait. The approach is based upon the idea of multi-class classification on video sequences. The quality of the developed approach operation was evaluated on the basis of CASIA Gait Database data set, which includes more than 15,000 video sequences. As classifiers, 5 neural network architectures have been tested: the three-dimensional convolutional neural network I3D, as well as 4 architectures representing convolutional-recurrent networks, such as unidirectional and bidirectional LSTM, unidirectional and bidirectional GRU, combined with the convolutional neural network of ResNet architecture being used in these architectures as a visual feature extractor.

Results. According to the results of the conducted testing, the developed approach makes it possible to identify a person in a video stream in real-time mode without the use of specialized equipment. According to the results of its testing and through the use of the neural network models under consideration, the accuracy of human identification was more than 80% for convolutional-recurrent models and 79% for the I3D model.

Conclusion. The suggested models based on I3D architecture and convolutional-recurrent architectures have shown higher accuracy for solving the problem of identifying a person by gait than existing methods. Due to the possibility of frame-by-frame video processing, the most preferred classifier for the developed approach is the use of convolutional-recurrent architectures based on unidirectional LSTM or GRU models, respectively.

Keywords: neural networks; computer vision; convolutional neural networks; recurrent neural networks; I3D; human identification techniques.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Uzdiaev M. Yu., Iakovlev R. N., Dudarenko D. M., Zhebrun A. D Identification of a Person by Gait in a video stream. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 57-75 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-57-75>.

Received 16.09.2020

Accepted 20.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

При разработке систем охраны правопорядка, контроля доступа, а также киберфизических систем и интеллектуальных пространств, задача идентификации человека не теряет своей актуальности [1]. Походка является одним из поведенческих проявлений, по которому возможна идентификация человека на расстоянии без непосредственного с ним контакта. При этом данный биометрический параметр является стабильным и слабо подвержен изменениям, а кроме того, остается наблюдаемым в ситуациях, когда идентификацию человека невозможно выполнить на основе анализа таких распространенных типов биометрических данных, как изображение лица, голос человека, радужная оболочка глаза и отпечатки пальцев ввиду недостатка соответствующей информации [2]. Многие существующие методы анализа двигательной активности для выделения информации осуществляют сложную предобработку кадров, например, локализацию ключевых точек скелета человека [3], анализ изображений энергии походки, бинарного силуэта человека [4]. Соответствующая предобработка видеоданных замедляет процесс распознавания человека, а также требует выполнения предварительной корректировки кадров видеоряда. Альтернативным решением данной задачи является использование нейросетевых моделей распознавания, ориентированных на работу с RGB изображениями, полученными из ви-

деопотока, без предобработки. В данной работе предложен метод распознавания человека по походке, где в качестве основы рассматриваются сверточнорекуррентные и трехмерные нейросетевые архитектуры, которые не требуют предварительной обработки изображений или видеопотока и при этом позволяют достичь высокой точности распознавания.

Обзор методов идентификации человека по походке

В последние годы было разработано множество нейросетевых методов идентификации человека по походке, которые отличаются как технически [5]: архитектурами сетей, функциями потерь, способами обучения, так и концептуально: методами обработки данных и извлечения первичных признаков [6]. Большинство существующих методов классифицируют видео не напрямую по кадрам, а осуществляют анализ различных динамических характеристик походки, с помощью которых идентифицируется человек. Это связано с тем, что, при разной одежде, наличии различных вещей, например, сумки, а также при смене освещения, фигура и образ человека подвержены существенным изменениям, поэтому необходимо, чтобы система опиралась не на внешние признаки, а отталкивалась непосредственно от характеристик движения фигуры человека. Многие современные подходы к решению рассматриваемой задачи основаны как на анализе таких биометрических характеристик (человеческий

скелет, силуэт и их изменение при ходьбе), так и на признаках, получаемых при использовании методов машинного обучения в результате анализа биометрических данных с помощью сверточных нейронных сетей [7].

Среди существующих методов можно выделить несколько базовых подходов. К ним относятся подходы, использующие анализ человеческого скелета и признаки, сконструированные вручную. Соответствующие методы распознавания основаны на изучении осанки человека, положения суставов и основных частей тела и их движениях при ходьбе [3]. К базовым также могут быть отнесены подходы, связанные с бинарным силуэтом человека [8], такие как распознавание по изображениям энергии походки (Gait Energy Image, GEI) [4], по изображениям энтропии походки (Gait Entropy Image, GEnI) [6], по энергии разницы кадров (Frame Difference Energy Image, FDEI) [9], которые позволяют вычислять дальнейшие признаки, такие как гистограммы ориентированных градиентов (Histogram of Oriented Gradients, HOG-дескрипторы) или гистограммы оптического потока (Histogram of Optical Flow, HOF-дескрипторы) [10]. Построение изображений энергии походки является одним из наиболее популярных методов, обеспечивающих идентификацию человека по походке. Изображения энергии походки представляют собой усредненные по одному циклу походки бинарные маски силуэта движущегося человека. Изображения энергии походки характеризуют частоты нахождения человека в той или иной

позе во время движения. Данный базовый подход получил широкое распространение и лег в основу многих других методов распознавания человека по походке. Множество существующих подходов также основаны на схожей агрегации других базовых признаков, однако общим недостатком методов, использующих GEI для многоракурсного распознавания, является необходимость вычислять изображения энергии для каждого ракурса, присутствующего в выборке. Поэтому для каждого кадра видеоряда нужно знать, под каким углом он был снят, что в случае реальных данных возможно далеко не всегда. Для более качественного извлечения признаков можно использовать гистограммы оптического потока (HOF) и гистограммы ориентированных градиентов (HOG). Такие дескрипторы хорошо подходят для распознавания жестов [11], но требуют больших вычислительных ресурсов [12].

Более эффективный метод распознавания с использованием архитектуры LSTM и изображений энергии походки (GEI) предложен в работе [13]. Хотя пространственная информация в одной последовательности походки может быть хорошо представлена GEI, временная информация теряется. Чтобы решить эту проблему, авторы предлагают новый метод обучения для распознавания походки. Особенность метода заключается в использовании рекуррентной нейросетевой модели длительной краткосрочной памяти (Long Term Short Memory, LSTM) [14], соответствующая система может сохранять

временную информацию, повышая качество распознавания походки.

Стоит отметить, что нейросетевые методы, построенные на трехмерных сверточных архитектурах (3D CNN) [15-18], демонстрируют лучшие результаты в задачах распознавания большого количества классов действий на видео. При этом, особо стоит выделить архитектуру 3D CNN Inception 3D (I3D) [16], которая обладает широкими возможностями по обработке пространственно-временной динамики объектов на кадрах видео и показывает высокие результаты распознавания действий человека [16, 19]. Нейросетевые методы, основанные на применении сверточно-рекуррентных архитектур LSTM и Gated Recurrent Units (GRU) [20], также демонстрируют высокую точность в задачах распознавания действий человека на видеопоследовательностях [21]. При этом, модель GRU является более простой по сравнению с LSTM, обладая аналогичными LSTM достоинствами. Также стоит особо выделить, что 3D CNN и сверточно-рекуррентные архитектуры способны с высокой точностью выполнять распознавание действий на видео на основе анализа кадров без сложной предварительной их обработки, используя признаки, получаемые во время обучения нейронных сетей. Учитывая, что решения на основе таких признаков являются более универсальными и обычно не требуют сложной предварительной обработки изображений, а модели на основе 3D CNN и сверточно-рекуррентных архитектур являются при этом наиболее точными, в

данной работе в качестве основы для разрабатываемого подхода к решению задачи идентификации человека по походке было принято решение апробировать 5 нейросетевых архитектур. Одной из них является трехмерная сверточная нейронная сеть I3D. Другие 4 архитектуры представляют собой сверточно-рекуррентные сети: однонаправленная LSTM (LSTM-1), двунаправленная LSTM (LSTM-2), однонаправленная GRU (GRU-1) и двунаправленная GRU (GRU-2), скомбинированные со сверточной нейронной сетью архитектуры ResNet [22], используемой в данных архитектурах в качестве экстрактора визуальных признаков. Несмотря на то, что применение связки архитектур является довольно распространенным приемом, однако на данный момент такой подход ранее не применялся для решения задачи распознавания человека по походке, и соответственно, сравнение производительности различных вариантов архитектур также ранее не проводилось. Таким образом, далее в работе будет представлен разработанный подход к идентификации человека по походке, где в качестве классификаторов будут апробированы представленные выше нейросетевые модели.

Материалы и методы

Описание разработанного подхода к идентификации человека по походке

В соответствии с результатами проведенного анализа связанных методов и подходов, для обеспечения идентификации человека по походке в рамках ис-

следования предлагается авторский подход к решению данной задачи. Согласно предложенному подходу, задача идентификации человека формулируется как задача многоклассовой классификации на видеопоследовательностях, решение которой обеспечивается за счет применения специфичной нейросетевой модели в качестве классификатора. Итоговая метка класса человека, получаемая соответствующей моделью по результатам обработки исследуемой видеопоследовательности, и представляется в качестве конечного решения задачи.

Четыре из пяти нейросетевых моделей, апробированных в качестве классификатора в настоящем исследовании, основаны на сверточно-рекуррентном принципе работы. Рекуррентные нейронные сети обычно испытывают трудности с обработкой долгосрочных зависимостей из-за затухания или резкого увеличения градиента. Для решения данной проблемы были разработаны спе-

циальные архитектуры нейронных сетей, одной из которых является LSTM-сеть. Еще одной вариацией LSTM-сетей является архитектура на основе GRU, представленная в работе [20]. В этом варианте клапан забывания и входной клапан объединены в один – клапан обновления. Кроме того, объединены вместе состояние ячейки и скрытое состояние, а также присутствует ряд других второстепенных изменений. Полученная в результате модель является более простой, чем стандартные LSTM-модели, и, как следствие, в последнее время набирает все большую популярность. С учетом вышеописанных преимуществ для сравнения были выбраны оба варианта архитектуры нейронной сети и LSTM и более простая – GRU.

Обобщенная архитектура четырех сверточно-рекуррентных моделей (LSTM-1, LSTM-2, GRU-1, GRU-2), рассматриваемых в работе, представлена ниже на рис. 1.

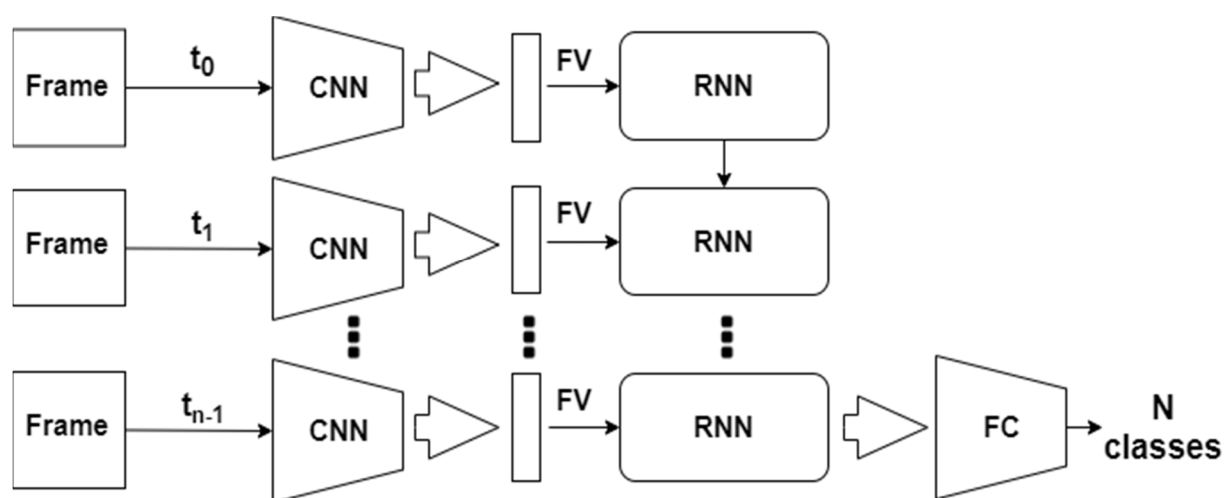


Рис. 1. Обобщенная схема комбинированной сверточно-рекуррентной архитектуры

Fig. 1. High-level diagram of a composite convolutional-recurrent architecture

В соответствии с данной архитектурой каждый кадр исследуемого видеоряда t_i поступает на вход экстрактору признаков CNN, представленному предварительно обученной на большом репрезентативном наборе изображений моделью глубокой сверточной нейронной сети. Данный экстрактор признаков осуществляет генерацию набора искусственных признаков FV_i . Полученные вектора признаков FV_i поступают на вход соответствующим блокам классификатора RNN, представленному рекуррентной нейронной сетью, в результате чего формируется результирующий набор прогнозов блоков классификации. FC – полносвязный выходной слой, обрабатывающий результаты работы выходного блока RNN. Данный слой выполняет итоговую классификацию обработанной последовательности кадров и прогнозирует метку идентифицированного человека на кадрах видеопоследовательности.

Для эффективного распознавания большого количества классов на изображениях, в качестве экстрактора признаков в моделях LSTM-1, LSTM-2, GRU-1, GRU-2 было принято решение воспользоваться сверточной нейронной сетью архитектуры resnet18 [22]. С помощью данной сети осуществляется выделение признаков визуальных объектов, которые впоследствии передаются в рекуррентную нейронную сеть. Выбор нейронной сети resnet18 в качестве блока CNN обусловлен ее широкой

распространённостью и возможностью легко применить подход переноса обучения (тонкой настройки). При таком подходе в предварительно обученной модели удаляются или заново обучаются выходные слои для адаптации к новой, схожей задаче. Данный подход позволяет намного быстрее обучать нейросетевые модели специфическим задачам и требует гораздо меньшего объема входных данных.

В качестве последней апробируемой архитектуры в рамках настоящего исследования была выбрана модель трехмерной сверточной нейронной сети I3D. Трехмерные сети на данный момент используют не так широко, однако такие сети способны самостоятельно обрабатывать временные последовательности кадров в видеопотоке и в отличие от рекуррентных нейронных сетей не требуют предварительного выделения признаков для визуальных объектов. В то время, как обычные двумерные сверточные нейросети способны обрабатывать многоканальные изображения по отдельности, трехмерные сверточные нейронные сети способны выполнять обработку последовательностей многоканальных изображений или кадров.

Модель трехмерной сверточной нейронной сети I3D содержит в архитектуре блоки 3D Inception [16], необходимые для анализа пространственно-временных характеристик движения визуальных объектов в видео. Такие блоки схожи с блоками Inception в нейрон-

ной сети Inception-V1 [23]: пять первых слоев данной модели представляют собой низкоуровневые слои трехмерной свертки и слои пространственно-временных экстракторов признаков. Карта признаков, полученная из этих слоев, обрабатывается последовательными Inception-блоками и трехмерными слоями. Inception-блок, в свою очередь, распараллеливает обработку карты признаков, полученной на предыдущем слое, с помощью четырех различных ветвей. Результатом работы блока является конкатенация карт признаков, полученных с помощью этих четырех ветвей. Выход нейросетевой модели I3D реализует классификатор и представляет собой трехмерный сверточный слой размером (1x1x1), с активационной функцией softmax.

Для всех рассматриваемых архитектур, в качестве функции ошибок, определяющей качество работы нейронных сетей во время обучения, была выбрана логарифмическая функция потерь или перекрестная энтропия:

$$\text{logloss} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N y_i \log \hat{y}_i,$$

где N – количество классов; y_i – эталонное значение класса; $\hat{y}_i$ – актуальное значение класса, сгенерированное нейронной сетью. Выбор функции обусловлен тем, что перекрестная энтропия в задачах классификации обеспечивает более быструю сходимость алгоритмов обучения по сравнению с другими функциями потерь. Более низкое значение потерь

означает лучшие прогнозы [24]. В качестве оптимизатора, который управляет обратным распространением ошибки, был использован алгоритм Adam (Adaptive Momentum Estimation), который зарекомендовал себя при использовании в больших моделях и при работе с большими наборами данных [25].

В данной работе в качестве функции активации была выбрана логарифмическая нормализованная экспоненциальная функция (logsoftmax). Данная функция является расширением функции softmax и является более стабильной, чем стандартная softmax, с точки зрения выполнения вычислительных операций с плавающей точкой [26].

Далее перейдем к оценке результатов обучения представленных выше моделей с точки зрения их применимости в рамках предложенного подхода к решению задачи идентификации человека по походке на видеопоследовательностях.

Результаты и их обсуждение

Апробация и оценка качества функционирования разработанного подхода к идентификации человека по походке на видеопоследовательностях производилась на основе набора данных CASIA Gait Database [27], поскольку он является одним из самых больших наборов данных для анализа движения и походки. Данный набор данных был составлен в исследовательских целях и содержит в себе большой объем данных

различного типа. Содержащиеся в наборе видеофайлы были записаны следующим образом: каждый из 124 людей прошел со своей привычной походкой перед 11 видеокамерами, таким образом получилось 11 разных углов прохода от 0 до 180 градусов. Кроме того, те же самые персоны повторили свою походку, сменяя одежду и вещи (сумка, портфель), влияющие на их походку. Таким образом, было сформировано 15004 видеофайла разрешением 320x240 пикселей.

Каждой видеопоследовательности (набору кадров) в выборке ставится в соответствие своя метка (label), указывающая идентификатор субъекта: от 0 до 123. Данные метки необходимы для обеспечения процесса обучения с учителем. Для обучения предложенных в настоящем исследовании нейросетевых моделей используется обучающая выборка, которая содержит 80% от общего количества всех видеофайлов в наборе данных CASIA Gait Database. В процессе обучения на вход каждой нейросетевой модели в зависимости от конкретной архитектуры поступали 16 или 32 подряд идущих кадра видеоряда, при этом начальный кадр определялся случайным образом – таким образом выполнялась временная аугментация данных. В качестве пространственной аугментации кадров видеопотока выполнялись следующие процедуры: случайный поворот изображения на $\pm 15^\circ$, зер-

кальное отражение кадров и вырезание случайного фрагмента на кадре. При этом, выбранные процедуры выполнялись единым образом для всех кадров обрабатываемого нейронной сетью фрагмента. Обучение всех реализованных моделей производилось на полном наборе данных из 124 меток. Примеры работы, реализованной идентификации человека по походке в видеопотоке с помощью апробируемых нейросетевых моделей, представлены на рис. 2.

На представленных выше иллюстрациях работы нейросетевой модели GRU-1 в левом нижнем углу отображаются: предсказанный нейронной сетью индекс (метка) человека на видео (prediction), точность, с которой была предсказана метка (valid label), а также действительное значение метки для данной видеопоследовательности (probability).

По результатам ряда экспериментов по обучению рассматриваемых нейросетевых моделей, эвристически были установлены оптимальные значения числа эпох для обучения: 200 эпох для обучения I3D модели и 150 для сверточнорекуррентных моделей (рис. 3). При обучении после каждой эпохи проводилась процедура валидации на тестовых данных, с помощью которой, во-первых, выполнялась проверка качества работы моделей, и, во-вторых, выполнялся контроль значений функции потерь для борьбы с переобучением.



Рис. 2. Примеры идентификации человека по походке в видеопотоке с помощью нейросетевой модели GRU-1

Fig. 2. Examples of human identification by gait in video stream, based on a neural network model GRU-1

Выбор указанного выше количества эпох обусловлен тем, что в ходе обучения рассматриваемых нейронных сетей при увеличении количества эпох значение функции потерь снижается и на этапе обучения, и на этапе валидации, что свидетельствует об отсутствии переобучения. Кроме того, значение функции потерь с увеличением количества эпох стабилизируется. Таким образом, выбор такого количества эпох позволяет соблюсти баланс между общим временем, затрачиваемым на обучение моделей нейронных сетей, и получаемой точностью.

На основе данных, полученных в результате применения разработанного подхода к набору тестовых видеопоследовательностей, были сформированы количественные оценки точности работы (ассигасу) апробированных архитектур нейросетевых моделей. В качестве тестового набора видеопоследовательностей выступала валидационная часть набора данных CASIA Gait Database. Полученные результаты представлены ниже в табл. 1.

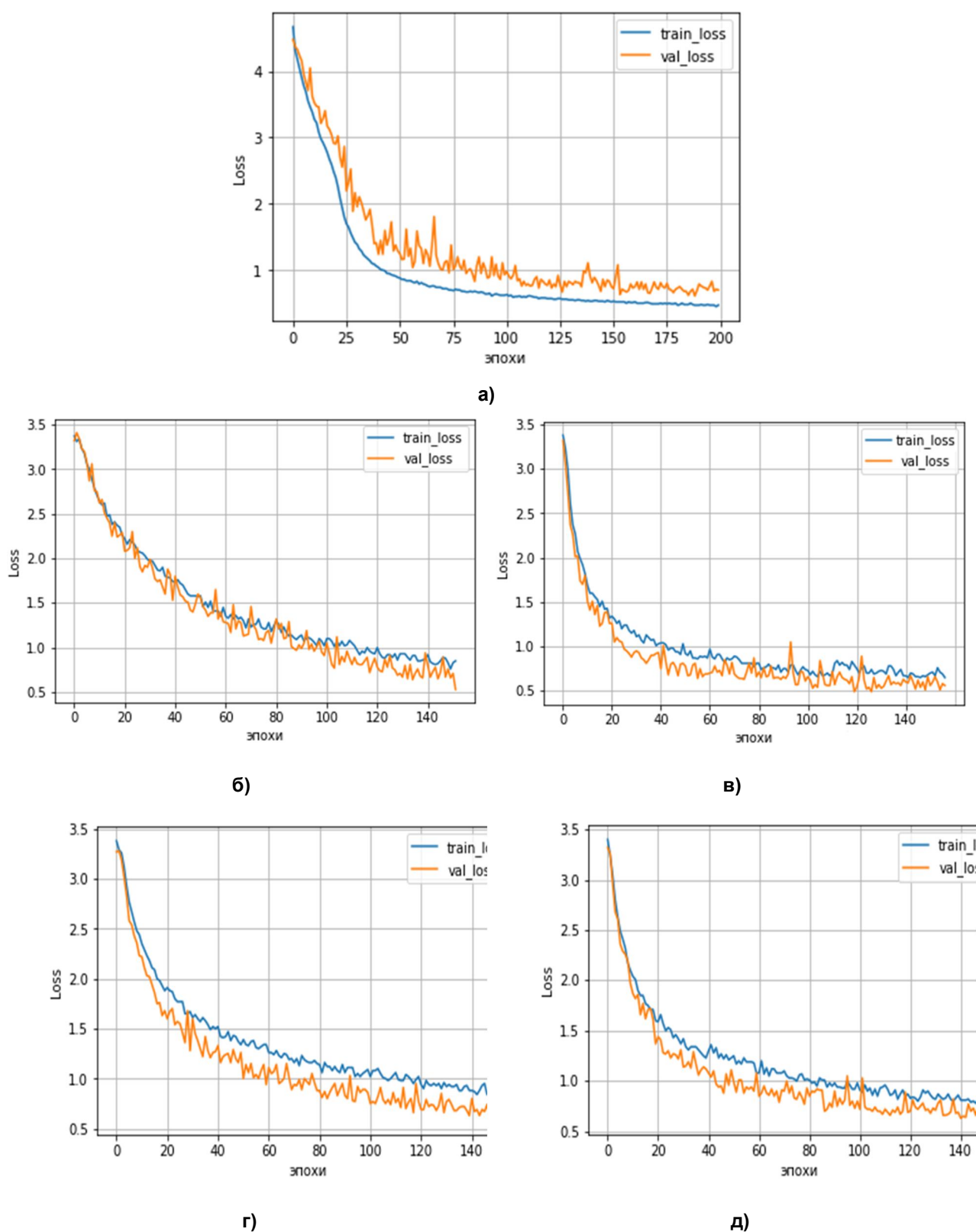


Рис. 3. График зависимости величины ошибки от количества пройденных эпох обучения: модели I3D (а), модели LSTM-1 (б), модели GRU-1 (в), модели LSTM-2 (г), модели GRU-2 (д)

Fig. 3. Curve of error value depending on the number of model learning epochs passed: model I3D (а), model LSTM-1 (б), model GRU-1 (в), model LSTM-2 (г), model GRU-2 (д)

Таблица 1. Оценки точности идентификации человека по походке с использованием различных нейросетевых моделей

Table 1. Estimation of accuracy of human identification by gait, using various neural network models

Нейросетевая модель / Neural network model	Accuracy
GRU-1	85%
LSTM-1	83%
LSTM-2	82%
GRU-2	81%
I3D	79%
Sokolova [2]	74%
Wu [27]	73%
Yu, SPAE [28]	64%
Yu, GaitGAN [29]	63%
Feng [13]	58%

Как можно заметить из таблицы, предложенные модели на основе архитектуры I3D и сверточно-рекуррентных архитектур показали более высокую точность, чем существующие методы решения задачи идентификации человека по походке. В частности, в рамках экспериментальной оценки средняя точность определения человека по походке в видеопотоке с использованием трехмерной сверточной модели I3D составила 79%. Для сверточно-рекуррентных архитектур наилучшие показатели точности составили 83% и 85% для LSTM-1 и GRU-1 моделей соответственно. По результатам моделирования следует также отметить, что рекуррентные модели способны покадрово обрабатывать информацию и выводить результаты в реальном масштабе времени. Среднее время обработки одного кадра составляет 0,2067 с для LSTM и 0,2097 с для GRU на CPU AMD RYZEN 7 2700x.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что среди всех апробированных нейросетевых архитектур лучшие показатели качества работы характерны для сверточно-рекуррентных нейросетевых моделей, среди которых, в свою очередь, наилучшие показатели продемонстрировали однонаправленные рекуррентные модели. Модель на основе трехмерной сверточной нейронной сети I3D с точки зрения точности работы показала результат, сопоставимый с другими апробированными архитектурами, однако данная модель является более ресурсоемкой с точки зрения выполняемых операций с плавающей точкой. Кроме того, нейросетевая модель I3D не способна выполнять классификацию в порядке поступления кадров видеопотока. Для выполнения классификации трехмерные сверточные нейросети должны обрабатывать цельные последовательности кадров заданной длины. В то время как модели, основанные на применении сверточно-рекуррентных архитектур, способны покадрово обрабатывать видеопоток и выполнять классификацию после обработки каждого кадра в порядке их поступления. В табл. 2 приведены результаты времени обработки последовательности из 32 кадров разрешением 224x224 пикселя, что примерно соответствует секунде воспроизведения видеоряда с частотой, равной 30 кадров/с, на вычислительном оборудовании следующей конфигурации: ЦПУ Intel i7 6700k 4000 МГц, ОЗУ 32 ГБ DDR4 2133 МГц, графический процессор общего назначения Nvidia GTX 1080.

Таблица 2. Полученные результаты в отношении времени обработки 32 кадров видеопоследовательности рассматриваемыми нейросетевыми моделями

Table 2. Processing time values, obtained on video stream of 32 frames using the neural network models considered

Модель / Model	Время обработки на ЦПУ, с / The processing time on CPU, c	Время обработки на GPU, с / The processing time on the GPU, c
I3D	1.432	0.041
LSTM-1	0.809	0.065
LSTM-2	0.804	0.065
GRU-1	0.847	0.070
GRU-2	0.826	0.069

Из табл. 2 видно, что время обработки последовательности из 32 кадров моделью I3D на графическом ускорителе ниже, чем сверточно-рекуррентными нейросетевыми архитектурами. В то же время обработка последовательности из 32 кадров моделью I3D на центральном процессоре существенно превышает время работы на графическом ускорителе ввиду большой вычислительной сложности операций трехмерных сверток, которые лежат в основе архитектуры I3D. Таким образом, в качестве классификатора для разработанного подхода к идентификации человека по походке на видеопоследовательности с точки зрения точности и скорости работы моделей, а также возможности покадровой обработки видеопотока предпочтительным является использование сверточно-рекуррентных архитектур на основе LSTM-1 или GRU-1 моделей соответственно.

Выводы

По результатам апробации разработанного подхода к идентификации человека по походке на наборе данных

CASIA Gait Database, предложенное решение продемонстрировало высокое качество работы для всех рассмотренных нейросетевых моделей. В частности, точность идентификации человека с использованием в качестве классификатора трехмерной сверточной нейронной сети I3D составила 79%. Другие 4 рассмотренные сверточно-рекуррентные архитектуры продемонстрировали еще более высокие показатели: двунаправленная GRU – 81%, двунаправленная LSTM – 82%, однонаправленная LSTM – 83% и однонаправленная GRU – 85%. Результаты, продемонстрированные разработанным методом с использованием данных архитектур, существенно превосходят известные подходы, основанные как на использовании динамических характеристик походки, анализе человеческого скелета, сконструированных вручную признаков, так и подходы, в основе которых лежит применение других нейросетевых моделей. Кроме того, при использовании предложенного подхода не требуется осуществлять предварительную обработку кадров видеоряда, а также выполнять извлечение признаков вручную.

Несмотря на близкие по точности результаты, рассмотренные сверточнорекуррентные модели обладают возможностью кадрово́й обработки видео, показывают более высокую точность идентификации, меньшее время обработки данных на центральном процессоре и более высокую скорость обучения в сравнении с моделью I3D. Таким образом, в качестве классификатора для разработанного подхода к идентификации человека по походке на ви-

деопоследовательности предпочтительным является использование сверточнорекуррентных архитектур на основе односторонней LSTM или GRU моделей соответственно.

В дальнейшем предполагается исследовать возможность модернизации разработанного подхода для повышения эффективности его работы в условиях наличия нескольких людей на кадрах анализируемой видеопоследовательности.

Список литературы

1. Распознавание лиц на групповых фотографиях с использованием алгоритмов сегментации / А.И. Шерстобитов, В.П. Федосов, В.А. Приходченко, М.В. Тимофеев // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. 11(148). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspoznavanie-lits-na-gruppovyh-fotografiyah-s-ispolzovaniem-algoritmov-segmentatsii>
2. Sokolova A., Konushin A. Gait recognition based on convolutional neural networks // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. 2017. XLII-2/W4. P. 207-212. <https://doi.org/isprs-archives-XLII-2-W4-207-2017>
3. Sokolova A., Konushin A. Pose-based deep gait recognition // IET Biometrics. 2018. 8(2). P. 134-143. <https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2018.5046>
4. Han J., Bhanu B. Individual recognition using gait energy image // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2005. 28(2). P. 316-322. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.38>
5. Лютов В.С., Конушин А.С., Арсеев С.П. Распознавание человека по походке и внешности // Программирование. 2018. № 4. С. 97-106. <https://doi.org/10.31857/S000523100000515-0>
6. Соколова А.И., Конушин А.С. Методы идентификации человека по походке в видео // Труды Института системного программирования РАН. 2019. №31(1). С. 69-82. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(1\)-5](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-5)
7. Alotaibi M., Mahmood A. Improved gait recognition based on specialized deep convolutional neural network // Computer Vision and Image Understanding. 2017. № 164. P. 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2017.10.004>
8. Малашин Р.О., Луцив В.Р. Восстановление силуэта руки в задаче распознавания жестов с помощью адаптивной морфологической фильтрации бинарного изображения // Оптический журнал. 2013. № 80(11). С. 54-61.

9. Frame difference energy image for gait recognition with incomplete silhouettes / C. Chen, J. Liang, H. Zhao, H. Hu, J. Tian // Pattern Recognition Letters. 2009. №30(11). P. 977-984. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.04.012>
10. Castro F.M., Marín-Jimenez M.J., Medina-Carnicer R. Pyramidal Fisher Motion for Multiview Gait Recognition // 2014 22nd International Conference on Pattern Recognition, Stockholm. 2014. P. 1692-1697. <https://doi.org/doi: 10.1109/ICPR.2014.298>
11. Kaaniche M.B., Bremond F. Tracking hog descriptors for gesture recognition // 2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. IEEE, 2009. P. 140-145. <https://doi.org/10.1109/AVSS.2009.26>
12. Realtime video classification using dense hof/hog / J.R.R. Uijlings, I.C. Duta, N. Rostamzadeh, N. Sebe // Proceedings of international conference on multimedia retrieval. 2014. P. 145-152. <https://doi.org/10.1145/2578726.2578744>
13. Feng Y., Li Y., Luo J. Learning effective gait features using LSTM // 2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR). IEEE, 2016. P. 325-330. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2016.7899654>
14. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural computation. 1997. № 9(8). P. 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
15. Learning spatiotemporal features with 3d convolutional networks / D. Tran, L. Bourdev, R. Fergus, L. Torresani, M. Paluri // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 4489-4497. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.510>
16. Carreira J., Zisserman A. Quo vadis, action recognition? A new model and the kinetics dataset // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. P. 6299-6308. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.502>
17. Hara K., Kataoka H., Satoh Y. Learning spatio-temporal features with 3D residual networks for action recognition // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. 2017. P. 3154-3160. <https://doi.org/10.1109/ICCVW.2017.373>
18. Hara K., Kataoka H., Satoh Y. Can spatiotemporal 3d cnns retrace the history of 2d cnns and imagenet? // Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 6546-6555. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00685>
19. Saveliev A., Uzdiaev M., Dmitrii M. Aggressive Action Recognition Using 3D CNN Architectures // 2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE). IEEE, 2019. P. 890-895. <https://doi.org/10.1109/10.1109/DeSE.2019.00165>
20. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation / K. Cho, B. Van Merriënboer, C. Gulcehre, D. Bahdanau, F. Bougares, H. Schwenk, Y. Bengio // arXiv preprint arXiv:1406.1078. 2014. URL: <https://arxiv.org/abs/1406.1078>
21. Beyond short snippets: Deep networks for video classification / J. Yue-Hei Ng, M. Hausknecht, S. Vijayanarasimhan, O. Vinyals, R. Monga, G. Toderici // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. P. 4694-4702. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299101>

22. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. P. 770-778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
23. Going deeper with convolutions / C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, A. Rabinovich // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
24. What is Log Loss? [Quoted May 6, 2020]. URL: <https://www.kaggle.com/dansbecker/what-is-log-loss>
25. Kingma D.P., Ba J. Adam. A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>
26. Logsoftmax vs softmax [Quoted May 6, 2020]. URL: <https://discuss.pytorch.org/t/logsoftmax-vs-softmax/21386>
27. A comprehensive study on cross-view gait based human identification with deep cnns / Z. Wu, Y. Huang, L. Wang, X. Wang, T. Tan // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2016. № 39(2). P. 209-226. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2545669>
28. Invariant feature extraction for gait recognition using only one uniform model / S. Yu, H. Chen, Q. Wang, L. Shen, Y. Huang // Neurocomputing. 2017. 239. P. 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.02.006>
29. GaitGAN: Invariant Gait Feature Extraction Using Generative Adversarial Network / S. Yu, H. Chen, E.B.G. Reyes, N. Poh // In Proc. of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). 2017. P. 532-539. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.80>

References

1. Sherstobitov A.I., Fedosov V.P., Prihodchenko V.A., Timofeev D.V. Raspoznavanie lits na gruppovykh fotografiyakh s ispol'zovaniem algoritmov segmentatsii [Face recognition on groups photos with using segmentation algorithms]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Southern Federal University. Technical science*, 2013, no. 11(148) (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspoznavanie-lits-na-gruppovykh-fotografiyah-s-ispolzovaniem-algoritmov-segmentatsii>
2. Sokolova A., Konushin A. Gait recognition based on convolutional neural networks. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2017; XLII-2/W4, pp. 207-212. <https://doi.org/isprs-archives-XLII-2-W4-207-2017>
3. Sokolova A., Konushin A. Pose-based deep gait recognition. *IET Biometrics*, 2018, no. 8(2), pp. 134-143. <https://doi.org/10.1049/iet-bmt.2018.5046>
4. Han J., Bhanu B. Individual recognition using gait energy image. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2005, no. 28(2), pp. 316-322. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.38>

5. Liutov V., Konushin A., Arseev S. Raspoznavanie cheloveka po pokhodke i vneshnosti [Human recognition by appearance and gait]. *Programmirovaniye = Programming and Computer Software*, 2018, no. 44(4), pp. 258-265 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S000523100000515-0>
6. Sokolova A.I., Konushin A.S. Metody identifikatsii cheloveka po pokhodke v video [Methods of gait recognition in video]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*, 2019, no. 31(1), pp. 69-82 (In Russ.). [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31\(1\)-5](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-5)
7. Alotaibi M., Mahmood A. Improved gait recognition based on specialized deep convolutional neural network. *Computer Vision and Image Understanding*, 2017, no. 164, pp. 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2017.10.004>
8. Malashin R.O., Lutsiv V.R. Vosstanovlenie silueta ruki v zadache raspoznavaniya zhestov s pomoshch'yu adaptivnoi morfologicheskoi fil'tratsii binarnogo izobrazheniya [Restoring a silhouette of the hand in the problem of recognizing gestures by adaptive morphological filtering of a binary image]. *Opticheskii zhurnal = Journal of Optical*, 2013, no. 80(11), pp. 54-61 (In Russ.). <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000685>
9. Chen C., Liang J., Zhao H., Hu H., Tian J. Frame difference energy image for gait recognition with incomplete silhouettes. *Pattern Recognition Letters*, 2009, no. 30(11), pp. 977-984. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.04.012>
10. Castro F.M., Marín-Jimenez M.J., Medina-Carnicer R. Pyramidal Fisher Motion for Multiview Gait Recognition. *2014 22nd International Conference on Pattern Recognition*, Stockholm, 2014, pp. 1692-1697. <https://doi.org/doi:10.1109/ICPR.2014.298>
11. Kaaniche M.B., Bremond F. Tracking hog descriptors for gesture recognition. *2009 Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*. IEEE, 2009, pp. 140-145. <https://doi.org/10.1109/AVSS.2009.26>
12. Uijlings J.R.R., Duta I.C., Rostamzadeh N., Sebe N. Realtime video classification using dense hof/hog. *Proceedings of international conference on multimedia retrieval*, 2014, pp. 145-152. <https://doi.org/10.1145/2578726.2578744>
13. Feng Y., Li Y., Luo J. Learning effective gait features using LSTM. *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. IEEE, 2016, pp. 325-330. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2016.7899654>
14. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural computation*, 1997, no. 9(8), pp.1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
15. Tran D., Bourdev L., Fergus R., Torresani L., Paluri M. Learning spatiotemporal features with 3d convolutional networks. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015, pp. 4489-4497. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.510>
16. Carreira J., Zisserman A. Quo vadis, action recognition? a new model and the kinetics dataset. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 6299-6308. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.502K>

17. Hara K., Kataoka H., Satoh Y. Learning spatio-temporal features with 3D residual networks for action recognition. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, 2017, pp. 3154-3160. <https://doi.org/10.1109/ICCVW.2017.373>
18. Hara K., Kataoka H., Satoh Y. Can spatiotemporal 3d cnns retrace the history of 2d cnns and imagenet? *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 6546-6555. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00685>
19. Saveliev A., Uzdiaev M., Dmitrii M. Aggressive Action Recognition Using 3D CNN Architectures. *2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*. IEEE, 2019, pp. 890-895. <https://doi.org/10.1109/10.1109/DeSE.2019.00165>
20. Cho K., Van Merriënboer B., Gulcehre C., Bahdanau D., Bougares F., Schwenk H., Bengio Y. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation. arXiv preprint arXiv:1406.1078. 2014. Available at: <https://arxiv.org/abs/1406.1078>
21. Yue-Hei Ng J., Hausknecht M., Vijayanarasimhan S., Vinyals O., Monga R., Toderici G. Beyond short snippets: Deep networks for video classification. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp.4694-4702. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299101>
22. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 770-778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
23. Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A. Going deeper with convolutions. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>
24. What is Log Loss? [Quoted May 6, 2020]. Available at: <https://www.kaggle.com/dansbecker/what-is-log-loss>
25. Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>
26. Logsoftmax vs softmax [Quoted May 6, 2020]. Available at: <https://discuss.pytorch.org/t/logsoftmax-vs-softmax/21386>
27. Wu Z., Huang Y., Wang L., Wang X., Tan T. A comprehensive study on cross-view gait based human identification with deep CNNS. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2016, no. 39(2), pp. 209-226. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2545669>
28. Yu S., Chen H., Wang Q., Shen L., Huang Y. Invariant feature extraction for gait recognition using only one uniform model. *Neurocomputing*. 2017, no. 239, pp. 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.02.006>
29. Yu S., Chen H., Reyes E. B. G., Poh, N. GaitGAN: Invariant Gait Feature Extraction Using Generative Adversarial Network. In *Proc. of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. 2017, pp. 532-539. <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.80>

Информация об авторах / Information about the Authors

Уздяев Михаил Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: m.y.uzdiaev@gmail.com

Яковлев Роман Никитич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Дударенко Дмитрий Михайлович, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: dmitry@dudarenko.net

Жебрун Александр Дмитриевич, программист лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sashakotovich@gmail.com

Mikhail Yu. Uzdiaev, Junior Researcher of Laboratory of Big Data in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: m.y.uzdiaev@gmail.com

Roman N. Iakovlev, Junior Researcher of Laboratory of Big Data in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: iakovlev.r@mail.ru

Dmitry M. Dudarenko, Junior Researcher of Laboratory of Big Data in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: dmitry@dudarenko.net

Aleksandr D. Zhebrun, Programmer of Laboratory of Big Data in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: sashakotovich@gmail.com

Моделирование конфигурации робототехнического захвата для манипуляций с сельскохозяйственной продукцией

Д.К. Ву¹, А.Л. Ронжин¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
14-я линия В.О. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Резюме

Цель исследования. Повышение качества и скорости сбора сельскохозяйственной продукции за счёт разработки моделей, алгоритмов управления и многокритериальной оптимизации конфигурации робототехнического захвата.

Методы. Для достижения поставленной цели в работе использовались методы математического и компьютерного моделирования, многокритериальной оптимизации, теории объектно-ориентированного проектирования и программирования. Описана математическая модель кинематической схемы прототипа робототехнического захвата, ее геометрические ограничения и целевые функции, используемые при оптимизации.

Результаты. Выполнен обзор подходов к роботизированной уборке сельскохозяйственной продукции, подтверждающий актуальность данного исследования конфигураций робототехнического захвата, обеспечивающего надежную без нанесения повреждений фиксацию объекта. Представлены результаты экспериментов по оцениванию разработанных алгоритмов и программной системы оптимизации конфигурации робототехнического захвата. Разработанная программная система AgroGripModeling для моделирования конфигурации робототехнического захвата с использованием трёх апостериорных алгоритмов NSGA-II, MOGWO и MOPSO многокритериальной оптимизации апробирована при проектировании прототипа четырёхпалого захвата с вакуумным сильфоном для сбора томатов.

Заключение. При проектировании робототехнического захвата необходимо учитывать разнообразие манипулируемых объектов, сложность их идентификации и наведения манипулятора в сложной естественной среде с препятствиями. Задача оптимизации механизма захвата связана с выполнением ряда противоречивых требований по надёжности, мягкости, точности, скорости, энергоэффективности, формирующих сложное пространство поиска решений. Разработанная программная система AgroGripModeling обеспечивает моделирование конфигурации робототехнического захвата и оценивание ее качества с использованием трёх апостериорных алгоритмов NSGA-II, MOGWO и MOPSO. Апробация системы проведена при многокритериальной оптимизации конфигурации прототипа четырёхпалого захвата с вакуумным сильфоном для сбора томатов.

Ключевые слова: робототехнический захват; кинематическая схема; многокритериальная оптимизация; программная система AgroGripModeling.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Ву Д.К., Ронжин А.Л. Моделирование конфигурации робототехнического захвата для манипуляций с сельскохозяйственной продукцией // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 76-90. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-76-90>.

Поступила в редакцию 05.10.2020

Подписана в печать 29.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Modeling the Configuration of a Robotic Gripper for Handling Agricultural Products

Quyen D. Vu¹, Andrey L. Ronzhin¹ ✉

¹ St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIRAS)
39, 14-th Line V.O., St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Abstract

Purpose of research. Improvement of quality and speed of harvesting agricultural products through the development of models, control algorithms and multi-criteria optimization of the robotic gripper configuration.

Methods. To achieve this goal, we have used the methods of mathematical and computer modeling, multi-criteria optimization, the theory of object-oriented design and programming. The mathematical model of the kinematic scheme of the prototype of the robotic gripper, its geometric constraints and objective functions used for optimization are described.

Results. It has been performed a review of approaches to robotic harvesting of agricultural products, confirming the relevance of this study of robotic gripper configurations, which provides reliable fixation of an object without causing damage. The results of experiments on evaluating the developed algorithms and a software system for optimizing the configuration of a robotic gripper are presented. The developed software system AgroGripModeling for modeling the configuration of a robotic gripper using three a posteriori algorithms NSGA-II, MOGWO and MOPSO for multicriteria optimization is tested in the design of a prototype of a four-fingered gripper with a vacuum bellows for picking tomatoes.

Conclusion. When designing a robotic gripper, it is necessary to take into account the variety of manipulated objects, the complexity of their identification and guidance of the manipulator in a complex natural environment with obstacles. The task of optimizing the capture mechanism is associated with the fulfillment of a number of conflicting requirements for reliability, softness, accuracy, speed, energy efficiency, which form a complex space for finding solutions. The developed AgroGripModeling software system provides modeling of the robotic gripping configuration and its quality assessment using three a posteriori algorithms NSGA-II, MOGWO and MOPSO. The system was tested with multicriteria optimization of the configuration of a prototype of a four-fingered gripper with a vacuum bellows for picking tomatoes.

Keywords: robotic gripper; kinematic diagram; multi-criteria optimization; AgroGripModeling software system.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Vu Q. D., Ronzhin A. L. Modeling the Configuration of a Robotic Gripper for Handling Agricultural Products. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 76-90 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-76-90>.

Received 05.10.2020

Accepted 29.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

Традиционный сбор фруктов и овощей для свежего рынка является трудоёмкой задачей, требующей перехода от утомительного ручного управления к непрерывно автоматизированному сбору урожая. Чтобы роботизированная уборка была рентабельной, урожай фруктов должен быть максимально увеличен, чтобы компенсировать дополнительные затраты на автоматизацию [1]. Например, труд для сбора урожая составляет более 50% от общих производственных затрат и около 71% от общего человеческого труда, необходимого для производства черешни. С ростом конкуренции возможность снижения себестоимости продукции за счёт механизации уборки становится все более актуальной. Изменчивость механических, физических и геометрических характеристик плодов и методов их сбора не позволяет создавать универсальные робототехнические системы, поэтому в настоящий момент ведутся исследования по проектированию механизмов обработки плодов отдельных культур [2,3].

Теоретические и прикладные исследования по роботизированной уборке фруктов и овощей привели к созданию прототипов роботов для различных видов сельскохозяйственной продукции: томаты, огурцы, клубника, томаты черри, сладкий перец, баклажаны и фруктовый сад: яблоко, цитрусовые [4,5].

Томаты являются наиболее популярными овощами, ежегодно их производится 177 млн тонн в мире. Поэтому автоматическая уборка томатов стала перспективной альтернативой ручной уборке, и были инициированы исследования по разработке роботов для уборки томатов. В работе [6] разработан роботизированный сборщик томатов для непрерывного селективного сбора зрелых томатов. Цель этого проекта состояла в том, чтобы разработать сенсорный блок и роботизированный ручной блок, который можно было бы интегрировать с коммерческим роботизированным манипулятором для автоматизированного сбора урожая томатов. 6-осевой шарнирный робот-манипулятор UPJ имеет внутреннюю схему электрических и пневматических линий. В среднем время цикла сбора и размещения одного томата составляло приблизительно 3 минуты 47 секунд, включая время, необходимое для машинного зрения. Показатели успешности распознавания и сбора плодов томатов были выше 95% и 85% соответственно.

В работе [7] описан робот для сбора томатов, состоящий из подвижной платформы, системы технического зрения, манипулятора и захвата. Результаты исследования показали, что в 73% случаев робот успешно автоматически определял объект для захвата на основных стеблях гроздей томатов, из 100%, которые были визуально идентифицированы человеком.

В работе [8] спроектирован и разработан автономный робот для уборки томатов, который состоит из ротационного захватного устройства, манипулятора 6-DOF, стереокамеры и наземной платформы с всенаправленными колёсами. При неудачной уборке томатов выделяются 3 основных типа проблемных случаев: 1) томат не оказался в захвате; 2) томат успешно собран, но частично повреждён; 3) несколько томатов одновременно оказались в захвате. Средняя длительность одного цикла наведения, захвата и съёма томата составляла 23 с, а общий процент успешной работы – 60%.

Робот с двумя манипуляторами был разработан в работе [9] для уборки томатов в теплице. Робот содержит также следующие модули: сменные захваты модульного типа, система видеонаблюдения со стереоскопической камерой, система связи и управления и пользовательский интерфейс. Результаты полевых испытаний показали эффективность разработанной робототехнической системы, также были обнаружены некоторые недостатки робота.

В работе [10] рассмотрен робот для уборки томатов, который состоял из независимой системы рулевого управления с четырьмя колёсами, системы сбора урожая с 5-DOF, навигационной системы и бинокулярной системы стереозрения. Из-за ограниченного рабочего пространства в теплице выбранный манипулятор 5-DOF состоит из механической штанги 4-DOF и захвата 1-DOF.

Точность системы бинокулярного зрения при распознавании спелых томатов составила 99,3%. Когда расстояние составляло менее 600 мм, ошибка позиционирования составляла менее 10 мм. Время, необходимое для распознавания спелых томатов и захвата, составляло около 15 с на томат с вероятностью успешного сбора около 86%.

По сравнению с уборкой томатов задача робототехнической уборки плодов огурца является более сложной. Зелёный цвет зрелого огурца соответствует цвету листьев и стеблей и затрудняет распознавание плодов. Кроме того, огурец – это вид культуры, который растёт в подвешенном состоянии, и плоды которого обычно колеблются в воздухе, и поэтому его трудно захватить при сборе урожая. В то же время плод обладает достаточной твёрдостью и поэтому огурец является одной из наиболее типичных культур среди фруктов и овощей для исследований робототехнических захватов.

В работе [11] разработана концепция автономного робота для уборки огурцов в теплицах. Он состоит из автономного транспортного средства, манипулятора с 7-DOF, рабочего органа, 2 систем видеонаблюдения и различного электронного и пневматического оборудования. Рабочий орган включает в себя захват и всасывающий стакан для схватывания фруктов и устройство термической резки для отделения плодов от растения. На испытаниях в теплице в 74,4% случаев робот успешно снимал

плоды [12]. В среднем один успешный цикл сбора плода занимал 65,2 с. Также испытания подтвердили способность собирать более одного огурца с использованием одного набора изображений, что позволило сократить время цикла успешного сбора урожая до 56,7 и 53,0 с, если было собрано два или три огурца соответственно.

В работе [13] описано исследование в области роботизированной техники для уборки огурцов, включая схему выращивания огурцов, конструирование и производство роботов, анализ кинематики роботов и систему управления роботами. Робот состоит из манипулятора с 6-DOF и захвата с 1 степенью свободы для срезания плода. Испытания по сбору огурцов показали удовлетворительную точность позиционирования уборочного робота, успешное отрезание и захват огурцов в 93% случаев.

Представленный в работе [10] робот для сбора огурцов состоит из автономной подвижной платформы, системы распознавания плодов, манипулятора, гибкого захвата и энергетической системы. Робот использует компактный интеллектуальный шарнирный манипулятор с 4-DOF. Тепличные испытания показали, что робот может динамически распознавать, определять пространственное положение и собирать зрелые огурцы, и успешная уборка была достигнута в 85% случаев. Среднее время сбора одного плода составило 28,6 с.

Проведенный обзор технических решений и конструкций робототехниче-

ских захватов сельскохозяйственной продукции доказывает актуальность данного направления и необходимость исследования и других задач, требующих роботизации с привлечением беспилотных летательных аппаратов и систем группового управления роботами [14-17].

Материалы и методы

В ходе исследования был разработан робототехнический захват для сбора томатов, который состоит из нескольких конструктивных модулей: 1) мехатронная система на основе четырёхпалого захвата; 2) вакуумное всасывающее сопло для фиксации плода; 3) линейный привод вакуумной системы. Отличительной особенностью конфигурации захвата является возможность перемещения вакуумного всасывающего сопла одновременно с действием четырёхпалого механизма. Использование отдельного сервопривода для перемещения всасывающего сопла усложняет конфигурацию и алгоритм управления конечным эффектором. Поэтому в предложенной конфигурации используется один линейный привод для синхронного перемещения пальцев и всасывающего сопла с помощью реечной передачи.

На рис. 1 показана компьютерная модель четырёхпалого захвата со следующими обозначениями: 1 – пальцы захвата; 2 – резиновая прокладка; 3 – стержень; 4 – всасывающее сопло; 5 – привод; 6 – пневмотрубка.

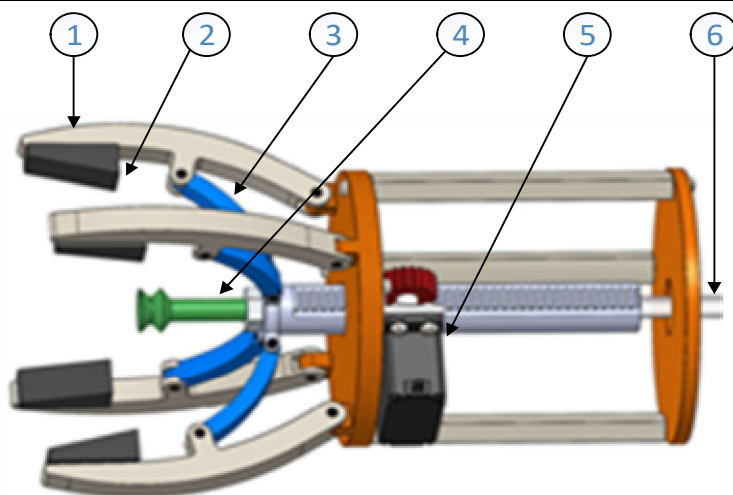


Рис.1. Компьютерная модель прототипа четырёхпалого захвата для сбора томата

Fig. 1. Computer model of a prototype of a four-toed grab for picking tomato

На рис. 2 показано движение захвата при уборке томатов. Когда манипулятор робота перемещает захват в заданное положение, вакуумная насадка выдвигается вперёд, а пальцы смыкаются, чтобы уменьшить занимаемое пространство, избегая столкновений с препятствиями, такими, как ветви, листья и другие томаты (2,а). Концевой выключатель используется для ограничения движения манипулятора при перемещении вакуумной форсунки вперёд. Максимальное расстояние вытягивания вакуумной системы до 12 см, что упрощает процедуру удаления плодов, покрытых листьями или ветвями на пу-

ти манипулятора. После присасывания плода пальцы расширяются, и всасывающее сопло возвращает томат внутрь (2,б). После максимального расширения пальцы перемещаются обратно внутрь и удерживают плод с регулируемым давлением, измеряемым встроенным датчиком (2,в). Затем манипулятор робота отодвигается назад, чтобы отрезать томат от ветки.

Захватывающий механизм представляет собой четырёхпальный захват, основанный на кривошипно-скользящем механизме. Механизм захвата включает в себя 4 звена, размеры которых обозначены как а, б, с и е, показанные на рис. 3.

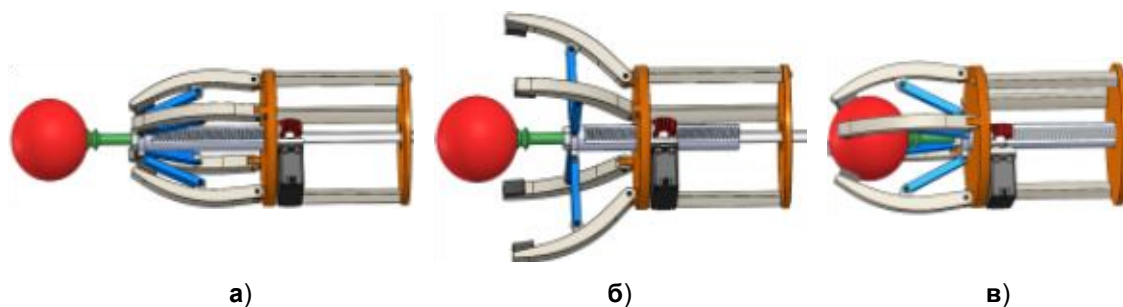


Рис. 2. Основные этапы движения захвата

Fig. 2. The main stages of the gripper movement

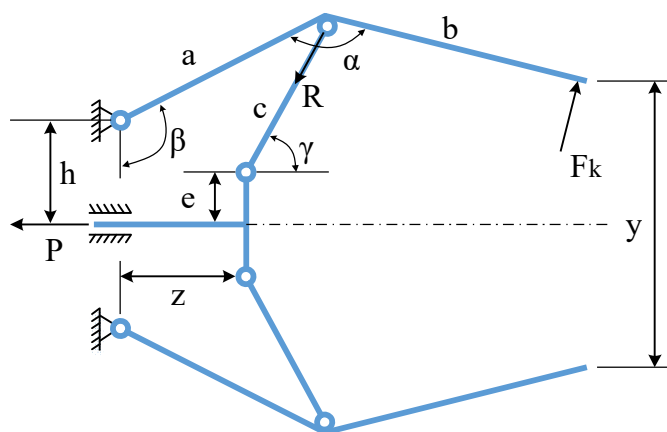


Рис. 3. Кинематическая схема захвата

Fig. 3. Kinematic gripper scheme

Пусть $X = [a, b, c, e, h, \alpha]^T$ – вектор целевых переменных;

a, b, c, e, h, α – размеры захвата;

α – угол между элементами a и b захвата;

β, γ – углы соединений с горизонтальными линиями;

P – сила привода;

F – сила захвата, оказываемая пальцами захвата в точке контакта.

Геометрические зависимости механизмов захвата представлены в следующих формулах:

$$\gamma = 2 \tan^{-1} \frac{1 - \sqrt{1 + A^2 - B^2}}{B - A};$$

$$\beta = 2 \tan^{-1} \frac{C + \sqrt{1 + A^2 - C^2}}{C + A},$$

где $A = \frac{z}{h-e}$;

$$B = \frac{c^2 - (h-e)^2 + z^2 - a^2}{2c(h-e)};$$

$$C = \frac{a^2 + (h-e)^2 + z^2 - c^2}{2a(h-e)}.$$

Соотношение сил, действующих на захват:

$$F_k (b - a \cos \alpha) = R a \sin (\gamma - \beta);$$

$$P = 4 R \cos \gamma;$$

$$F_k = \frac{P a \cos (\gamma - \beta)}{4 (b - a \cos \alpha) \cos \gamma};$$

$$y(X, z) = 2(h - a \cos \beta) + b \cos (\alpha + \beta).$$

Для оптимизации размеров данного захвата используются следующие основные целевые функции:

1. Функция, которая описывает разницу между максимальным и минимальным усилиями захвата для предполагаемого диапазона перемещения концов захвата:

$$f_1(X) = \max_z F_k(X, z) - \min_z F_k(X, z),$$

где $\max_z F_k(X, z)$, $\min_z F_k(X, z)$ – соответственно максимальная и минимальная сила захвата для предполагаемого диапазона смещения привода z , где $z_{\min} \leq z \leq 2z_{\max}$.

2. Функция, которая описывает коэффициент передачи силы между концом захвата и приводом захвата:

$$f_2(X) = \frac{P}{\min_z F_k(X, z)} = \frac{4(b - a \cos \alpha) \cos \gamma}{a \cos(\gamma - \beta)},$$

при $z_{\min} \leq z \leq 2z_{\max}$

3. Функция, которая описывает передаточное отношение сдвига между концами захвата и приводом захвата:

$$f_3(X) = \left| \frac{z_{\max} - z_{\min}}{y(X, z_{\max}) - y(X, z_{\min})} \right|,$$

где $y(X, 2z_{\max})$, $y(X, z_{\min})$ – расстояния между пальцами в положениях максимального и минимального сдвига привода.

4. Функция, которая описывает сумму всех конструктивных элементов захвата:

$$f_4(X) = \sum_{i=1}^L l_i = a + b + c + e + h.$$

Оптимизация значения этой функции гарантирует, что размер захвата при работе в разных направлениях будет оптимальным.

5. Функция, которая описывает усилие механизма захвата:

$$f_5(X) = \left| \frac{4 \max_z F_k(X, z)}{P} \right|.$$

Далее опишем основные геометрические ограничения:

$$1. g_1(X) = y(X, z_{\min}) - D_{\min} \leq 0;$$

$$2. g_2(X) = D_{\max} - y(X, z_{\max}) \leq 0;$$

$$3. g_3(X) = C^2 - 1 - A^2 \leq 0;$$

$$4. g_4(X) = e - h \leq 0;$$

$$5. g_5(X) = B^2 - 1 - A^2 \leq 0;$$

$$6. g_6(X) = -1 - C \leq 0,$$

где $D_{\min}$, $D_{\max}$ – минимальный и максимальный диаметр плода, с которым производятся манипуляции.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим структуру разработанной программной системы AgroGrip-Modeling для многокритериальной оптимизации конфигурации робототехнического захвата на основе алгоритмов, рассмотренных ранее. Данная программа разработана в среде Matlab и имеет графический пользовательский интерфейс для корректировки значений целевых параметров и интерактивного анализа полученной конфигурации робототехнического захвата. Разработанная программная система AgroGripModeling состоит из нескольких модулей, представленных на рис. 4.

Модуль ввода входных данных включает в себя ряд переменных, которые необходимо оптимизировать и параметры выбранного алгоритма оптимизации. Модуль выбора конфигурации захвата содержит 4 типа кинематических схем, используемых на практике.

Модуль выбора алгоритма оптимизации содержит реализованные программно апостериорные методы NSGA-II, MOGWO и MOPSO для решения задач многокритериальной оптимизации и позволяет пользователю выбрать один метод для решения текущей прикладной задачи [18-21].

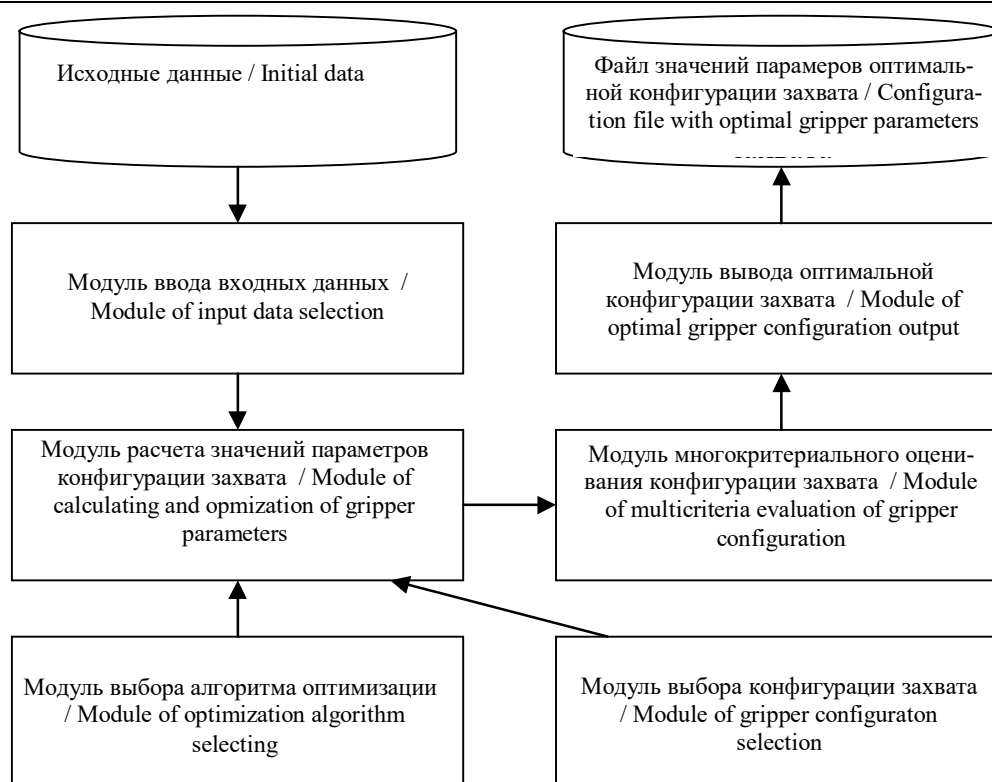


Рис. 4. Общая структура программной системы AgroGripModeling

Fig. 4. General structure of the AgroGripModeling software system

Модуль многокритериального оценивания конфигурации робототехнического захвата производит расчёт показателей качества произведённой оптимизации: доля недоминируемых индивидов (RNI), вычислительные затраты алгоритма (AE), степень равномерности распределения (UD) [18].

На рис. 5 представлен пользовательский интерфейс разработанной программной системы AgroGripModeling, обеспечивающий ввод основных параметров моделирования захвата, выбор конфигурации и алгоритма и параметров оптимизации, отображение кинематической схемы выбранной конфигурации и оптимальные значения параметров по окончании работы алгоритма много-

критериальной оптимизации. Полученные в ходе оптимизации результаты также сохраняются в файл.

На рис. 6 показаны результаты оценивания 20 независимых моделируемых конфигураций робототехнического захвата в виде коробчатых диаграмм.

Результаты моделирования показывают, что MOGWO имеет наименьшее AE , а RNI – наибольшее, поэтому это лучший алгоритм, если сравнивать его с двумя другими методами по вышеуказанным показателям производительности. Метод NSGA-II имеет наибольшее время вычислений, что можно объяснить повторяющейся процедурой сортировки элементов нового набора с удвоенным количеством элементов.

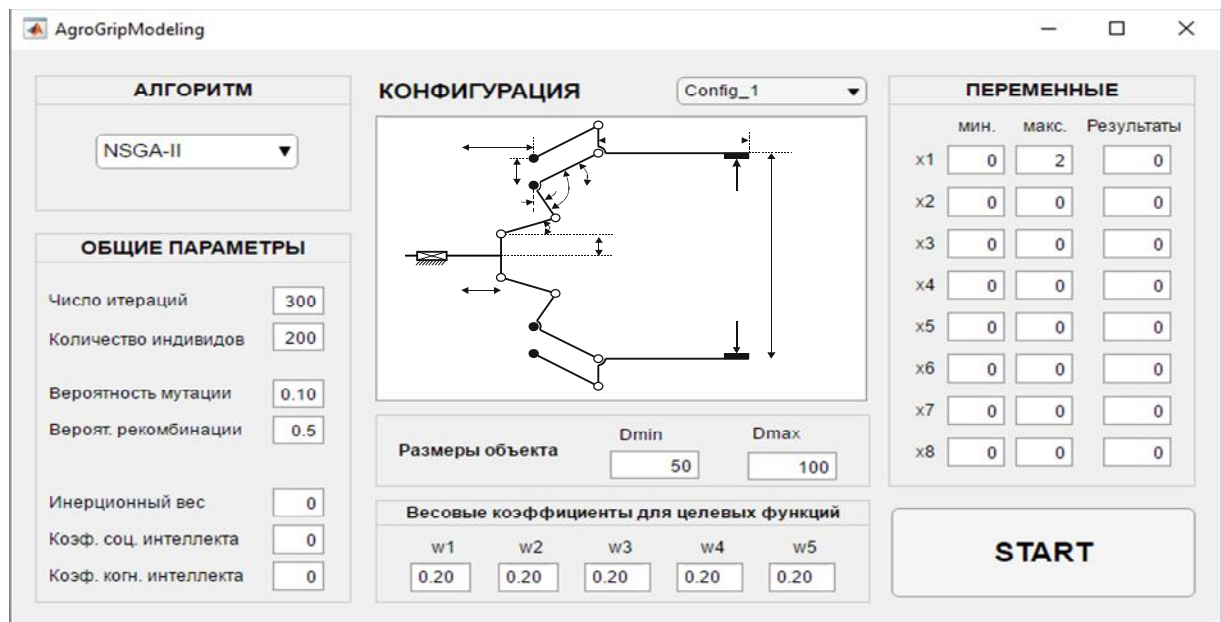


Рис. 5. Пользовательский интерфейс системы AgroGripModeling

Fig. 5. User interface of AgroGripModeling software system

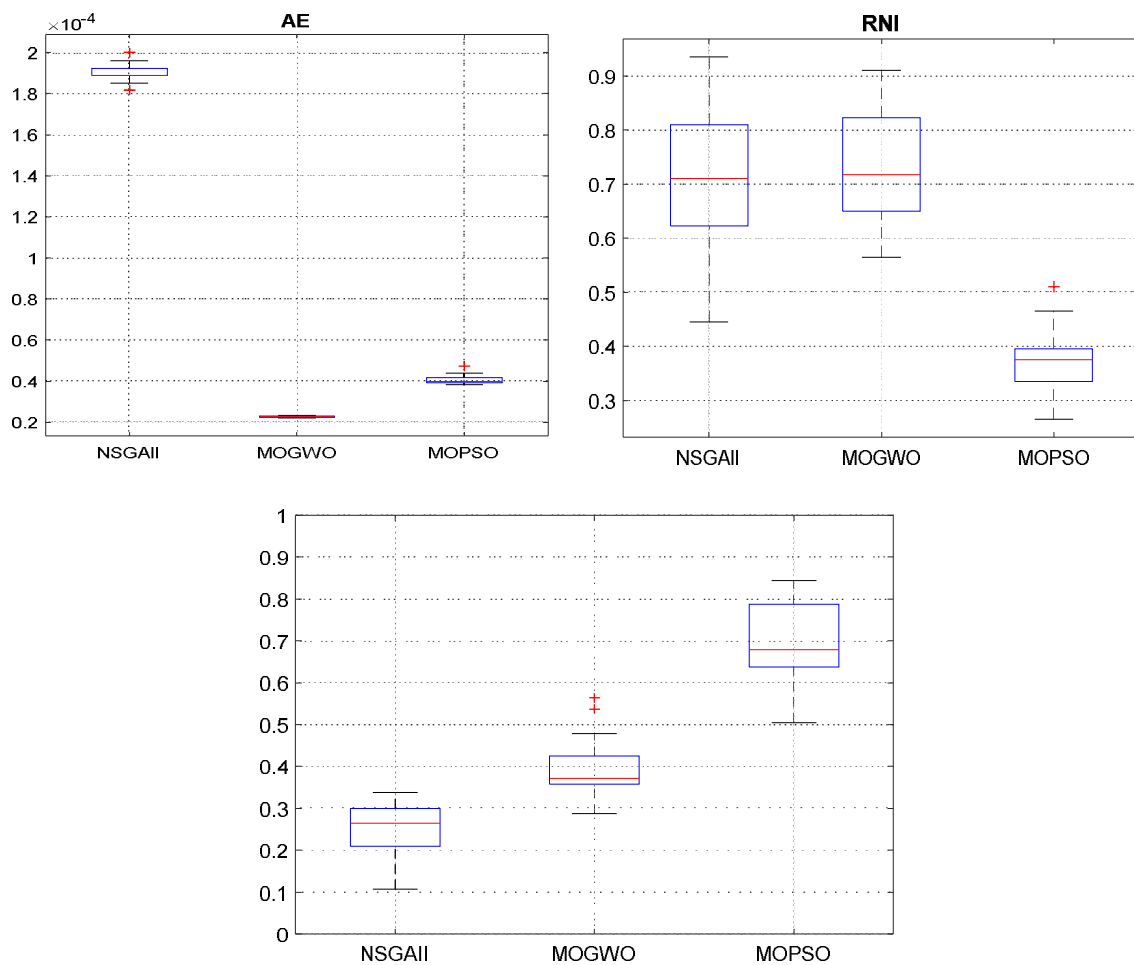


Рис. 6. Оценки AE, RNI и UD моделирования конфигурации робототехнического захвата

Fig. 6. Estimates of AE, RNI and UD of robotic gripping configuration simulation

Преимущество MOPSO перед MOGWO заключается в том, что он расширяет пространство поиска, MOPSO имеет больший показатель распространения недоминируемых индивидов UD , чем у двух других алгоритмов. Однако эти преимущества не проявляются в двух вышеупомянутых методах оценивания. Дальнейшее исследование будет ориентировано на реализацию рассмотренных алгоритмов при проектировании захватов в сельском хозяйстве и промышленности с использованием различных типов датчиков для точного захвата манипулируемых объектов.

Выводы

Традиционный сбор и первичная обработка сельскохозяйственной продукции являются наиболее ресурсоёмкими задачами, требующими перехода от утомительных ручных операций к автоматизации технологических процессов и роботизации манипуляций с

физическими объектами. При проектировании робототехнического захвата необходимо учитывать разнообразие манипулируемых объектов, сложность их идентификации и наведения манипулятора в сложной естественной среде с препятствиями. Задача оптимизации механизма захвата связана с выполнением ряда противоречивых требований по надёжности, мягкости, точности, скорости, энергоэффективности, формирующих сложное пространство поиска решений.

Разработанная программная система AgroGripModeling обеспечивает моделирование конфигурации робототехнического захвата и оценивание ее качества с использованием трёх апостериорных алгоритмов NSGA-II, MOGWO и MOPSO. Апробация системы проведена при многокритериальной оптимизации конфигурации прототипа четырёхпалого захвата с вакуумным сильфоном для сбора томатов.

Список литературы

1. Shamshiri R.R., Weltzien C., Hameed I.A. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2018. № 1(4). P. 1-14. <https://doi.org/10.098.77/j.ijabe.20181104.4278>.
2. West T., Sullivan R., Seavert C. Orchard Economics: Establishing and Producing High-Density Sweet Cherries in Wasco County. *OSU Extension Service Publication*, EM. 2012.
3. Agricultural workforce report. Labor and market performance analysis. Washington State: Employment Security Department; 2012. URL: <https://esd.wa.gov/>.
4. Афанасьев Р.А., Ермолов И.Л. Перспективные направления роботизации точного земледелия // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2017. №1 (14). С. 27-32.

5. Шевченко А.В., Мещеряков Р.В., Мигачев А.Н. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника // *Проблемы управления*. 2019. № 5. С. 3-18.
6. Ling P., Ehsani R., Ting K.C. Sensing and End-Effector for a Robotic Tomato Harvester. *2004 ASAE Annual Meeting*. 2004. P. 1-4.
7. Naoshi K., Kazuya Y., Hiroshi S. A. Machine Vision System for Tomato Cluster Harvesting Robot // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2009. № 2(2). P. 60-65. <https://doi.org/10.13031/2013.24691>.
8. Hiroaki Y., Kotaro N., Takaomi H. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016.
9. Zhao Y., Gong L., Liu C. Dual-arm Robot Design and Testing for Harvesting Tomato in Greenhouse // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. №49(16). P. 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.030>.
10. Wang L.L., Zhao B., Fan J.W. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2017. № 10(4). P. 140-149. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.3204>.
11. Van Henten E., Hemming J., van Tuijl B. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses // *Autonomous Robots*. 2002. №13. P. 241–258. <https://doi.org/10.1023/A:1020568125418>.
12. Van Henten E.J., Van Tuijl B.A., Hemming J. Field Test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*. 2003. №86(3). P. 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.002>.
13. Tang X., Zhang T., Liu L. A New Robot System for Harvesting Cucumber. *2009 Reno*. 2008.
14. Диагностика азотного питания растений с использованием беспилотных летательных аппаратов / В.Г. Сычев, Р.А. Афанасьев, И.Л. Ермолов, С.Г. Кладко, В.В. Ворончихин // *Плодородие*. 2017; 5(98): 2-4.
15. Применение кластерного анализа с элементами нечеткой логики для оценки окружающей обстановки группы робототехнических средств / М.П. Кочетков, Д.Н. Корольков, В.Ф. Петров, О.В. Петров, А.И. Терентьев, С.Б. Симонов // *Труды СПИИРАН*. 2020. №4(19). С. 746-773.
16. Нагоев З.В., Денисенко В.А., Лютикова Л.А. Система машинного зрения автономного робота для сельскохозяйственного применения в условиях горных территорий на основе мультиагентных когнитивных архитектур // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2018. №10-2(36). С. 289-297.
17. Нго К.Т., Нгуен В.В., Ронжин А.Л. Рекомендующая программная система оценивания состава гетерогенных робототехнических средств для выполнения сельскохозяй-

заявленных операций // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2019. №4. С. 141-149.

18. Goldberg D. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 978-0201157673. Addison-Wesley Professional. 1988.

19. Deb K., Pratap A., Agarwal S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // *IEEE Transactions on Evolutionary Computations*. 2002. №6(2). P. 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

20. Mirjalilia S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 2014. № 69. P. 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

21. Eberhart Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546)*. 2001.

References

1. Shamshiri R.R., Weltzien C., Hameed I.A. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018, no. 1(4), pp. 1-14. <https://doi.org/10.098.77/j.ijabe.20181104.4278>.

2. West T., Sullivan R., Seavert C. Orchard Economics: Establishing and Producing High-Density Sweet Cherries in Wasco County. *OSU Extension Service Publication*, EM. 2012.

3. Agricultural workforce report. Labor and market performance analysis. Washington State: Employment Security Department; 2012. Available at: <https://esd.wa.gov/>.

4. Afanasiev R.A., Ermolov I.L. Perspektivnye napravleniya robotizatsii tochnogo zemledeliya [Prospective lines of development of precision agriculture robotization]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*, 2017, no. 1 (14), pp. 27-32 (In Russ.).

5. Shevchenko A.V., Meshcheryakov R.V., Migachev A.N. Obzor sostoyaniya mirovogo rynka robototekhniki dlya sel'skogo khozyaistva. Ch. 1. Bepilotnaya agrotekhnika. [Review of the world market of agriculture robotics. Part 1. Unmanned vehicles for agriculture]. *Problemy upravleniya = Control Sciences*, 2019, no. 5, pp.3-18 (In Russ.).

6. Ling P., Ehsani R., Ting K.C. Sensing and End-Effector for a Robotic Tomato Harvester. *2004 ASAE Annual Meeting*, 2004, pp. 1-4.

7. Naoshi K., Kazuya Y., Hiroshi S. A Machine Vision System for Tomato Cluster Harvesting Robot. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2009, no. 2(2), pp. 60-65. <https://doi.org/10.13031/2013.24691>.

8. Hiroaki Y., Kotaro N., Takaomi H. Development of an autonomous tomato harvesting robot with rotational plucking gripper. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016.

9. Zhao Y., Gong L., Liu C. Dual-arm Robot Design and Testing for Harvesting Tomato in Greenhouse. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, no. 49(16), pp. 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.030>.
10. Wang L.L., Zhao B., Fan J.W. Development of a tomato harvesting robot used in greenhouse. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, no. 10(4), pp. 140-149. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171004.3204>.
11. Van Henten E., Hemming J., van Tuijl B. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*, 2002, no. 13, pp. 241-258. <https://doi.org/10.1023/A:1020568125418>.
12. Van Henten E.J., Van Tuijl B.A., Hemming J. Field Test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*, 2003, no. 86(3), pp. 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.002>.
13. Tang X., Zhang T., Liu L. A New Robot System for Harvesting Cucumber. *2009 Reno*. 2008.
14. Sychev V.G., Afanasiev R.A., Ermolov I.L. Diagnostika azotnogo pitaniya rastenii s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Diagnostics of plant nitrogen nutrition using drones]. *Plodorodie = Plodorodie*, 2017, no. 5(98), pp. 2-4 (In Russ.).
15. Kochetkov M.P., Korolkov D.N., Petrov V.F. Primenenie klasternogo analiza s elementami nechetkoi logiki dlya otsenki okruzhayushchei obstanovki gruppy robototekhnicheskikh sredstv [Application of cluster analysis with fuzzy logic elements for ground environment assessment of robotic group]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2020, no. 4 (19), pp. 746-773 (In Russ.).
16. Nagoev Z.V., Denisenko V.A., Lyutikova L.A. Sistema mashinnogo zreniya avtonomnogo robota dlya sel'skokhozyaistvennogo primeneniya v usloviyakh gornykh territorii na osnove mul'tiagentnykh kognitivnykh arkhitektur [System of autonomous robot machine vision for agricultural application in mountain territories based on the multi-agent cognitive architectures]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable development of mountain territories*, 2018, no. 10-2(36), pp. 289-297 (In Russ.).
17. Ngo K.T., Nguyen V.V., Ronzhin A.L. Rekomenduyushchaya programmnaya sistema otse-nivaniya sostava geterogennykh robototekhnicheskikh sredstv dlya vypolneniya sel'skokho-zyaistvennykh operatsii [Recommending software system for estimating the composition of heterogeneous robots for performance of agricultural operations]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information Technologies*, 2019, no. 4, pp. 141-149 (In Russ.).
18. Goldberg D. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. 978-0201157673. Addison-Wesley Professional. 1988.

19. Deb K., Pratap A., Agarwal S. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computations*, 2002, no. 6(2), pp. 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>.

20. Mirjalilia S., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 2014, no. 69, pp. 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

21. Eberhart Shi Y. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. *Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)*. 2001.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ву Дык Куен, соискатель лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vuquyenntk@gmail.com

Quyen D. Vu, Post-Graduate Student, Laboratory of Autonomous Robotic Systems, St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vuquyenntk@gmail.com

Ронжин Андрей Леонидович, доктор технических наук, профессор РАН, профессор лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский Институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Andrey L. Ronzhin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: ronzhin@iias.spb.su

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-91-106>

Комплексный анализ рисков грузового порта на основе логико-вероятностного и имитационного моделирования

И.О. Бондарева¹ ✉

¹ Астраханский государственный технический университет,
ул. Татищева 16, г. Астрахань 414056, Российская Федерация

✉ e-mail: i.o.bondareva@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Повышение эффективности работы грузового порта с точки зрения предотвращения наступления рискованных ситуаций на основе разработки инструментария комплексного анализа рисков грузового порта путем интеграции логического, вероятностного и имитационного моделирования.

Методы. Представлена структурная модель риска недостижения стратегической цели грузового порта, дополненная несколькими уровнями рассмотрения, разработана модель сценариев всех имеющихся значимых рисков, предложена гибридная логико-вероятностная модель риска недостижения основной стратегической цели порта, позволяющая связать воедино технологию формализации рисков с помощью построенных логических и вероятностных моделей, а также имитационное моделирование, интерпретация результатов которого возможна с использованием ЛВ-моделей и сценариев.

Результаты. На основе поставленной цели исследования и сформулированных задач были построены различные виды моделей наступления рискованных событий грузового порта. Предложенные модели позволяют осуществить комплексный анализ риска недостижения стратегической цели грузового порта на основе сценарной формализации рисков различных уровней, а также упростить процесс интерпретации результатов имитационного моделирования с учетом внешних факторов влияния. Всё это позволит вырабатывать своевременные обоснованные управленческие решения.

Заключение. На основании поставленной задачи предложена формализация рисков различного уровня и взаимосвязей между ними с использованием логико-вероятностного моделирования, позволяющая на основе комплексного анализа риска недостижения стратегической цели грузового порта с использованием интерпретации результатов имитационного моделирования формулировать управленческие решения.

Ключевые слова: структурная модель риска; модель сценариев рисков; логическая модель; вероятностная модель; имитационное моделирование; гибридная логико-вероятностная модель; концептуальная логико-вероятностная модель.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Бондарева И.О. Комплексный анализ рисков грузового порта на основе логико-вероятностного и имитационного моделирования // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 91-106. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-91-106>.

Поступила в редакцию 23.09.2020

Подписана в печать 12.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Comprehensive Risk Analysis of a Cargo Port Based on Logic-Probabilistic and Simulation Modeling

Irina O. Bondareva¹ ✉

¹ Astrakhan State Technical University
16 Tatishchev str., Astrakhan 414056, Russian Federation

✉ e-mail: i.o.bondareva@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Improvement of the effectiveness of the cargo port from the point of view of preventing the occurrence of risk situations based on the development of tools for a comprehensive risk analysis of a cargo port by integrating logical, probabilistic and simulation modeling.

Methods. It is presented a structural model of the risk of failure to achieve the strategic goal of a cargo port, supplemented by several levels of consideration, a model of scenarios of all existing significant risks is developed, a hybrid logical-probabilistic model of the risk of failure to achieve the main strategic goal of the port is proposed, which makes it possible to link together the technology of formalizing risks using the constructed logical and probabilistic models, as well as simulation modeling, the interpretation of the results of which is possible using LP-models and scenarios.

Results Various types of models for the occurrence of risk events in the cargo port were built based on the set research goal and the formulated tasks. The proposed models make it possible to carry out a comprehensive analysis of the risk of failure to achieve the strategic goal of a cargo port based on the scenario formalization of risks of various levels, and also to simplify the process of interpreting the results of simulation modeling taking into account external factors of influence. All this will allow you to develop timely informed management decisions.

Conclusion. The formalization of risks of various levels and the interrelationships between them using logical-probabilistic modeling is proposed on the basis of the task, which allows formulating management decisions based on a comprehensive analysis of the risk of failure to achieve the strategic goal of the cargo port using the interpretation of the results of simulation modeling.

Keyword: structural risk model; risk scenario model; logical model; probabilistic model; simulation modeling; hybrid logical-probabilistic model; conceptual logical-probabilistic model.

For citation: Bondareva I. O Comprehensive Risk Analysis of a Cargo Port Based on Logic-Probabilistic and Simulation Modeling. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 91-106 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-91-106>.

Received 23.09.2020

Accepted 12.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

Перспективным инструментом анализа рисков событий и ситуаций, возникающих в процессе функционирования крупных предприятий транспортной логистики, включая грузовые пор-

ты, с целью предотвращения нежелательных событий является предсказание и оценка вероятности их наступления. С точки зрения управления наибольший интерес представляет комплексный

анализ рисков недостижения целей, поставленных организацией, в том числе основной стратегической цели. Комплексность анализа заключается в рассмотрении деятельности организации не только с точки зрения экономической эффективности, но и возможности многостороннего анализа с фокусировкой на интересы и особенности всех вовлекаемых в данный процесс сторон.

В ходе анализа публикаций, посвященных данной проблематике, были изучены работы Недосекина А.О., Петрова А.Н., Грищенко О.В., Вяцковой Н.А., Балдина К.В. [1-5], посвященные теории управления рисками и предлагающие различные механизмы их оценки и выявления. Риски в этих работах рассматривают исключительно в финансовом аспекте, что не позволяет реализовать необходимость комплексного анализа. Обладающая такой возможностью технология управления рисками структурно-сложных экономических и социальных систем и процессов с использованием логико-вероятностного моделирования подробно рассмотрена в публикациях Соложенцева Е. Д., Митягина С. А., Алексеева В.В., Карасева В.В [6-10]. Исследования в области оценки рисков с помощью имитационного моделирования рассматриваются в работах Антохиной Ю.В., Баранова А.В., Байрамуковой Е. И., Марченко Р.С. [11-13]. Однако специфичность исследуемой предметной области диктует необходимость разработки логико-вероятностных и имитационных моделей, описывающих

непосредственно рассматриваемый логистический объект – грузовой порт. Технологии оценки рисков порта посвящена работа Попитченко М.А. [14]. Имеющиеся работы по использованию имитационного моделирования для оценки рисков грузового порта таких ученых, как Григорьев О.В., Латыпова Э.А. [15-16] рассматривают каждый риск в отдельности и не содержат в себе информации об их взаимозависимости. Также в этих работах нет описания технологии интерпретации результатов имитационного моделирования с целью выработки управленческих решений по предотвращению наступления рискованных ситуаций. Работ, посвященных интеграции логико-вероятностного и имитационного моделирования, выявлено не было. **Цель работы** – повышение эффективности работы грузового порта на основе разработки инструментария комплексного анализа рисков грузового порта путем интеграции логического, вероятностного и имитационного моделирования.

Материалы и методы

Основные направления управленческой деятельности грузового порта представлены на разработанном дереве целей грузового порта (рис. 1), позволяющем сформулировать взаимозависимость рисков грузового порта, рассматриваемых как недостижение целей порта. Были выделены наиболее значимые цели, степень влияния которых на основную стратегическую цель «Повышение конкурентоспособности грузового

порта» является наибольшей. Исходя из опыта анализа влияния целей на основную цель предложено было агрегировать их, таким образом, что цель «Повысить

уровень ответственности перед потребителями» включает в себя все цели, связанные с работой с клиентами.

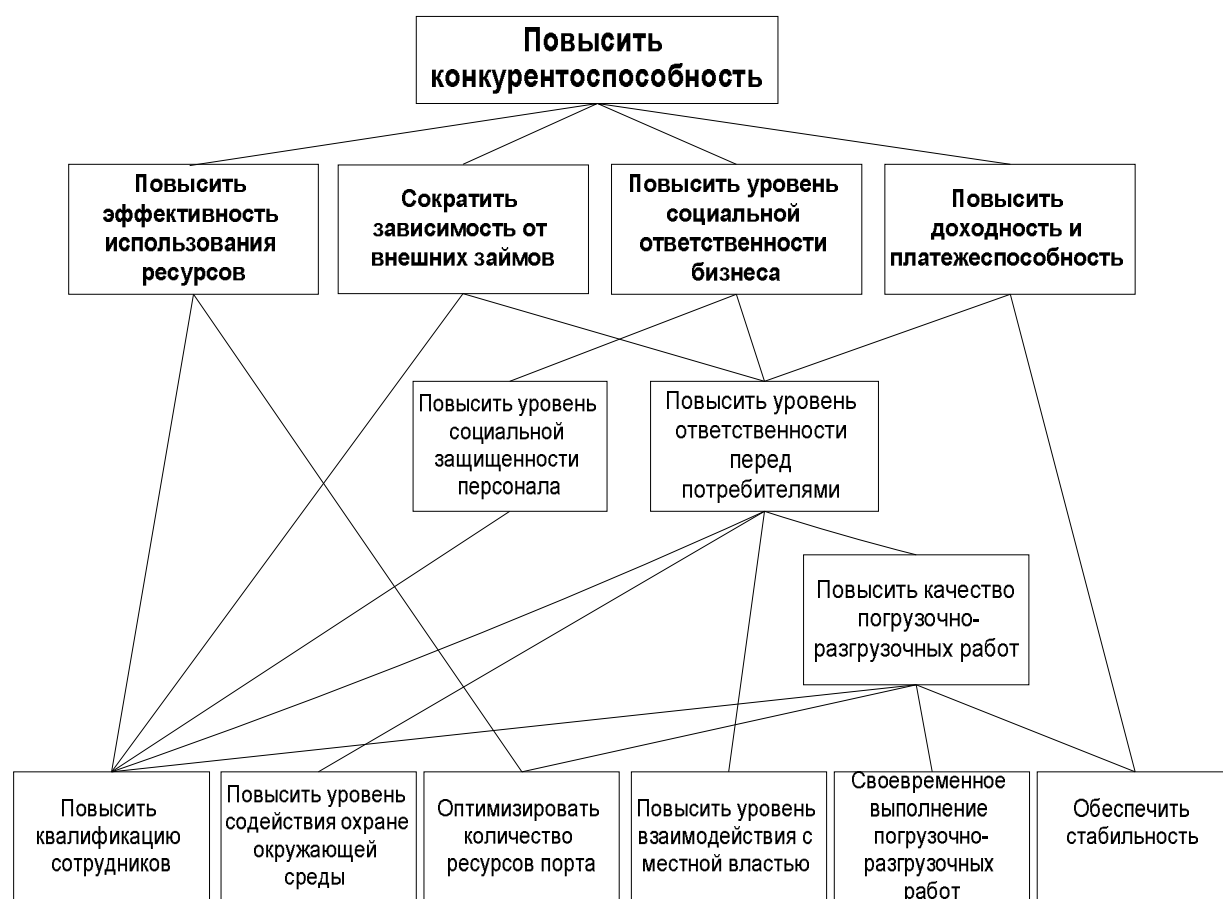


Рис. 1. Дерево целей грузового порта

Fig. 1. Cargo port target tree

Предлагается технология оценки и анализа риска неуспеха решения сложной проблемы «Повышение конкурентоспособности грузового порта». Для данной задачи используется гибридная ЛВ-модель риска (рис. 2.), объединяющая сценарии риска для субъектов и объектов, так как внешние и внутренние субъекты представляют определенный интерес в данной работе. Неудача достижения стратегической цели SG за-

висит от субъектов $S (S_1, S_2, S_3, \dots, S_5)$ и объектов – целей $G (GN_1, GN_2, \dots, GN_4)$, детализирующих основную цель, выбранную в качестве сложной проблемы. Таким образом, осуществляется более детализированная работа с деревом целей грузового порта для построения логико-вероятной (ЛВ) модели риска недостижения основной стратегической цели грузового порта. Субъекты определяют, кто решает поставленную про-

блему, а объекты – какие более мелкие цели связаны с проблемой SG . С точки зрения осуществления управленческой функции грузового порта и на основе наличия той или иной степени вовлеченности, а также заинтересованности в решении обозначенной проблемы выделим следующие субъекты: S_1 – руководство порта, S_2 – клиенты порта, S_3 – органы местного самоуправления, S_4 – население, не являющееся клиентами порта, S_5 – сотрудники порта.

Объектами-целями являются компоненты G : GN_1 – сократить зависимости от внешних займов, GN_2 – повысить эффективность использования ресурсов, GN_3 – повысить уровень социальной ответственности бизнеса, GN_4 – повысить доходность и платежеспособность.

Обозначим SG , S и G как события, а $S_1, S_2, \dots, S_5, GN_1, GN_2, \dots, GN_4$ как соответствующие им Л-переменные.

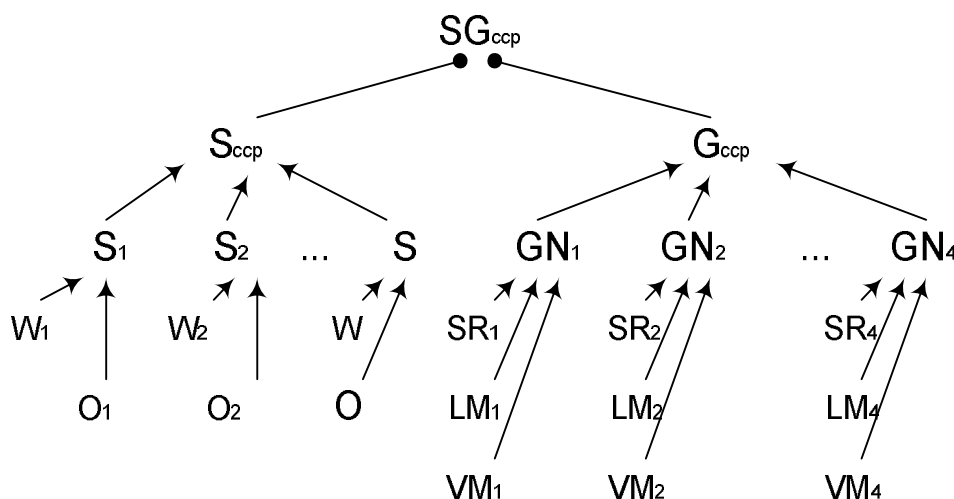


Рис. 2. Структурная модель риска недостижения стратегической цели грузового порта

Fig. 2. Structural model of the risk of failure to achieve the strategic goal of the cargo port

В модели риска неуспеха решения данной сложной проблемы сценарий события неуспеха проблемы SG формулируется следующим образом: неуспех события SG происходит из-за неуспеха событий S И (логическое) событий G .

Увеличение риска недостижения основной стратегической цели грузового порта происходит из-за недостижения любой одной цели, ИЛИ из-за недо-

стижения любых двух целей, ... ИЛИ из-за недостижения всех целей.

В данном случае логические функции (Л-модель) неуспеха событий принимают вид:

$$SG_{csp} = S_{csp} \wedge G_{csp};$$

$$S_{csp} = S_1 \vee S_2 \vee \dots \vee S_5;$$

$$G_{csp} = GN_1 \vee GN_2 \vee \dots \vee GN_4.$$

Выразим вероятностные функции (В-модель) неуспеха событий:

$$P\{SG_{csp} = 0\} = P\{S_{csp} = 0\} + P\{G_{csp} = 0\}(1 - P\{S_{csp} = 0\});$$

$$P\{S_{ccp} = 0\} = P\{S_1 = 0\} + P\{S_2 = 0\}(1 - P\{S_1 = 0\}) + P\{S_3 = 0\}(1 - P\{S_1 = 0\}) \times \\ \times (1 - P\{S_2 = 0\}) + P\{S_4 = 0\}(1 - P\{S_1 = 0\})(1 - P\{S_2 = 0\})(1 - P\{S_3 = 0\}) + P\{S_5 = 0\} \times \\ \times (1 - P\{S_1 = 0\})(1 - P\{S_2 = 0\})(1 - P\{S_3 = 0\})(1 - P\{S_4 = 0\});$$

$$P\{G_{ccp} = 0\} = P\{GN_1 = 0\} + P\{GN_2 = 0\}(1 - P\{GN_1 = 0\}) + P\{GN_3 = 0\} \times \\ \times (1 - P\{GN_1 = 0\})(1 - P\{GN_2 = 0\}) + P\{GN_4 = 0\}(1 - P\{GN_1 = 0\}) \times \\ \times (1 - P\{GN_2 = 0\})(1 - P\{GN_3 = 0\}).$$

Целям $GN_1, GN_2, \dots, GN_4$ соответствуют ЛВ-модели риска. Согласно концепции применения гибридных ЛВ-моделей риска для каждой i -ой цели (GN_i) необходимо последовательно построить сценарий риска (SR_i), Л-модель (LM_i) и В-модель (VM_i).

Представленные выше логическая и вероятностная модели описывают риск на самом верхнем уровне, риск недостижения стратегической цели порта, а описание и детализация субъектов и объектов-целей по сути представляет собой сценарий на верхнем уровне. Это

позволяет отследить многоуровневость представленной ЛВ-модели.

В качестве сценариев рисков недостижения целей $GN_1, GN_2, \dots, GN_4$ предлагается использовать элементы построенного и описанного выше дерева целей грузового порта для четкого понимания причинно-следственных связей. Таким образом, для более детальной проработки вопроса анализа рисков грузового порта предполагается построение многоуровневой структурной модели, каждый новый уровень которой повышает степень детализации.

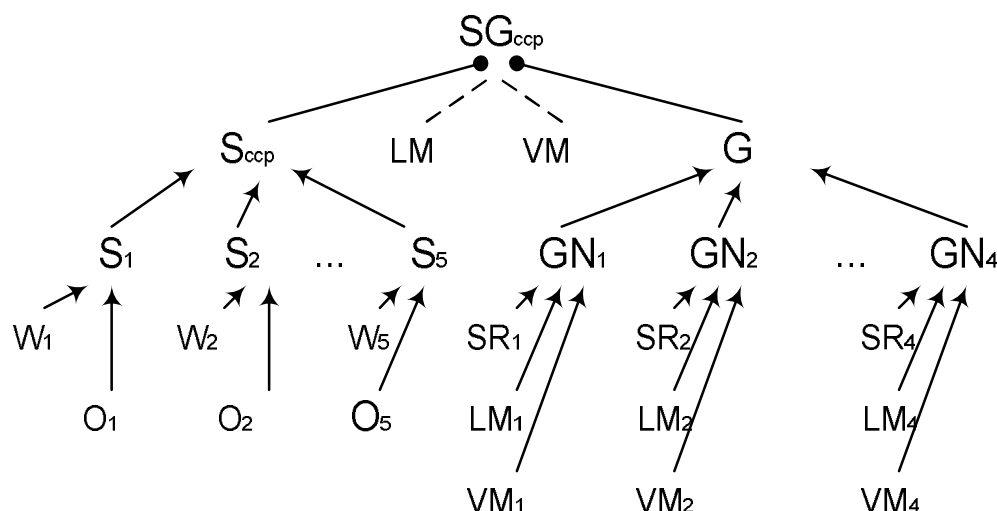


Рис. 3. Многоуровневая структурная модель риска недостижения стратегической цели грузового порта

Fig. 3. Multilevel structural model of the risk of failure to achieve the strategic goal of the cargo port

Так, например, для цели GN_1 (сократить зависимость от внешних зай-

мов) детализирующими целями следующего уровня являются: повысить ква-

лификацию сотрудников и повысить уровень ответственности перед потребителями. Обозначим их логическими переменными GN_{11} и GN_{12} соответственно. Исходя из этого, можно, дета-

лизируя сценарий SR_1 , представить структурную модель риска недостижения стратегической цели грузового порта следующим образом:

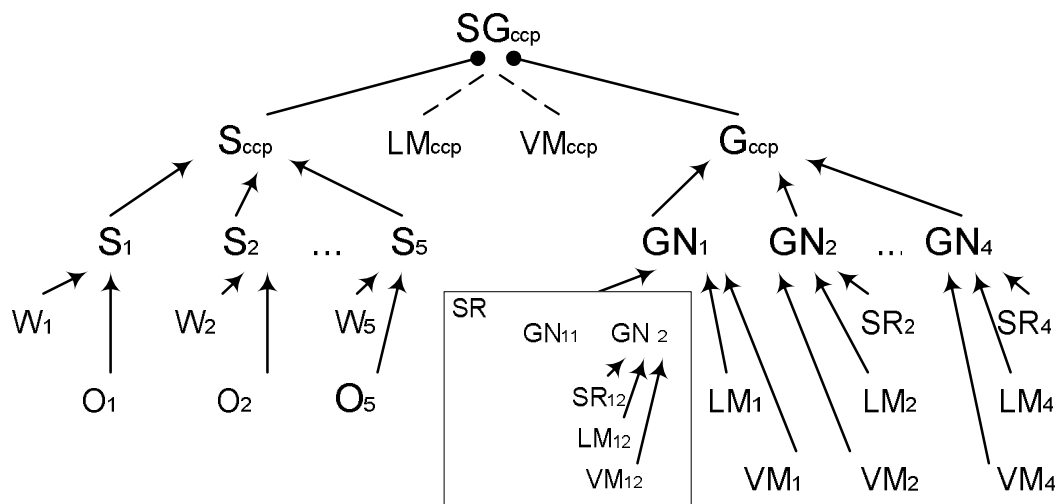


Рис. 4. Многоуровневая структурная модель риска недостижения стратегической цели грузового порта (детализация сценария SR_1)

Fig. 4. Multilevel structural model of the risk of failure to achieve the strategic goal of the cargo port (detailing the SR_1 scenario)

Аналогичные рассуждения применим к оставшимся целям. Для цели GN_2 детализирующими целями следующего (третьего) уровня являются: описанная ранее GN_{11} и GN_{21} – оптимизировать количество ресурсов порта. Для GN_3 – GN_{12} , представленная выше в описании цели GN_1 , и GN_{31} – повысить уровень социальной защищенности персонала. И наконец, цель GN_4 детализируют GN_{12} и GN_{41} – обеспечить стабильность сбытовой работы. Таким образом, на основе полученных сценариев можно сформулировать логические функции (Л-модели) неуспеха событий второго уровня, т.е. недостижения целей GN_1 , GN_2 , ..., GN_4 (LM_1 , LM_2 , ..., LM_4 соответственно):

$$GN_1 = GN_{11} \vee GN_{12};$$

$$GN_2 = GN_{11} \vee GN_{21};$$

$$GN_3 = GN_{12} \vee GN_{31};$$

$$GN_4 = GN_{12} \vee GN_{41}.$$

Выразим вероятностные функции (В-модели) неуспеха тех же событий (VM_1 , VM_2 , ..., VM_4) соответственно:

$$\begin{aligned} P\{GN_1=0\} &= (P\{GN_{11}=0\} + \\ &+ [P\{GN_{12}=0\}(1-P\{GN_{11}=0\})]; \\ P\{GN_2=0\} &= (P\{GN_{11}=0\} + \\ &+ [P\{GN_{21}=0\}(1-P\{GN_{11}=0\})]; \\ P\{GN_3=0\} &= (P\{GN_{12}=0\} + \\ &+ [P\{GN_{31}=0\}(1-P\{GN_{12}=0\})]; \\ P\{GN_4=0\} &= (P\{GN_{12}=0\} + \\ &+ [P\{GN_{41}=0\}(1-P\{GN_{12}=0\})]. \end{aligned}$$

На основе полученных выражений конкретизируем и расширим вероятностную функцию недостижения стратегической цели порта, введя в нее цели третьего уровня. После упрощения получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} P\{G_{ссп}=0\} &= P\{GN_{11}=0\} - (P\{GN_{11}=0\} - 1) \times \\ &\times [P\{GN_{12}=0\} + (P\{GN_{12}=0\} - 1) \times \\ &\times [P\{GN_{12}=0\} - 1] (P\{GN_{11}=0\} - \\ &- [P\{GN_{11}=0\} P\{GN_{21}=0\} + (P\{GN_{21}=0\} + \\ &+ [P\{GN_{11}=0\} - 1]^2 (P\{GN_{12}=0\} - 1) \times \\ &\times [P\{GN_{21}=0\} - 1] \times ((P\{GN_{12}=0\} - \\ &- [P\{GN_{12}=0\} P\{GN_{31}=0\} + [P\{GN_{31}=0\} + \\ &+ P\{GN_{12}=0\} - 1) + (P\{GN_{12}=0\} - 1) \times \\ &\times P\{GN_{22}=0\} - 1) (P\{GN_{31}=0\} - 1) \times \\ &\times [P\{GN_{12}=0\} - (P\{GN_{12}=0\} \\ &[P\{GN_{41}=0\} + P\{GN_{41}=0\})). \end{aligned}$$

После приведения подобных по $P\{GN_{12}=0\}$ получаем следующий результат:

$$\begin{aligned} P\{G_{ссп}=0\} &= P\{GN_{11}=0\} - (P\{GN_{11}=0\} - 1) \times \\ &\times [P\{GN_{12}=0\} + (P\{GN_{12}=0\} - 1) \times \\ &\times [P\{GN_{11}=0\} (P\{GN_{11}=0\} - 1) \times \\ &\times [P\{GN_{21}=0\} + (P\{GN_{31}=0\} - \\ &- (P\{GN_{31}=0\} - 1) \times [P\{GN_{12}=0\}] + \\ &+ (P\{GN_{22}=0\} - 1) [P\{GN_{31}=0\} - 1] \times \\ &\times ((P\{GN_{41}=0\} - (P\{GN_{41}=0\} - 1) \times \\ &\times (P\{GN_{12}=0\}))]. \end{aligned}$$

Рассмотрим следующий (третий) уровень целеполагания. Его представляет декомпозиция цели GN_{12} на следующие: GN_{11} , GN_{121} – повысить уровень содействия охране окружающей среды, GN_{122} – повысить уровень взаимодействия с

местной властью, GN_{123} – повысить качество погрузочно-разгрузочных работ. Все остальные цели третьего уровня, являясь замыкающими целями заключительных уровней детализации рассматриваемых отдельных ветвей дерева целей, не могут быть дополнены ни сценарием, ни ЛВ-моделью. Схема всех используемых в рамках данной задачи сценариев представлена на рис. 5.

На основе сценария риска недостижения цели GN_{12} сформулируем логические функции (Л-модели) неуспеха данного события третьего уровня, т.е. LM_{12} :

$$GN_{12} = GN_{11} \vee GN_{121} \vee GN_{122} \vee GN_{123}.$$

Выразим VM_{12} – вероятностную функцию (В-модель) неуспеха события достижения цели GN_{12} :

$$\begin{aligned} P\{GN_{12}=0\} &= (P\{GN_{11}=0\} + P\{GN_{121}=0\} \times \\ &\times (1 - P\{GN_{11}=0\}) + [P\{GN_{122}=0\} \times \\ &\times (P\{GN_{11}=0\}) (1 - P\{GN_{121}=0\}) + \\ &+ (P\{GN_{123}=0\} (1 - (P\{GN_{11}=0\})) \times \\ &\times [1 - P\{GN_{121}=0\}) (1 - P\{GN_{122}=0\})]. \end{aligned}$$

Заключительный четвертый уровень целеполагания представляет декомпозиция цели GN_{123} . Достижение данной цели зависит от следующих целей: GN_{11} , GN_{121} , GN_{21} , GN_{122} , GN_{1231} – своевременное выполнение погрузочно-разгрузочных работ и GN_{41} . Сценарий представлен на рис. 5.

Логическая функция VM_{123} неуспеха события достижения цели GN_{123} :

$$\begin{aligned} GN_{123} &= GN_{11} \vee GN_{121} \vee GN_{21} \vee \\ &\vee GN_{122} \vee GN_{1231} \vee GN_{41}. \end{aligned}$$

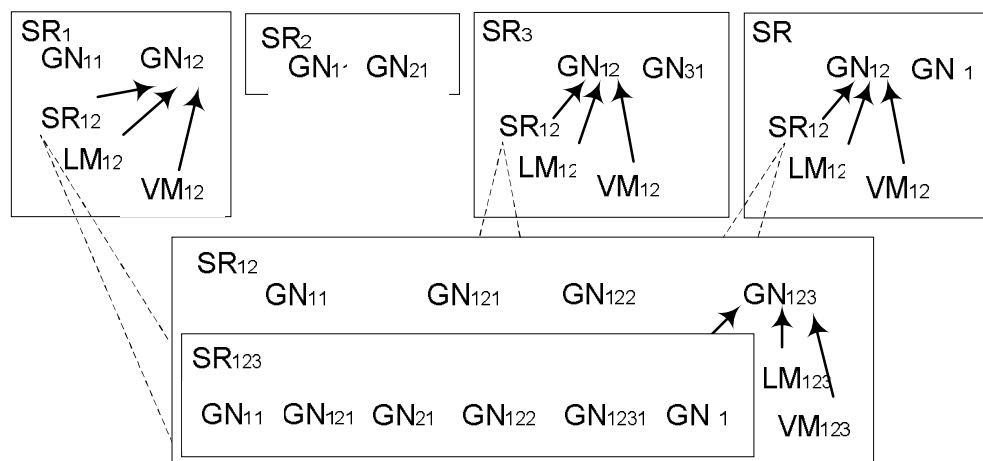


Рис. 5. Модель сценариев рисков недостижения целей, связанных со стратегической целью грузового порта

Fig. 5. Model of scenarios of risks of failure to achieve goals associated with the strategic goal of the cargo port

Соответствующая ей В-модель (LM_{123}):

$$\begin{aligned}
 P\{GN_{123}=0\} = & (P\{GN_{11}=0\} + [P\{GN_{121}=0\} \times \\
 & \times (1 - P\{GN_{11}=0\}) + [P\{GN_{21}=0\} \times \\
 & \times (1 - P\{GN_{11}=0\})(1 - P\{GN_{121}=0\}) + \\
 & + (P\{GN_{122}=0\}(1 - (P\{GN_{11}=0\} \times \\
 & \times (1 - [P\{GN_{121}=0\}](1 - P\{GN_{21}=0\})) + \\
 & + [P\{GN_{1231}=0\}(1 - P\{GN_{11}=0\}) \times \\
 & \times (1 - P\{GN_{121}=0\}](1 - P\{GN_{21}=0\}) + \\
 & + [1 - P\{GN_{122}=0\}) + P\{GN_{41}=0\}) \times \\
 & \times (1 - [P\{GN_{1231}=0\}]).
 \end{aligned}$$

В-модель LM_{12} после подстановки данной В-модели (LM_{123}) и упрощения выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P\{GN_{12}=0\} = & (P\{GN_{11}=0\} + [P\{GN_{11}=0\}-1] \times \\
 & \times (-P\{GN_{121}=0\}) + [P\{GN_{121}=0\}-1] \times \\
 & \times (P\{GN_{122}=0\} + [(P\{GN_{11}=0\}-1) \times \\
 & \times P\{GN_{121}=0\} - (P\{GN_{11}=0\} - \\
 & - [P\{GN_{11}=0\}-1] (P\{GN_{121}=0\}-1) \times \\
 & \times [P\{GN_{21}=0\} - P\{GN_{11}=0\}-1] \times \\
 & \times P\{GN_{122}=0\}) - (P\{GN_{11}=0\}-1) \times \\
 & \times (P\{GN_{21}=0\}-1) P\{GN_{121}=0\}-1) \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times (P\{GN_{122}=0\}-1)(P\{GN_{1231}=0\}- \\
 & - (P\{GN_{1231}=0\}-1)(P\{GN_{41}=0\})).
 \end{aligned}$$

Рассматривая деятельность грузового порта в стратегическом аспекте, т. е. с точки зрения выявления и мониторинга риска недостижения стратегической цели и принятию мер для его минимизации, подходит описанная выше ЛВ-модель функционирования грузового порта. Для численной оценки вероятностей недостижения более мелких целей, оказывающих непосредственное влияние на комплексную цель функционирования грузового порта наилучшим образом подходит технология имитационного моделирования, позволяющая собирать статистику полученных данных и на основе этого оценивать вероятности достижения отдельных целей [17].

Результаты и их обсуждение

Исходя из возможности имитационного моделирования учитывать фак-

торы стохастического характера, разработанная и описанная выше ЛВ-модель риска недостижения грузовым портом стратегической цели была дополнена помимо обозначенных ранее субъектов и объектов-целей внешними случайными факторами влияния. Для функционирования грузового порта это в первую очередь метеорологические факторы: ледостав, скорость ветра и наличие тумана [18, 19]. Обозначим их соответствующими логическими переменными EF_1 , EF_2 и EF_3 . Далее можно

дополнить данный список факторов, выявив не только помехи функционированию порта, связанные с погодными условиями, но и с взаимодействием с контрагентами и т.п., предложить более разветвленную классификацию, однако на сегодняшний момент стоит задача представления механизма взаимодействия логико-вероятностного и имитационного моделирования. На рис. 6 представлена общая гибридная ЛВ-модель риска недостижения грузовым портом стратегической цели.

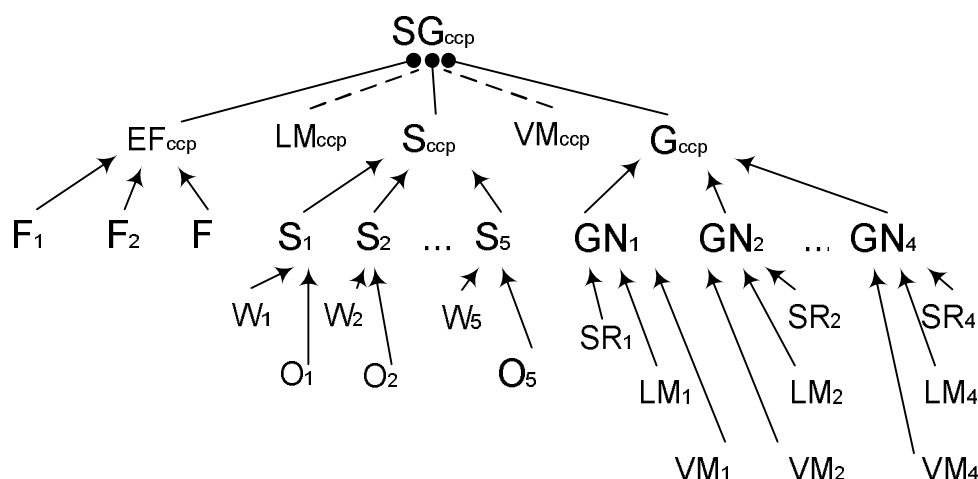


Рис. 6. Гибридная ЛВ-модель риска недостижения стратегической цели грузового порта

Fig. 6. Hybrid LP-model of the risk of failure to achieve the strategic goal of the cargo port

По сути представленная гибридная модель объединяет в себе несколько ЛВ-моделей. В рассматриваемом случае гибридная модель представлена двумя концептуальными ЛВ-моделями и одной сценарной. В качестве концептуальных составляющих выделены субъекты (S_{csr}) и внешние случайные факторы (EF_{csr}), объекты-цели (G_{csr}) представлены сценарной ЛВ-моделью. Отличия концептуальных моделей от сценарных в данном случае состоят в том,

что ЛВ-модель риска каждого концептуального процесса или явления развития является Л-объединением влияющих событий (факторов, субъектов), которые не являются количественными характеристиками. Их риски как событий, ведущих к снижению эффективности функционирования грузового порта, следует оценивать по экспертной информации.

Вербально ЛВ-модель риска каждой концептуальной составляющей функци-

онирования грузового порта формулируется так: увеличение риска приостановки функционирования грузового порта происходит ИЛИ из-за любого одного фактора, ИЛИ из-за любых двух факторов, ..., ИЛИ из-за всех факторов.

Л-модель риска приостановки функционирования грузового порта в связи с наличием внешних случайных факторов:

$$EF_{ccp} = EF_1 \vee EF_2 \vee EF_3.$$

В-модель риска приостановки функционирования грузового порта в связи с наличием внешних случайных факторов:

$$P\{EF_{ccp}=0\}=P\{EF_1=0\}+P\{EF_2=0\}\times \\ \times (1 - P\{EF_1=0\})+P\{EF_3=0\}\times \\ \times (1 - P\{EF_1=0\})(1-P\{EF_2=0\}).$$

При введении в модель концептуальной ЛВ-модели для внешних случайных факторов необходимо скорректировать

логическую и вероятностную модели риска недостижения стратегической цели грузового порта:

$$SG_{ccp} = S_{ccp} \wedge G_{ccp} \wedge EF_{ccp};$$

$$P\{SG_{ccp}=0\}=P\{S_{ccp}=0\}+P\{G_{ccp}=0\}\times \\ \times (1-P\{S_{ccp}=0\})+P\{EF_{ccp}=0\}\times \\ \times (1-P\{S_{ccp}=0\})(1-P\{G_{ccp}=0\}).$$

Построенные ЛВ-модели риска недостижения стратегической цели грузового порта и сформулированные логические и вероятностные модели описывают взаимосвязь событий - рисков ситуаций, что является как входной информацией для разработанной имитационной модели (рис.7 - 8), так и инструментарием интерпретации результатов экспериментов с имитационной моделью.

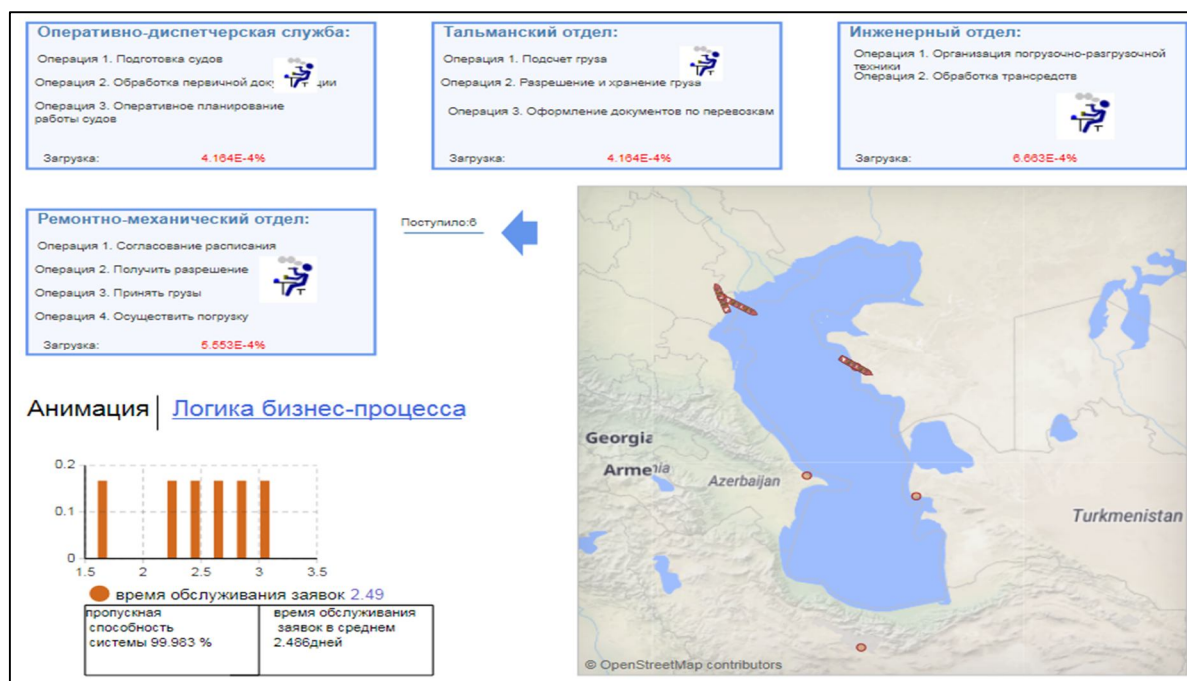


Рис. 7. Имитационная модель оценки рисков грузового порта

Fig. 7. Simulation model for risk assessment of a cargo port

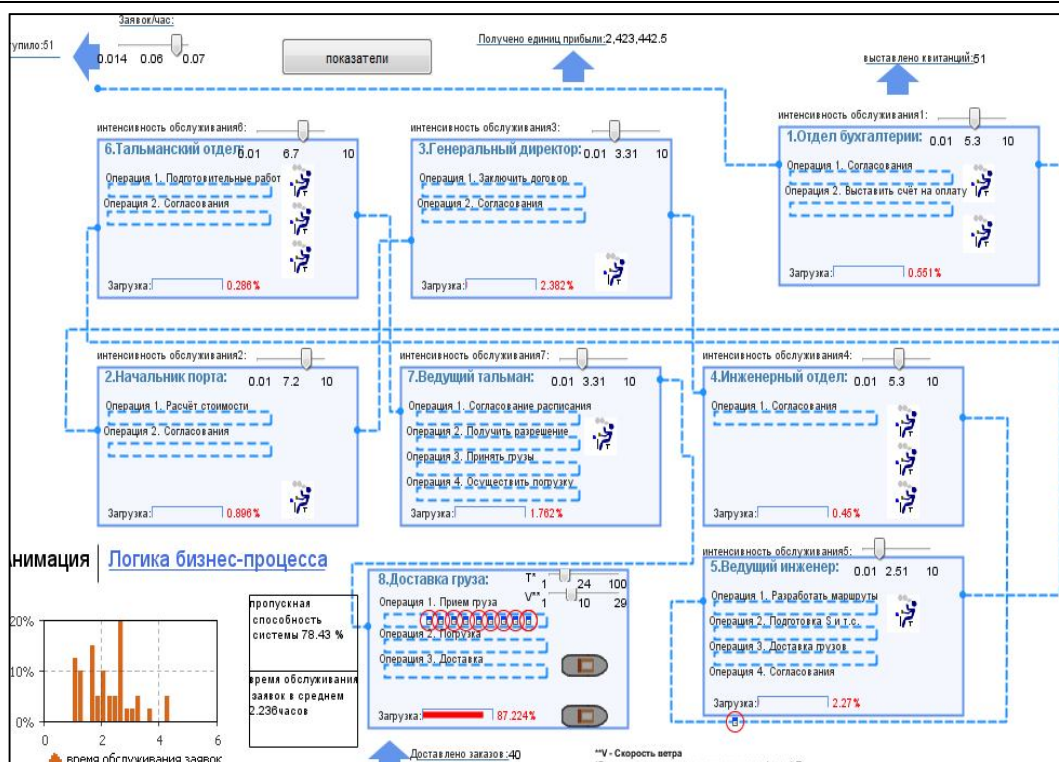


Рис. 8. Имитационная модель оценки рисков грузового порта (Анимация в динамике)

Fig. 8. Simulation model of risk assessment of a cargo port (Animation in dynamics)

Объединение принципов логико-вероятностного и имитационного моделирования, а именно возможность осуществления некой «игры» с параметрами имитационной модели - корректировки входных параметров, вкупе с детальной проработкой логических и вероятностных взаимосвязей отдельных целей порта, позволило получить обоснованную оценку риска недостижения стратегической цели и использовать её в качестве основания для принятия конкретных управленческих решений [20].

Выводы

По результатам сформулированной цели исследования и поставленной задачи была разработана гибридная логико-вероятностная модель риска недо-

стижения стратегической цели грузового порта с учетом использования в качестве оценочного инструментария имитационного моделирования, а также сформулированы логическая и вероятностная модели с учетом влияния на порт внешних случайных факторов. Данные модели в совокупности представляют собой инструментарий и механизм, позволяющий комплексно оценить вероятность наступления рискованных ситуаций в порту, интерпретировать результаты имитационного моделирования и выявить возможные причины наступления нежелательных событий с целью их устранения и предотвращения, а значит, повысит эффективность управления за счет формирования обоснованных управленческих решений.

Список литературы

1. Недосекин А.О., Абдулаева З.И. Управление корпоративными рисками и шансами. СПб., 2010. 125 с.
2. Грищенко О. В. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 112 с.
3. Петров А.Н. Стратегический менеджмент. СПб.: Питер, 2005. 496 с.
4. Вяцкова Н.А. Классификация методов анализа и оценки рисков // Проблемы экономики и менеджмента. 2015. № 9 (49). С.15-25.
5. Балдин К.В. Управление рисками. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. 511 с.
6. Соложенцев Е. Д. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. 2-е изд. СПб.: Бизнес-пресса, 2006. 560 с.
7. Соложенцев Е. Д. Технологии управления риском в структурно-сложных системах. СПб.: ГУАП, 2013. 435 с.
8. Solozhentsev E.D., Mityagin S. Logical and Probabilistic Risk Models for Assessment and Analysis of the Drug Addiction Problem in a Region // International Journal of Risk Assessment and Management. 2015. Vol. 18. №1. P. 1-17.
9. Карасев В.В., Соложенцев Е.Д. Гибридные логико-вероятностные модели для управления социально-экономической безопасностью // Труды СПИИРАН. 2016. № 5 (48). С. 124-149.
10. Соложенцев Е.Д., Алексеев В.В., Карасев В.В. Мониторинг и управление процессом кредитования банка с использованием логико-вероятностных моделей риска // Проблемы анализа риска. 2013. № 6. С. 78 – 87.
11. Антохина Ю.А., Баранов А.В. Имитационное моделирование как инструмент снижения риска // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2014. №5 (89). С. 55 -59.
12. Байрамукова Е.И. Использование метода имитационного моделирования при оценке рисков и оптимизации процессов управления на промышленных предприятиях // Изв. Рос. гос. пед. ун-та А.И. Герцена. 2008. №85. С. 315-320.
13. Марченко Р. С. Имитационное моделирование сценариев инвестиционного проекта с учетом межфакторной взаимосвязи ключевых параметров // Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической молодежной конференции «Раскрой свой научный потенциал». СПб., 2017. С. 69-75.
14. Попитченко М.А. Использование системы менеджмента качества для управления рисками в порту // ТДР. 2017. № 4. С. 54-56.
15. Григорьев О.В., Бондарева И. О., Латыпова Э.А. Управление стратегическими рисками грузового порта с применением имитационного моделирования // Вестник АГТУ Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. №1. С. 155 - 162.

16. Григорьев О. В., Бондарева И. О., Латыпова Э. А. Стратегическое управление грузовым портом на основе оценки рисков // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 1. С. 90-97.

17. Бондарева И.О., Латыпова Э.А. Имитационное моделирование как инструмент комплексной оценки стратегических рисков логистического предприятия // Инженерный вестник Дона. 2017. Т. 44. №1 (44). С. 50.

18. Проталинский О.М., Ханова А.А., Григорьева И.О. Теоретико-множественная модель процессов грузового порта // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 83-89.

19. Ханова А.А., Пономарева А.С. Управление затратами грузового порта на основе функционально-стоимостного анализа // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 3 (161). С. 116-119.

20. Яковлева Я.А., Бондарева И.О., Ханова А.А. Имитационно-аналитическая система лоцманской информационной поддержки морского порта // Сборник научных трудов по материалам IX Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). 16–18 октября 2019 г. Екатеринбург, 2019. С. 592-597.

References

1. Nedosekin A.O., Abdulaeva Z.I. *Upravlenie korporativnymi riskami i shansami* [Corporate Risk and Opportunity Management]. Saint Petersburg, 2010. 125 p. (In Russ.).

2. Grishchenko O.V. *Analiz i diagnostika finansovo-khozyaistvennoi deyatel'nosti predpriyatiya* [Analysis and diagnostics of financial and economic activities of the enterprise]. Taganrog, 2000. 112 p. (In Russ.).

3. Petrov A.N. *Strategicheskii menedzhment* [Strategic Management]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2005. 496 p. (In Russ.).

4. Vyatskova N.A. Klassifikatsiya metodov analiza i otsenki riskov [Classification of analysis and risk assessment methods]. *Problemy ekonomiki i menedzhmenta = Problems of Economics and Management*, 2015, no. 9 (49), pp.15-25 (In Russ.).

5. Baldin K.V. *Upravlenie riskami* [Risk Management]. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2012. 511 p. (In Russ.).

6. Solozhentsev E. D. *Stsenarnoe logiko-veroyatnostnoe upravlenie riskom v biznese i tekhnike* [Scenario logical and probabilistic risk management in business and technology]. St. Petersburg, Biznes-prensa Publ., 2006. 560 p. (In Russ.).

7. Solozhentsev E. D. *Tekhnologii upravleniya riskom v strukturno-slozhnykh sistemakh* [Risk management technologies in structurally complex systems]. St.Petersburg, GUAP Publ., 2013. 443 p. (In Russ.).

8. Solozhentsev E.D., Mityagin S. Logical and Probabilistic Risk Models for Assessment and Analysis of the Drug Addiction Problem in a Region. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 2015, vol. 18, no.1, pp. 1-17.

9. Karasev V.V., Solozhentsev E.D. Gibridnye logiko-veroyatnostnye modeli dlya upravleniya sotsial'no-ekonomicheskoi bezopasnost'yu [Hybrid logical and probabilistic models for managing socio-economic security]. *Trudy SPIIRAN = Transactions of SPIIRAS*, 2016, no. 5 (48), pp. 124-149 (In Russ.).

10. Solozhentsev E.D., Alekseev V.V., Karasev V.V. Monitoring i upravlenie protsessom kreditovaniya banka s ispol'zovaniem logiko-veroyatnostnykh modelei riska [Monitoring and management of the bank lending process using logical and probabilistic risk models]. *Problemy analiza riska = Problems of Risk Analysis*, 2013, no. 6, pp. 78 - 87 (In Russ.).

11. Antokhina Yu.A., Baranov A.V. Imitatsionnoe modelirovanie kak instrument snizheniya riska [Simulation as a tool to reduce risk]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta = News of St. Petersburg State University of Economics*, 2014, no. 5 (89), pp. 55-59 (In Russ.).

12. Bayramukova E.I. Ispol'zovanie metoda imitatsionnogo modelirovaniya pri otsenke riskov i optimizatsii protsessov upravleniya na promyshlennykh predpriyatiyakh [The use of simulation modeling in risk assessment and optimization of management processes in industrial enterprises]. *Izv. Ros. gos. ped. un-ta A.I. Gertsena = Izv. Grew up. State Ped University of A.I. Herzen*, 2008, no.85, pp. 315-320 (In Russ.).

13. Marchenko R. S. [Simulation of investment project scenarios taking into account the inter-factor relationship of key parameters]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi molodezhnoi konferentsii "Raskroi svoi nauchnyi potentsial"*. [Collection of scientific papers on the materials of the III International scientific-practical youth conference "Uncover your scientific potential"]. St. Petersburg, 2017, pp. 69-75 (In Russ.).

14. Popitchenko M.A. Ispol'zovanie sistemy menedzhmenta kachestva dlya upravleniya riskami v portu [Use of a quality management system for risk management in a port]. *TDR = TDR*, 2017, no. 4, pp. 54-56 (In Russ.).

15. Grigoriev O.V., Bondareva I.O., Latypova E.A. Upravlenie strategicheskimi riskami грузового порта s primeneniem imitatsionnogo modelirovaniya [Strategic risk management of a cargo port using simulation modeling]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computing and Computer Science*, 2013, no.1, pp. 155 - 162 (In Russ.).

16. Grigoryev O. V., Bondareva I. O., Latypova E. A. Strategicheskoe upravlenie gruzovym portom na osnove otsenki riskov [Strategic management of a cargo port based on risk assessment]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computing and Computer Science*, 2015, no. 1, pp. 90-97 (In Russ.).

17. Bondareva I.O., Latypova E.A. Imitatsionnoe modelirovanie kak instrument kompleksnoi otsenki strategicheskikh riskov logisticheskogo predpriyatiya [Simulation as a tool for a comprehensive assessment of the strategic risks of a logistics enterprise]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don*, 2017, vol. 44, no. 1 (44), p. 50 (In Russ.).

18. Protalinsky O.M., Khanova A.A., Grigorieva I.O. Teoretiko-mnozhestvennaya model' protsessov gruzovogo porta [Theoretical-multiple model of cargo port processes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computing and Computer Science*, 2009, vol. 2, pp. 83-89 (In Russ.).

19. Khanova A.A., Ponomareva A.S. Upravlenie zatratami gruzovogo porta na osnove funktsional'no-stoimostnogo analiza [Cargo port cost management based on functional and cost analysis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = News of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, 2011, no. 3(161), pp. 116-119 (In Russ.).

20. Yakovleva Y.A., Bondareva I.O., Khanova A.A. [Simulation-analytical system of pilot information support for the seaport]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam IX Vse-rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeniyu v nauke i promyshlennosti «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2019)* [Collection of scientific papers on the materials of the IX All-Russian scientific-practical conference on simulation modeling and its application in science and industry "Simulation. Theory and Practice" (IMMOD-2019)]. Yekaterinburg, 2019, pp. 592-597 (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the Author

Бондарева Ирина Олеговна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»,
г. Астрахань, Российская Федерация,
e-mail: i.o.bondareva@gmail.com

Irina O. Bondareva, Cand of Sci. (Engineering),
Associate Professor, Astrakhan State Technical
University, Astrakhan, Russian Federation,
e-mail: i.o.bondareva@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>

Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве

К.С. Захаров¹✉, А.И. Савельев¹

¹ Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
14-я линия В.О. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: kon7666007@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка алгоритма сглаживания траектории движения наземного робота по пересеченной местности, представленной в виде графа в трехмерном пространстве.

Методы. В данной статье представлен алгоритм CSA (Curve Smoothing and Averaging) для сглаживания на плоскости Оху локальных кривых, составляющих глобальную кривую, представленную в виде пути на связном графе в трехмерном пространстве. Представленный алгоритм основан на разработанном ранее подходе LRLHD-A*, в котором используется информация о вершинах графа, их соседях и соединяющих их ребрах для выбора области, через которую будет пролегать сглаженная кривая. Во избежание на выходе алгоритма ломаной кривой был разработан метод усреднения кривой, идея которого заключается в смещении серединных точек локальных кривых, вдоль ребер, на которых они находятся.

Результаты. Было произведено экспериментальное сравнение кривизны траекторий, получаемых с помощью алгоритма сглаживания кривой с усреднением кривой (CSA) и без него (CS). Тестирование метода проводилось на трехмерной карте местности, представленной в виде графа с 100082 вершинами. Для проведения экспериментов использовалась выборка из 10 пар случайных вершин, между которыми строился путь с помощью алгоритма LRLHD-A*. Результаты экспериментов показали, что усреднение кривой после сглаживания снижает ее кривизну от 24 до 42%.

Заключение. Траектории, сглаженные с помощью разработанного алгоритма CSA, имеют более плавные изгибы кривой на поворотах, по сравнению с алгоритмом, взятым за основу. Это позволяет добиться более плавного движения роботов и как следствие снижения расхода заряда аккумулятора робота.

Ключевые слова: планирование пути; автономная навигация; сглаживание траектории; трехмерное пространство; навигационный граф.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90053.

Для цитирования: Захаров К.С., Савельев А.И. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 107-125. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.

Поступила в редакцию 28.09.2020

Подписана в печать 14.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space

Konstantin S. Zakharov ¹ ✉, Anton I. Saveliev ¹

¹ St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS)
39, 14-th Line V.O., St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: kon7666007@yandex.ru

Abstract

Purpose or research. Development of an algorithm for smoothing the trajectory of a ground robot over rough terrain, represented as a graph in three-dimensional space.

Methods. This article presents the CSA (Curve Smoothing and Averaging) algorithm for smoothing local curves in the Oxy plane that make up a global curve, represented as a path on a connected graph in 3D space. The presented algorithm is based on the previously developed LRLHD-A * approach, which uses information about the vertices of the graph, their neighbors and the edges connecting them to select the area through which the smoothed curve will run. In order to avoid a broken curve at the output of the algorithm, a curve averaging method was developed, the idea of which is to shift the midpoints of local curves along the edges on which they are located.

Results. An experimental comparison was made of the curvature of the trajectories obtained using the curve smoothing algorithm with curve averaging (CSA) and without it (CS). The method was carried out on a three-dimensional map of the area, presented in the form of a graph with 100082 vertices. For the experiments, a sample of 10 pairs of random vertices was used, between which a path was built using the LRLHD-A * algorithm. The results of the experiments have shown that averaging the curve after smoothing reduces its curvature from 24 to 42%.

Conclusion. Trajectories smoothed using the developed CSA algorithm have smoother curve bends at turns, compared to the algorithm taken as a basis. This allows the robots to move more smoothly and, as a consequence, reduce the consumption of the robot's battery.

Keywords: path planning; self-navigation; smoothing the trajectory; three-dimensional space; navigation graph.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-33-90053.

For citation: Zakharov K. S., Saveliev A. I. Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 107-125 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125>.

Received 28.09.2020

Accepted 14.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к решению задач, связанных с автономной навигацией робототехнических комплексов (РТК). Это обусловлено высоким спросом на введение в действие РТК в сельскохо-

зяйственных целях, в целях исследования труднодоступных территорий, картографирования местности и т.д. В зависимости от особенностей местности, по которой будет передвигаться РТК, разрабатывается алгоритм планирования траектории его движения, в кото-

ром траектории представляются в виде множества точек, которые надо посетить РТК для достижения цели, либо в виде кривых, описываемых уравнениями. Существующие алгоритмы планирования траектории не всегда учитывают необходимость сглаживания траектории. Однако эта особенность позволяет сократить время, затрачиваемое роботом на совершение поворотов. В данной работе разработан алгоритм сглаживания траектории движения РТК на плоскости Оху, представленной в виде пути на связном графе в трехмерном пространстве.

Существует множество методов сглаживания кривой в двумерном пространстве. Например, с помощью метода кривых Дубинса [1-4], суть которого заключается в замене частей отрезков, прилегающих к углу ломаной, дугой окружности. Кривые Дубинса представляют собой простую, но в то же время эффективную, технику для сглаживания пути в режиме реального времени, поскольку их построение не требует больших вычислительных затрат. Кривые Дубинса также могут быть скомбинированы с клотоидами для удовлетворения различных ограничений. Также существуют методы сглаживания кривой с помощью кривых Безье [5-11], которые используют контрольные точки для определения формы кривой. Одними из популярных являются алгоритмы на основе обобщения кривых Безье – В-сплайнов [12-16]. В-сплайны

являются эффективным средством для сглаживания пути, так как желаемая траектория может быть сгенерирована для разных значений кривизны и конфигураций препятствий. Методы на основе неоднородных рациональных В-сплайнов (NURBS) [17-21] являются очень гибким инструментом для построения сглаженных траекторий за счёт того, что они манипулируют как контрольными точками, так и весами точек. Основными недостатками использования NURBS-кривых является большее количество используемой памяти в сравнении с аналогичными алгоритмами. Также неправильная инициализация весов точек может привести к плохой параметризации. Несмотря на это, использование NURBS-кривых является эффективной техникой сглаживания траектории благодаря четким геометрическим интерпретациям, уменьшения количества времени работы алгоритма по сравнению с аналогами и стабильностью при нахождении траектории. Существуют алгоритмы сглаживания на основе квадратичной интерполяции [22, 23], которые строят непрерывную кривую, используя квадратные многочлены и функции принадлежности. У алгоритмов на основе квадратичной интерполяции есть два основных недостатка: высокая вычислительная сложность и феномен Рунге, который является классической иллюстрацией несходимости полиномиальной интерполяции. Алгоритмы сглаживания пути

в двумерном пространстве не могут быть использованы для сглаживания пути в трехмерном пространстве, так как они не могут учитывать рельеф местности. Это является серьезным недостатком, так как траектории, построенные с помощью подобных алгоритмов, могут пролегать в областях с большими перепадами высот, что может сильно затруднять движение робота по данной траектории.

Помимо сглаживания кривой в двумерном пространстве также существуют методы сглаживания кривых в трехмерном пространстве. В работе [24] представлен алгоритм сглаживания пути на графе в трехмерном пространстве. Данный подход позволяет находить сглаженные траектории в трехмерном пространстве с различными значениями параметров кривизны выходной траектории и максимального расстояния до исходной кривой. Главным недостатком данного алгоритма являются ситуации появления ломаных линий в сглаженной траектории, что может значительно увеличить время движения робота до цели. Это связано с тем, что данный алгоритм учитывает кривизну локальной кривой, состоящей всего из трех точек. В статье [25] представлен алгоритм сглаживания трехмерной траектории движения робота по поверхности Дарбу [26], который последовательно оптимизирует траекторию в горизонтальной, фронтальной и профильной проекции с заранее заданными ограничениями по линейной скорости, угловой скорости и

ширине робота. Представленный подход включает в себя два уровня: планировщик неоптимальной геодезической кривизны и планировщик скорости, который использует набор кривых из предыдущего уровня для аналитического вычисления скорости на основе параметров безопасности робота и его кинематических ограничений, а также для создания графика измерения ускорения. Данный подход полезен для улучшения процесса строительства автомагистралей, он позволяет оценить их жизненный цикл за счет поиска оптимальных по времени путей. Однако данный подход не подходит для сглаживания траектории движения робота по неровной местности, так как трехмерная модель местности не может быть представлена в виде поверхности Дарбу.

В данной работе рассмотрена проблема сглаживания траектории движения в трехмерном пространстве. Для ее решения предложен алгоритм сглаживания траектории движения на графе в трехмерном пространстве, основанный на подходе, представленном в [24]. Особенностью разработанного алгоритма является возможность сглаживания кривых, представленных в виде пути на графе в трехмерном пространстве, что позволяет находить гладкую траекторию движения наземного робота по неровной местности. Также представленный алгоритм устраняет проблему, связанную с появлением резких изгибов на поворотах в плоскости Oxy .

Материалы и методы

А. Сглаживание траектории

В данной работе решается задача сглаживания траектории движения в трехмерном пространстве для различных моделей местности, представленных в виде связного графа. Исходными данными для этой задачи являются: связный граф, отображающий особенности местности, путь, представленный в виде упорядоченного множества вершин на связном графе, в котором каждая вершина соединена со следующей в последовательности вершиной (кроме последней), а также граничные значения параметров, определяющих максимальное расстояние, на которое могут быть смещены точки исходной кривой, и максимальную кривизну конечной кривой. Пусть $M \in \mathbb{R}^3$ – трехмерная сетка. Сетка состоит из вершин V с соответствующими позициями $x_i \in \mathbb{R}^3$ и ребер $E = \{(i, j) | i, j \in V\}$. Для решения задачи сглаживания траектории движения был разработан алгоритм итеративного сглаживания траектории, представленной в виде пути на связном графе в трехмерном пространстве, с усреднением конечной кривой. На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма CSA.

Основой алгоритма является итеративное сглаживание кривой после её инициализации. Под инициализацией здесь понимается нахождение безколлизионной траектории движения с помощью алгоритмов планирования пути. После инициализации исходной траектории ее вершины добавляются в упо-

рядоченное множество P . Далее идёт вычисление кривизны текущей траектории P , и если она ниже определенного значения, то алгоритм заканчивает работу. В противном случае начинается процесс сглаживания траектории. Кривизна траектории определяется как наибольшая кривизна локальной кривой, состоящей из 3 точек, среди всех локальных кривых, входящих в глобальную кривую. Далее создаётся пустое множество P_n , в которое добавляется первая вершина из множества P , то есть начальную вершину исходного пути. После этого необходимо создать копию множества, содержащего текущий путь P_c , чтобы манипулировать новой траекторией, не влияя на старую. Далее из множества P_c извлекаются три первые вершины и добавляются в пустое множество C_i для составления локальной кривой, вершины которой будут смещаться. После создания локальной кривой C_i начинается процесс ее сглаживания. Если точка кривой находится на ребре графа, то она смещается в том или ином направлении вдоль ребра. В том случае, когда точка кривой лежит непосредственно на вершине графа, необходимо использовать особый подход. Особенностью данного алгоритма является то, что точки выходной кривой не проходят через вершины графа. Данный подход предполагает два варианта шага сглаживания для точки p_i : p_i находится на ребре, p_i находится на вершине графа.

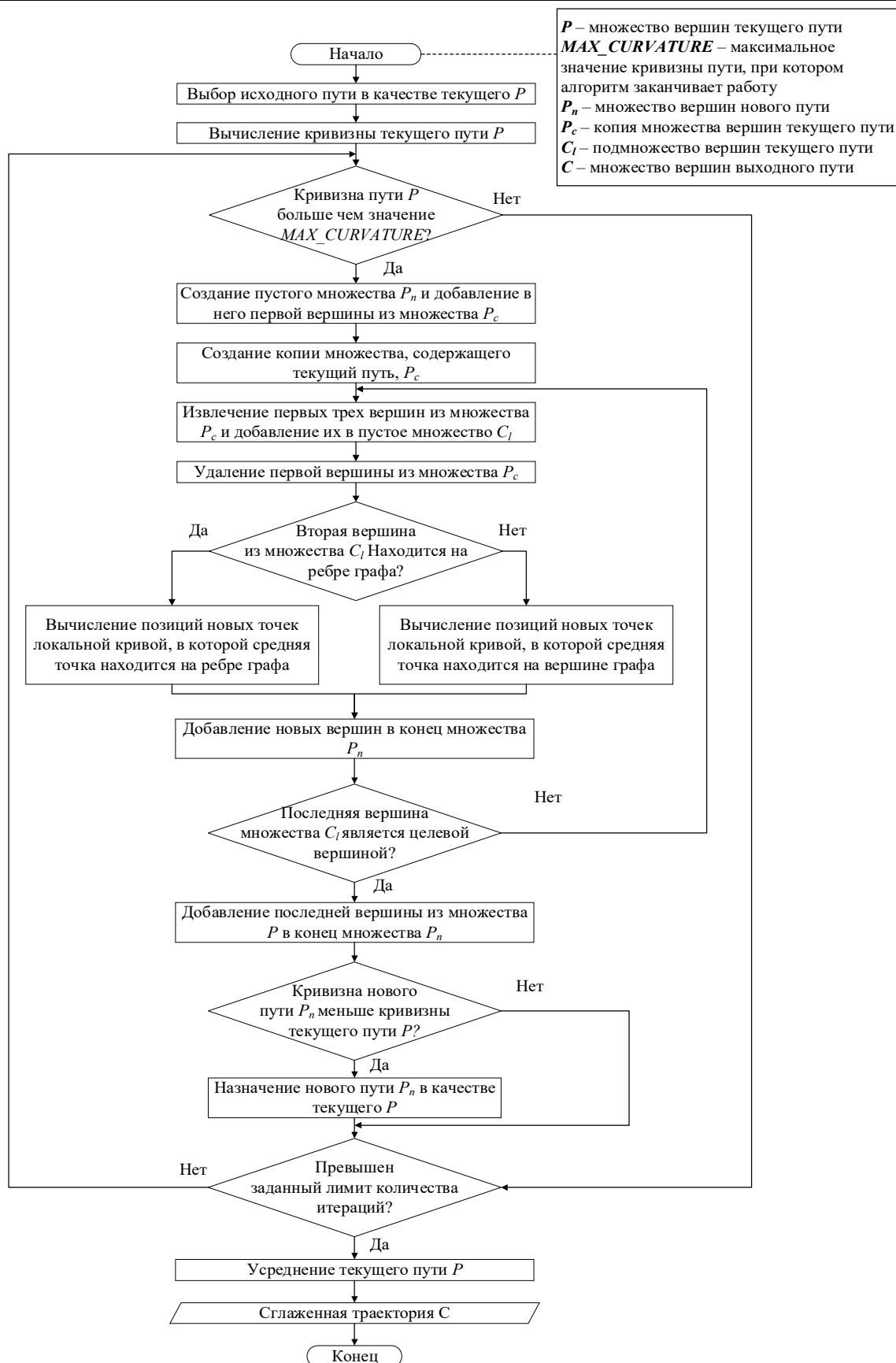


Рис. 1. Алгоритм сглаживания траектории движения CSA

Fig. 1. Algorithm for smoothing the trajectory of CSA

В первом варианте p_i может быть смещена в двух направлениях, а именно в сторону одной из точек, образующих ребро. Во втором варианте p_i заменяется на несколько точек, лежащих на ребрах, инцидентных вершине p_i . Одна итерация сглаживания кривой включает в себя смещение каждой точки данной кривой. Алгоритм сглаживания кривой совершает шаг сглаживания для каждой последовательной тройки точек исходной кривой и заканчивает работу, когда заданный критерий кривизны траектории будет достигнут или по истечению определенного количества итераций.

Вычисление позиции точки, находящейся на ребре

В случае, если точка кривой находится на ребре, то для нее вычисляется новая позиция, которая обеспечит наименьшую кривизну локальной кривой. В алгоритме на рис. 1 данная процедура выполняется в блоке «Вычисление позиций новых точек локальной кривой, в которой средняя точка находится на ребре графа». Пусть p_i – точка, лежащая на ребре e , $p_- = p_{i-1}$ и $p_+ = p_{i+1}$ – её соседние точки, а p_{e1} и p_{e2} – точки, образующие ребро e . Тогда координата x новой точки p^* находится путем объединения уравнений прямых (p_-, p_+) и (p_{e1}, p_{e2}) в двумерной плоскости в систему и её решения:

$$\begin{cases} y = \frac{k_a * x + k_{1a}}{k_{2a}} \\ y = \frac{k_b * x + k_{1b}}{k_{2b}}, \end{cases} \quad (1)$$

где параметры выражены следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} k_a &= p_-(y) - p_+(y), \\ k_{1a} &= p_-(y) * p_+(x) - p_-(x) * p_+(y), \\ k_{2a} &= p_-(x) - p_+(x), \\ k_b &= p_{e1}(y) - p_{e2}(y), \\ k_{1b} &= p_{e1}(y) * p_{e2}(x) - p_{e1}(x) * p_{e2}(y), \\ k_{2b} &= p_{e1}(x) - p_{e2}(x). \end{aligned}$$

В (1) вычтем из первого уравнения второе и выразим x :

$$x = \frac{k_{2a} * k_{1b} - k_{2b} * k_{1a}}{k_{2b} * k_a - k_{2a} * k_b}. \quad (2)$$

Координаты y и z новой точки p^* находятся путем подстановки координаты x , найденной с помощью формулы (2), в уравнение прямой между точками p_{e1} и p_{e2} :

$$\begin{aligned} y &= \frac{k_{2y} * x + k_y}{k_1}, \\ z &= \frac{k_{2z} * x + k_z}{k_1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметры выражены следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} k_{2y} &= p_{e1}(y) - p_{e2}(y), \\ k_y &= p_{e2}(y) * p_{e1}(x) - p_{e2}(x) * p_{e1}(y), \\ k_z &= p_{e2}(z) * p_{e1}(x) - p_{e2}(x) * p_{e1}(z), \\ k_1 &= p_{e1}(x) - p_{e2}(x). \end{aligned}$$

Далее вычисляется расстояние между p^* и p_{init} – точкой изначальной кривой, к которой применяется шаг сглаживания. Если расстояние оказывается больше определенного порога λ_{dist} ,

тогда координаты p^* вычисляются по формуле

$$p^* = p_{init} + \lambda_{dist} * v(p_{init}, p^*), \quad (4)$$

где $v(p_{init}, p^*)$ – трехмерный вектор от p_{init} к p^* .

Б. Вычисление позиции точки, находящейся на вершине

Второй вариант шага сглаживания применяется в том случае, когда точка p_i локальной кривой $[p_-, p_i, p_+]$ находится на вершине графа, кривая должна быть локально разделена на несколько сегментов, покрывающих ребра $E_i := \{(i, j) \in E \mid j \in V\}$. В алгоритме на рис. 1 данная процедура выполняется в блоке «Вычисление позиций новых точек локальной кривой, в которой средняя точка находится на вершине графа». Мы разделяем смежные с p_i вершины на два упорядоченных множества. Первое множество N_1 перечисляет всех соседей вершины p_i против часовой стрелки, начиная от p_- и заканчивая p_+ . Второе множество N_2 перечисляет всех соседей вершины p_i по часовой стрелке, начиная от p_- и заканчивая p_+ . Пусть p_k^1 и p_k^2 обозначают позиции вершин в N_1 и N_2 соответственно, где конечные точки $p_0^1 = p_0^2 = p_-$ и $p_m^1 = p_n^2 = p_+$.

После сглаживания локальной кривой p_i будет заменена последовательностью точек, лежащих на ребрах: $E_1 = \{(i, j) \mid j \in N_1\}$ или $E_2 = \{(i, j) \mid j \in N_2\}$.

Для выбора между этими двумя множествами вершин мы проводим прямую между p_- и p_+ . Если прямая пересекает в двухмерной плоскости ребра из E_1 , то точки новой локальной кривой будут пролегать через ребра из этого множества. В противном случае, если прямая пересекает в двухмерной плоскости ребра из E_2 , то точки новой локальной кривой будут пролегать через ребра из множества E_2 .

После выбора множества ребер N_c , через которые будет пролегать новая локальная кривая, мы вычисляем позиции новых точек, начиная от p_0^c до p_+ . Для каждой новой точки p_k^c при $k = 1, \dots, m-1$ вычисляется её позиция, где m – мощность множества N_c . Координата x точки p_k^c находится как пересечение прямых (p_-, p_+) и (p_i, n_k^c) в двухмерной плоскости с помощью формул (1) и (2), а координаты y и z находятся с помощью подстановки найденной координаты x в уравнение прямой (p_i, n_k^c) в формуле, где n_k^c – k -ая смежная с p_i из множества N_c . Если расстояние между новой вершиной p_k^c и вершиной изначальной кривой $p_i = p_{init}$ больше λ_{dist} , то позиция вершины p_k^c вычисляется по формуле (4), где v – трехмерный вектор от p_{init} к n_p^c .

После нахождения позиций новых вершин локальных кривых они заносятся в конец множества. Если последняя

вершина множества C_i является целевой вершиной пути, то в конец множества P_n добавляется целевая вершина. После этого осуществляется оценка кривизны пути из множества P_n , и если значение кривизны пути из множества P_n меньше, чем значение кривизны пути из множества P , то новый путь P_n назначается в качестве текущего пути P . Если превышен заданный лимит количества итераций или кривизна текущего пути P меньше, чем значение $MAX_CURVATURE$, то алгоритм заканчивает основной этап сглаживания траектории движения. В противном случае начинается новая итерация сглаживания пути с блока «Создание пустого множества P_n и добавление в него первой вершины из множества P » с рис. 1.

В. Усреднение кривой

После завершения основного этапа сглаживания кривой необходимо снизить кривизну траектории на критических участках, чтобы сделать её более плавной в местах поворота. Главная проблема алгоритма сглаживания, взятого за основу [24], в том, что он учитывает кривизну локальной кривой, состоящей всего из трех точек, поэтому в некоторых местах траектория движения может быть ломаной. Для устранения данной проблемы был разработан метод усреднения кривой. На рис. 1 данная процедура идёт в конце блок-схемы, в блоке «Усреднение текущего пути P ».

Усреднение кривой заключается в смещении срединных точек локальных кривых, состоящих из 6 точек, вдоль ребер, на которых они находятся. Изменение позиции точки кривой p_i будет влиять на кривизну локальной кривой $[p_{i-2}, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, p_{i+2}]$, поэтому, чтобы избежать «изломов» глобальной кривой мы будем последовательно извлекать из глобальной кривой локальную кривую $c = [p_{i-5}, p_{i-4}, p_{i-3}, p_{i-2}, p_{i-1}, p_i]$, где $i = 6, \dots, n$, и будем изменять позиции точек p_3 и p_4 . Вычислим альтернативные позиции точек с помощью формулы (4):

$$\begin{aligned} p_{i-3}^1 &= p_{i-3} + shift_{dist} * v(p_{i-3}, p_{i-3}^{e1}), \\ p_{i-3}^2 &= p_{i-3} + shift_{dist} / 2 * v(p_{i-3}, p_{i-3}^{e1}), \\ p_{i-3}^3 &= p_{i-3} + shift_{dist} * v(p_{i-3}, p_{i-3}^{e2}), \\ p_{i-3}^4 &= p_{i-3} + shift_{dist} / 2 * v(p_{i-3}, p_{i-3}^{e2}), \\ p_{i-2}^1 &= p_{i-2} + shift_{dist} * v(p_{i-2}, p_{i-2}^{e1}), \\ p_{i-2}^2 &= p_{i-2} + shift_{dist} / 2 * v(p_{i-2}, p_{i-2}^{e1}), \\ p_{i-2}^3 &= p_{i-2} + shift_{dist} * v(p_{i-2}, p_{i-2}^{e2}), \\ p_{i-2}^4 &= p_{i-2} + shift_{dist} / 2 * v(p_{i-2}, p_{i-2}^{e2}), \end{aligned}$$

где $shift_{dist}$ – расстояние, соразмерное с длиной ребер, на которое будут смещены точки кривой, а $p_{i-3}^{e1}, p_{i-3}^{e2}, p_{i-2}^{e1}, p_{i-2}^{e2}$ – точки, соединённые ребрами, на которых находятся точки p_{i-3} и p_{i-2} соответственно. Тогда $P_{i-3} = [p_{i-3}, p_{i-3}^1, p_{i-3}^2, p_{i-3}^3, p_{i-3}^4]$ и $P_{i-2} = [p_{i-2}, p_{i-2}^1, p_{i-2}^2, p_{i-2}^3, p_{i-2}^4]$ – множества альтернативных позиций точек p_{i-3} и p_{i-2} соответственно. После нахождения

ния альтернативных позиций точек p_{i-3} и p_{i-2} на место этих точек в локальную кривую c подставляется каждая возможная пара вершин из множеств P_{i-3} и P_{i-2} . Позиции точек p_{i-3} и p_{i-2} изменяются на те, которые обеспечивают наименьшее значение кривизны локальной кривой c . Благодаря попарному изменению позиций серединных точек локальной кривой метод усреднения кривой находит оптимальные позиции

точек, находящихся на изгибах

кривой, обеспечивая тем самым более плавное движение робота.

Результаты и их обсуждение

Для апробации разработанного решения был выбран симулятор Gazebo, в котором была смоделирована трехмерная карта и РТК, передвигающийся по ней. На рис. 2 представлен изначальный путь РТК, построенный алгоритмом LRLHD-A* [27] (белые точки), и полученная на выходе сглаженная кривая (зелеными точками).

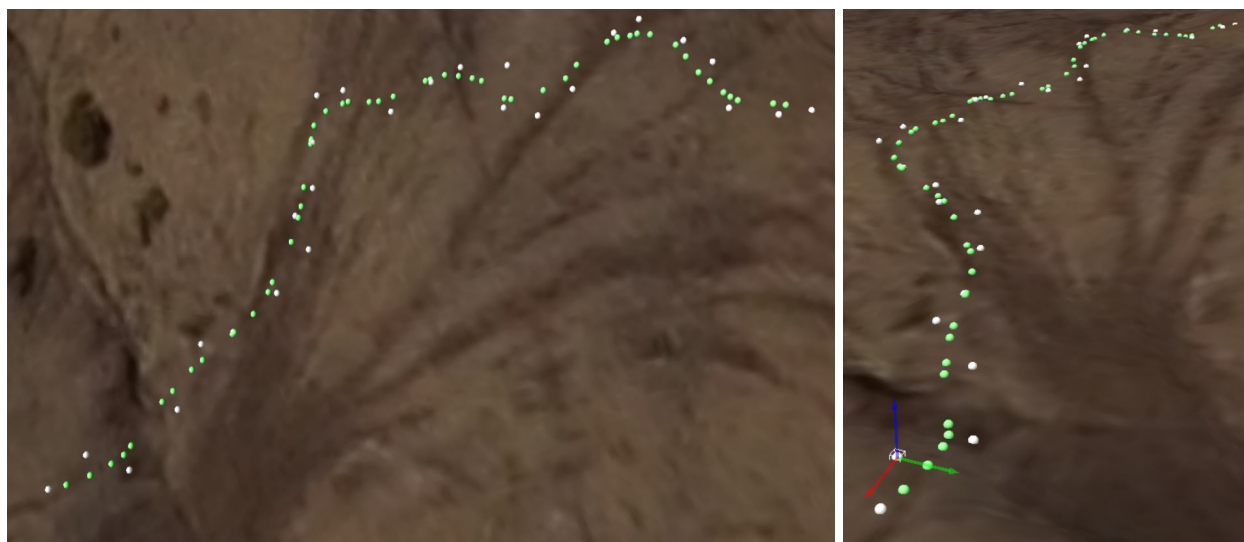


Рис. 2. Визуализация построенного пути и сглаженной кривой в Gazebo

Fig. 2. Visualization of the constructed path and smoothed curve in Gazebo

Как видно из рис. 2, сглаженная кривая не имеет сильных изгибов по сравнению с исходной траекторией, а также точки выходной кривой находятся недалеко от соответствующих им точек исходного пути.

Проблема сглаживания траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве на данный момент недостаточно хорошо изучена [24, 25],

поэтому для оценки разработанного алгоритма сравним его с исходным алгоритмом и алгоритмом из работы [24]. Были проведены эксперименты по сравнению кривизны траекторий, получаемых с помощью алгоритма сглаживания кривой с усреднением кривой (CSA) и без него (CS). Для вычисления кривизны глобальной траектории в данной работе используется следующий

метод: каждые три последовательные точки глобальной траектории формируют локальную кривую $c = [p_i, p_{i+1}, p_{i+2}]$; кривизна каждой локальной кривой вычисляется как арккосинус скалярного произведения двухмерных направленных векторов $\overrightarrow{p_i p_{i+1}}$ и $\overrightarrow{p_{i+1} p_{i+2}}$, поделенного на произведение модулей этих векторов:

$$\alpha_i = \arccos \left(\frac{\overrightarrow{p_i p_{i+1}} * \overrightarrow{p_{i+1} p_{i+2}}}{|\overrightarrow{p_i p_{i+1}}| * |\overrightarrow{p_{i+1} p_{i+2}}|} \right).$$

Кривизна глобальной траектории C равна наибольшему значению угла между векторами одной из локальных кривых, входящих в нее:

$$C = \max_{i=1..n-2} \alpha_i,$$

где n – количество точек глобальной траектории.

Тестирование проводилось на трехмерной карте местности, представлен-

ной 100082 вершинами и 198580 треугольниками. Для проведения экспериментов использовалась выборка из 10 пар случайных вершин, между которыми строился путь с помощью алгоритма LRLHD-A*. На рис. 3 представлена зависимость кривизны траектории от ее длины для исходного пути и сглаженных с помощью методов CS и CSA кривых.

Из рис. 3 видно, что сглаживание кривой без усреднения (CS) снижает кривизну изначальной кривой более чем в 2 раза. Также из рис. 3 видно, что применение операции усреднения к сглаженной траектории (CSA) снижает её кривизну на 24-42 %. Это обусловлено тем, что кривая, сглаженная по методу CS, имеет сильные изгибы, что снижает общую кривизну такой кривой. На рис. 4 представлен участок карты, на котором визуализированы траектории, сглаженные с помощью алгоритма CS (белыми точками) и алгоритма CSA (зелеными точками).

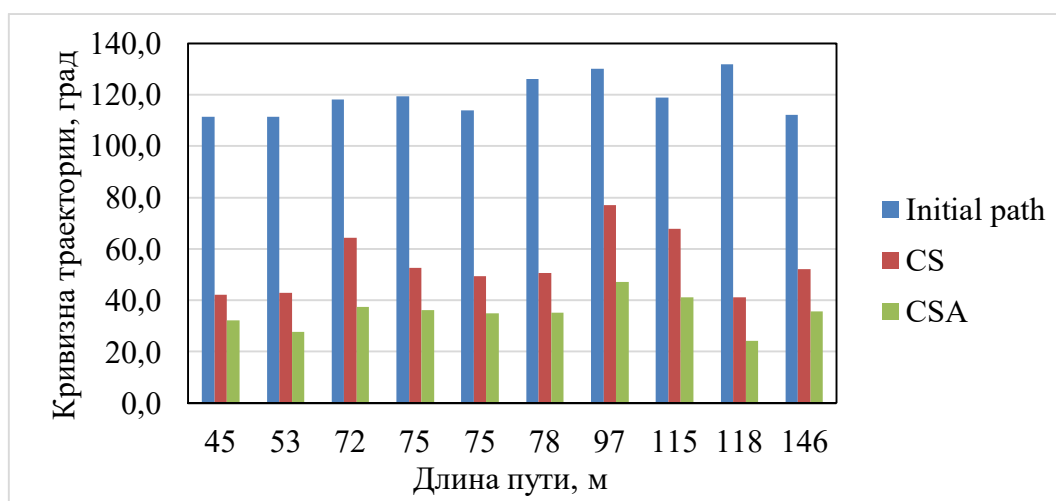


Рис. 3. Зависимость кривизны траектории от ее длины

Fig. 3. Dependence of the trajectory curvature on its length

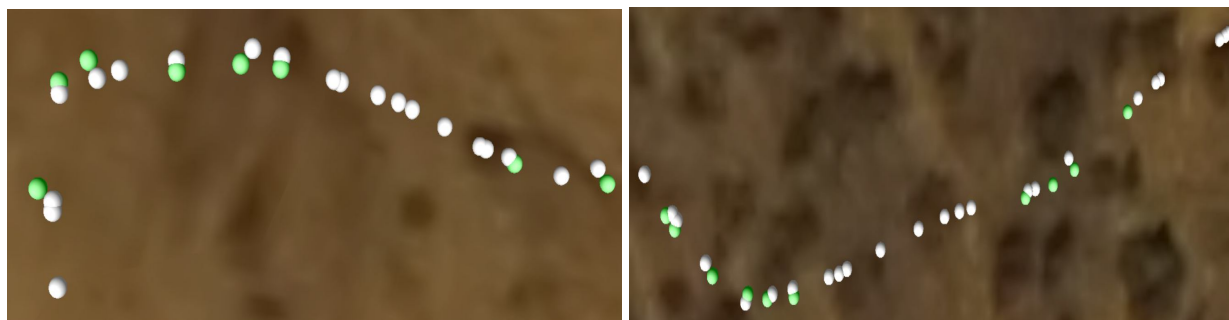


Рис. 4. Траектории, сглаженные с помощью алгоритмов CS и CSA

Fig. 4. Trajectories smoothed using the CS and CSA algorithms

Из рис. 4 видно, что траектория, сглаженная с помощью алгоритма CS, имеет резкие повороты, где вершины кривой образуют почти прямой угол, в то время как траектория, сглаженная с помощью алгоритма CSA, имеет более плавные изгибы на поворотах. Применение операции усреднения к кривой перемещает ее точки в проблемных участках таким образом, чтобы кривизна локальных кривых, находящихся в этих участках, была минимальной.

Выводы

Проблема сглаживания траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве еще недостаточно изучена. Решение этой проблемы позволит более эффективно планировать пути движения наземных роботов, эксплуатируемых в исследовательских, сельскохозяйственных, картографических и других целях. В данной работе

был предложен алгоритм сглаживания траектории, представленной в виде пути на графе в трехмерном пространстве, с усреднением конечной кривой. Разработанный алгоритм CSA и алгоритм CS был апробированы в симуляторе Gazebo. В результате экспериментов установлено, что метод CSA строит кривые, кривизна которых на 24-42 % меньше, чем у кривых, находимых с помощью метода CS. Траектории, сглаженные с помощью алгоритма CSA, имеют более плавные изгибы кривой на поворотах, по сравнению с алгоритмом, взятым за основу. Благодаря этому повышается эффективность роботов, движущихся по данным траекториям. В дальнейшем разработанный алгоритм будет применяться в задачах планирования маршрутов на с/х территориях [28-31] и в модульной робототехнике [32, 33].

Список литературы

1. Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents // American Journal of mathematics. 1957. № 79(3). P. 497-516. <https://doi.org/10.2307/2372560>

2. Pérez J., Godoy J., Villagrà J., Onieva E. Trajectory generator for autonomous vehicles in urban environments // *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2013. P. 409-414. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630608>
3. Gerlach A.R., Kingston D., Walker B.K. UAV navigation using predictive vector field control // *2014 American Control Conference*. IEEE, 2014. P. 4907-4912. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859082>
4. Lin Y., Saripalli S. Path planning using 3D dubins curve for unmanned aerial vehicles // *2014 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*. IEEE, 2014. P. 296-304. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842268>
5. Choi J., Curry R., Elkaim G. Path planning based on bézier curve for autonomous ground vehicles // *Advances in Electrical and Electronics Engineering-IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008*. IEEE, 2008. P. 158-166. <https://doi.org/10.1109/WCECS.2008.27>
6. Rastelli J.P., Lattarulo R., Nashashibi F. Dynamic trajectory generation using continuous-curvature algorithms for door to door assistance vehicles // *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. IEEE, 2014. P. 510-515. <https://doi.org/10.1109/IVS.2014.6856526>
7. Walton D.J., Meek D.S., Ali J.M. Planar G2 transition curves composed of cubic Bézier spiral segments // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2003. № 157(2). P. 453-476. [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(03\)00435-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(03)00435-7)
8. Montes N., Mora M.C., Tornero J. Trajectory generation based on rational bezier curves as clothoids // *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2007. P. 505-510. <https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290165>
9. Real-time clothoid approximation by Rational Bezier curves / N. Montés, A. Herraéz, L. Armesto, J. Tornero // *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2008. P. 2246-2251. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543548>
10. Bezier curve based path planning for autonomous vehicle in urban environment / L. Han, H. Yashiro, H.T.N. Nejad, Q.H. Do, S. Mita // *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2010. P. 1036-1042. <https://doi.org/10.1109/IVS.2010.5548085>
11. Continuous curvature planning with obstacle avoidance capabilities in urban scenarios / D. González, J. Perez, R. Lattarulo, V. Milanés, F. Nashashibi // *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2014. P. 1430-1435. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957887>
12. Elbanhawi M., Simic M., Jazar R.N. Continuous path smoothing for carlike robots using B-spline curves // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2015. № 80(1). P. 23-56. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0172-0>
13. Elbanhawi M., Simic M., Jazar R. Randomized bidirectional B-Spline parameterization motion planning // *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. 2015. № 17(2). P. 406-419. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2477355>

14. Komoriya K., Tanie K. Trajectory design and control of a wheel-type mobile robot using B-spline curve // *Proceedings. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems'. (IROS'89)'The Autonomous Mobile Robots and Its Applications.* IEEE, 1989. P. 398-405. <https://doi.org/10.1109/IROS.1989.637937>
15. Berglund T., Brodnik A., Jonsson H., Staffanson M., Soderkvist I. Planning smooth and obstacle-avoiding B-spline paths for autonomous mining vehicles // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering.* 2009. № 7(1). P. 167-172. <https://doi.org/10.1109/TASE.2009.2015886>
16. Yang K., Sukkarieh S. An analytical continuous-curvature path-smoothing algorithm // *IEEE Transactions on Robotics.* 2010. № 26(3). P. 561-568. <https://doi.org/10.1109/TRO.2010.2042990>
17. Herrmann P., Gerngroß M., Endisch C. NURBS based trajectory generation for an industrial five axis needle winding robot // *2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR).* IEEE, 2018. P. 31-36. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2018.8384640>
18. Ravari A.N., Taghirad H.D. NURBS-based representation of urban environments for mobile robots // *2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM).* IEEE, 2016. P. 20-25. <https://doi.org/10.1109/ICRoM.2016.7886782>
19. Shi X., Fang H., Guo L. Multi-objective optimal trajectory planning of manipulators based on quintic NURBS // *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.* IEEE, 2016. P. 759-765. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558658>
20. NURBs trajectory generation and following by an autonomous mobile robot navigating in 3D environment / H. Belaidi, A. Hentout, B. Bouzouia, H. Bentarzi, A. Belaidi // *The 4th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent.* IEEE, 2014. P. 168-173. <https://doi.org/10.1109/CYBER.2014.6917455>
21. Guo H., Meng Y., Jin Y. Swarm robot pattern formation using a morphogenetic multi-cellular based self-organizing algorithm // *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* IEEE, 2011. P. 3205-3210. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979821>
22. Huh U.Y., Chang S.R. AG 2 continuous path-smoothing algorithm using modified quadratic polynomial interpolation // *International Journal of Advanced Robotic Systems.* – 2014. № 11(2). P. 25. <https://doi.org/10.5772/57340>
23. Chang S.R., Huh U.Y. A collision-free G 2 continuous path-smoothing algorithm using quadratic polynomial interpolation // *International Journal of Advanced Robotic Systems.* 2014. № 11(12). P. 194. <https://doi.org/10.5772/59463>
24. Lawonn K., Gasteiger R., Rössl C., Preim B. Adaptive and robust curve smoothing on surface meshes // *Computers & graphics.* 2014. № 40(22-35). <https://doi.org/10.1016/j.cag.2014.01.004>

25. Zhang H., Yang S. Smooth path and velocity planning under 3D path constraints for car-like vehicles // *Robotics and Autonomous Systems*. 2018. №107. P. 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.05.013>
26. Hameiri E., Shimshoni I. Estimating the principal curvatures and the Darboux frame from real 3-D range data // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 2003. № 33(4). P. 626-637. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.814304>
27. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham, 2020. P. 319-330. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3>
28. Aksamentov E., Astapova M., Usina E. Approach to Obstacle Localization for Robot Navigation in Agricultural Territories // *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham, 2020. P. 13-20. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_2
29. Robot Navigation System in Stochastic Environment Based on Reinforcement Learning on Lidar Data / D. Dudarenko, A. Kovalev, I. Tolstoy, I. Vatamaniuk // *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020. P. 537-547. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_44
30. Денисов А.В. Алгоритмы организации беспроводного информационного взаимодействия сенсорных систем и роботизированных устройств // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 9(244). С. 30-34. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-9-244-30-34>
31. Ронжин А.Л., Тьен Н.К., Винь Н.В. Задачи управления обменом физических ресурсов между сельскохозяйственной техникой разной степени роботизации // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2020. № 1. С. 40-51. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-1-39-51>.
32. Ковалев А.Д. Подход к реконфигурации модульной робототехнической системы с использованием полиномиального алгоритма субоптимального поиска // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 9(244). С. 48-51. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-9-244-48-51>
33. Pavliuk N., Saveliev A., Cherskikh E., Pykhov D. Formation of Modular Structures with Mobile Autonomous Reconfigurable System // *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2019. P. 383-395. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_31

References

1. Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of mathematics*, 1957, no. 79(3), pp. 497-516. <https://doi.org/10.2307/2372560>
2. Pérez J., Godoy J., Villagrà J., Onieva E. Trajectory generator for autonomous vehicles in urban environments. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2013, pp. 409-414. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630608>
3. Gerlach A.R., Kingston D., Walker B.K. UAV navigation using predictive vector field control. *2014 American Control Conference*, IEEE, 2014, pp. 4907-4912. <https://doi.org/10.1109/ACC.2014.6859082>
4. Lin Y., Saripalli S. Path planning using 3D dubins curve for unmanned aerial vehicles. *2014 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*. IEEE, 2014, pp. 296-304. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842268>
5. Choi J., Curry R., Elkaim G. Path planning based on bézier curve for autonomous ground vehicles. *Advances in Electrical and Electronics Engineering-IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008*. IEEE, 2008, pp. 158-166. <https://doi.org/10.1109/WCECS.2008.27>
6. Rastelli J.P., Lattarulo R., Nashashibi F. Dynamic trajectory generation using continuous-curvature algorithms for door to door assistance vehicles. *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*. IEEE, 2014, pp. 510-515. <https://doi.org/10.1109/IVS.2014.6856526>
7. Walton D.J., Meek D.S., Ali J.M. Planar G2 transition curves composed of cubic Bézier spiral segments. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2003, no. 157(2), pp. 453-476. [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(03\)00435-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(03)00435-7)
8. Montes N., Mora M.C., Tornero J. Trajectory generation based on rational bezier curves as clothoids. *2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2007, pp. 505-510. <https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290165>
9. Montés N., Herraiz A., Armesto L., Tornero J. Real-time clothoid approximation by Rational Bezier curves. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2008, pp. 2246-2251. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543548>
10. Han L., Yashiro H., Nejad, H.T.N., Do Q.H., Mita S. Bezier curve based path planning for autonomous vehicle in urban environment. *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2010, pp. 1036-1042. <https://doi.org/10.1109/IVS.2010.5548085>
11. González D., Perez J., Lattarulo R., Milanés V., Nashashibi F. Continuous curvature planning with obstacle avoidance capabilities in urban scenarios. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2014, pp. 1430-1435. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2014.6957887>

12. Elbanhawi M., Simic M., Jazar R.N. Continuous path smoothing for car-like robots using B-spline curves. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, no. 80(1), pp. 23-56. <https://doi.org/10.1007/s10846-014-0172-0>
13. Elbanhawi M., Simic M., Jazar R. Randomized bidirectional B-Spline parameterization motion planning. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2015, no. 17(2), pp. 406-419. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2477355>
14. Komoriya K., Tanie K. Trajectory design and control of a wheel-type mobile robot using B-spline curve. *Proceedings. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems'. (IROS'89)'The Autonomous Mobile Robots and Its Applications* IEEE, 1989, pp. 398-405. <https://doi.org/10.1109/IROS.1989.637937>
15. Berglund T., Brodnik A., Jonsson H., Staffanson M., Soderkvist I. Planning smooth and obstacle-avoiding B-spline paths for autonomous mining vehicles. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, no. 7(1), pp. 167-172. <https://doi.org/10.1109/TASE.2009.2015886>
16. Yang K., Sukkarieh S. An analytical continuous-curvature path-smoothing algorithm. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, no. 26(3), pp. 561-568. <https://doi.org/10.1109/TRO.2010.2042990>
17. Herrmann P., Gerngroß M., Endisch C. NURBS based trajectory generation for an industrial five axis needle winding robot. *2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. IEEE, 2018, pp. 31-36. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2018.8384640>
18. Ravari A.N., Taghirad H.D. NURBS-based representation of urban environments for mobile robots. *2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*. IEEE, 2016, pp. 20-25. <https://doi.org/10.1109/ICRoM.2016.7886782>
19. Shi X., Fang H., Guo L. Multi-objective optimal trajectory planning of manipulators based on quintic NURBS. *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2016, pp. 759-765. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558658>
20. Belaidi H., Hentout A., Bouzouia B., Bentarzi H., Belaidi A. NURBs trajectory generation and following by an autonomous mobile robot navigating in 3D environment. *The 4th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent*. IEEE, 2014, pp. 168-173. <https://doi.org/10.1109/CYBER.2014.6917455>
21. Guo H., Meng Y., Jin Y. Swarm robot pattern formation using a morphogenetic multi-cellular based self-organizing algorithm. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2011, pp. 3205-3210. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979821>
22. Huh U.Y., Chang S.R. AG 2 continuous path-smoothing algorithm using modified quadratic polynomial interpolation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, no. 11(2), 25 p. <https://doi.org/10.5772/57340>

23. Chang S.R., Huh U.Y. A collision-free G² continuous path-smoothing algorithm using quadratic polynomial interpolation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, no. 11(12), 194 p. <https://doi.org/10.5772/59463>
24. Lawonn K., Gasteiger R., Rössl C., Preim B. Adaptive and robust curve smoothing on surface meshes. *Computers & graphics*, 2014, no. 40(22-35). <https://doi.org/10.1016/j.cag.2014.01.004>
25. Zhang H., Yang S. Smooth path and velocity planning under 3D path constraints for car-like vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, no. 107, pp. 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.05.013>
26. Hameiri E., Shimshoni I. Estimating the principal curvatures and the Darboux frame from real 3-D range data. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2003, no.33(4), pp. 626-637. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.814304>
27. Zakharov K., Saveliev A., Sivchenko O. Energy-Efficient Path Planning Algorithm on Three-Dimensional Large-Scale Terrain Maps for Mobile Robots. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham, 2020, pp. 319-330. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_31
28. Aksamentov E., Astapova M., Usina E. Approach to Obstacle Localization for Robot Navigation in Agricultural Territories. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Springer, Cham, 2020, pp. 13-20. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_2
29. Dudarenko D., Kovalev A., Tolstoy I., Vatamaniuk I. Robot Navigation System in Stochastic Environment Based on Reinforcement Learning on Lidar Data. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore, 2020, pp. 537-547. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_
30. Denisov A.V. Algoritmy organizatsii besprovodnogo informatsionnogo vzaimodeistviya sensornykh sistem i robotizirovannykh ustroystv [Development of a recommender system for parameter calculation in wireless network of sensor devices]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Volgograd State Technical University*, 2019, no. 7(4), pp. 30-34 (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.27.4.025>
31. Ronzhin A.L., Ngo K.T., Nguyen V.V. Zadachi upravleniya obmenom fizicheskikh resursov mezhdu sel'skokhozyaistvennoi tekhnikai raznoi stepeni robotizatsii [Tasks of controlling the exchange of physical resources between agricultural means with varying degrees of robotization]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2020, no. 1, pp. 40-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2020-1-39-51>
32. Kovalev A.D. Podkhod k rekonfiguratsii modul'noi robototekhnicheskoi sistemy s ispol'zovaniem polinomial'nogo algoritma suboptimal'nogo poiska [Approach to reconfiguration of a modular robot system with a suboptimal search polynomial algorithm]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Volgograd*

State Technical University. 2020, no. 9(244), pp. 48-51 (In Russ.). <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-9-244-48-51>

33. Pavliuk N., Saveliev A., Cherskikh E., Pykhov D. Formation of Modular Structures with Mobile Autonomous Reconfigurable System. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, Singapore. 2019, pp. 383-395. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_31

Информация об авторах / Information about the Authors

Захаров Константин Станиславович, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: kon7666007@yandex.ru

Konstantin S. Zakharov, Junior Researcher of Autonomous Robotic Systems Laboratory, St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: kon7666007@yandex.ru

Савельев Антон Игоревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией автономных робототехнических систем, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: saveliev.ais@yandex.ru

Anton I. Saveliev, Cand. of Sci. (Engineering, Senior Researcher, Head of the Autonomous Robotic Systems Laboratory, St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: saveliev.ais@yandex.ru

Анализ результатов применения метода пчелиной колонии в задаче раскраски графов общего вида

А. О. Пшеничных¹, Э. И. Ватутин¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: evatutin@rambler.ru

Резюме

Цель исследования. Обнаружен большой спектр задач, которые важны на практике и которые могут быть сведены за полиномиальное время к задачам дискретной комбинаторной оптимизации, многие из которых допускают решение с применением теории графов. Одна из таких задач – отыскание хроматического числа графа и соответствующей ему раскраски. Учитывая факт того, что комбинаторная задача отыскания хроматического числа графа относится к классу сложности NP и не допускает получения оптимального решения за рациональное время для задач практически важной размерности, то поиск подходящего эвристического метода, позволяющего получать решения высокого качества с низкими затратами, необходимыми для вычисления, является востребованным и актуальным. Целью проведённого исследования является анализ результатов использования метода пчелиной колонии в поставленной задаче. Задачами описываемой работы являются: описание алгоритмических приёмов в формализованной форме, которые дают возможность применить метод пчелиной колонии в решаемой задаче, внесение модификаций в метод пчелиной колонии, повышающих эффективность применения метода, а именно качество получаемых итоговых раскрасок, а также определение факторов, влияющих на качество и временные затраты при нахождении решений.

Методы. Для проведения исследования в выбранной области были организованы вычислительные эксперименты, базирующиеся на применении эвристических методов в рассматриваемой задаче. Была проведена метаоптимизация настроечных параметров методов и определение их скорости сходимости, а также выполнено сравнение качества и времени получения решений.

Результаты. В результате проведённого исследования была выявлена скорость сходимости метода большая, чем у метода случайных блужданий, обнаружена зависимость качества получаемых итоговых раскрасок от размера графа N и плотности d . Было установлено, что выбранный метод является более быстрым относительно метода взвешенного случайного перебора с вариацией вершин по минимуму допустимых цветов на $\approx 67\%$, который на текущий момент формирует решения с самым низким хроматическим числом, при этом проигрывая ему в качестве на $\approx 7\%$. Замечена более высокая скорость сходимости при сравнении с методом случайных блужданий, принцип работы которого совпадает с пчёлами-фуражирами.

Заключение. Обнаружено, что метод пчелиной колонии находит раскраски с аналогичным усреднённым хроматическим числом за меньшее число итераций, чем метод случайных блужданий, т.е. обладает более высокой скоростью сходимости, при этом оставаясь значительно быстрее относительно метода случайного перебора с вариацией вершин по уменьшению допустимых цветов.

Ключевые слова: комбинаторная оптимизация; хроматическое число графа; эвристические биоинспирированные методы; теория графов; метод пчелиной колонии; метод случайного перебора; метод случайных блужданий.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Пшеничных А. О., Ватулин Э. И. Анализ результатов применения метода пчелиной колонии в задаче раскраски графов общего вида // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 126-145. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-126-145>.

Поступила в редакцию 11.08.2020

Подписана в печать 26.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Analysis of the Results of Applying the Bee Colony Method in the Problem of Coloring General Graphs

Aleksandr O. Pshenichnykh ¹, Eduard I. Vatutin ¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: evatutin@rambler.ru

Abstract

Purpose of research. We have discovered a wide range of problems that are important in practice and which can be reduced in polynomial time to discrete combinatorial optimization problems, many of which can be solved using graph theory. One of these tasks is finding the chromatic number of a graph and its corresponding coloring. Taking into account the fact that the combinatorial problem of finding the chromatic number of a graph belongs to the complexity class and does not allow obtaining an optimal solution in a rational time for problems of practically important dimension, the search for a suitable heuristic method that allows obtaining high-quality solutions with low costs required for computation is demanded and relevant. The aim of the study is to analyze the results of using the bee colony method in the task at hand. The tasks of this research are: description of algorithmic techniques in a formalized form, which make it possible to apply the bee colony method in the problem to be solved, making modifications to the bee colony method that increase the efficiency of the method, namely the quality of the resulting final colorings, as well as the determination of factors affecting the quality and the time spent in finding solutions.

Methods. To conduct research in the selected area, computational experiments were organized based on the use of heuristic methods in the problem under consideration. Meta-optimization of the tuning parameters of the methods and determination of their convergence rate was carried out, as well as a comparison of the quality and time of obtaining solutions.

Results. As a result of the study, the convergence rate of the method was found to be higher than that of the random walk method; the dependence of the quality of the resulting final colorings on the graph size N and density d was found. It was found that the chosen method is faster than the method of weighted random enumeration with the variation of vertices according to the minimum of admissible colors on $\approx 67\%$, which currently generates solutions with the lowest chromatic number, while losing quality to it on $\approx 7\%$. A higher rate of convergence was noticed when compared with the method of random walks, the principle of which is the same as that of foraging bees.

Conclusion. It was found that the bee colony method finds colorings with the same average chromatic number in fewer iterations than the random walk method, i.e. it has a higher convergence rate, while remaining significantly fast relative to the method of random search with a variation of vertices to reduce the allowed colors.

Keywords: combinatorial optimization; chromatic number of a graph; heuristic bioinspired methods; graph theory; bee colony method; random search method; random walks method.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Pshenichnykh A. O., Vatutin E. I. Analysis of the Results of Applying the Bee Colony Method in the Problem of Coloring General Graphs. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 126-145 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-126-145>.

Received 11.08.2020

Accepted 26.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

Имеется немалый объём задач практической важности, для которых допустима полиномиальная сводимость к задачам теории графов. Представителем такой задачи является отыскание хроматического числа графа $G = \langle A, V \rangle$. Выбранная задача может применяться при разбиении графов [1, с. 65], составлении расписаний, компиляции программ [2, с. 47], решении задач на базе латинских квадратов [3, с. 252], в области компьютерных сетей [4, с. 162], компоновки блоков ЭВА [5, с. 6], сотовых сетях [6, с. 22], сетях беспроводного абонентского доступа [7, с. 3], назначении переменных для регистров [8, с. 41] и пр. Многие задачи дискретной комбинаторной оптимизации возможно свести к решению данной [9, с. 391]. Поиск раскраски графа общего вида относится к классу сложности NP [10, с. 232], что не даёт возможности получения точного решения за рациональное время для задач практически важной размерности [11, с. 60]. Поэтому определение необходимого эвристического метода, с помощью которого будет допу-

стимо отыскание решений хорошего качества при малых временных затратах, является важной и актуальной задачей.

При решении задачи раскраски неориентированного графа $G = \langle A, V \rangle$ необходимо выявить минимально возможное количество цветов, достаточных для получения корректной раскраски, где $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ – множество вершин; $N = |A|$ – число вершин; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\} \subseteq A \times A$ – множество рёбер; $M = |V|$ – число рёбер. Возможны случаи, когда граф не будет полносвязным. Такая ситуация соответствует отсутствию связей между некоторыми парами вершин, при этом к графу можно применить числовую характеристику, выраженную значением «плотности»

$$d(G) = \frac{M}{N(N-1)} \quad (\text{данная характеристика при решении задач дискретной комбинаторной оптимизации важна в связи с тем, что качество работы эвристических методов зависит от области в некотором многомерном пространстве, одной из координат которого в задачах}$$

на графах является плотность $d(G)$. Требуется отыскать такой набор цветов раскраски $X = \{x(a_1), x(a_2), \dots, x(a_N)\}$ для каждой вершины графа a_i , $x(a_i) \in C$, из конечного множества цветов $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{\chi^*}\}$, чтобы $\chi^* = |C| \rightarrow \min$, причём смежные вершины графа не могут быть окрашены в одинаковые цвета: $\forall v_i = (a_{i_1}, a_{i_2}): x(a_{i_1}) \neq x(a_{i_2})$. При успешном отыскании оптимальной раскраски $\chi^*(G) = \chi(G)$, где $\chi(G)$ – хроматическое число графа G , а в случае нахождения суб- или квазиоптимальной раскраски – $\chi^*(G) \geq \chi(G)$. При программной реализации вышеуказанного метода требуется определить минимально возможную мощность множества цветов $|C|$, в которые могут быть окрашены вершины заданного графа без нарушения условий правильности раскраски, в этом случае такие цвета будем называть «допустимыми» (в случае несоблюдения условий поставленной задачи – «недопустимыми»). Для того, чтобы проверить эффективность метода избирается некая выборка из K графов $\Lambda = \{G_1, G_2, \dots, G_K\}$, после чего будет оценено усреднённое качество решения $\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^K Q(G_i)}{K}$, где $Q(G_i)$ – качество i -го решения и равное $\chi(G_i)$, обычно оно больше оптимума $\bar{Q} > Q^*$.

При решении задачи отыскания хроматического числа графа авторами работы были испробованы методы жадного перебора, случайного перебора, взвешенного случайного перебора, метод муравьиной колонии, а также отдельная группа методов, основанных на модификациях изначально найденного решения: метод случайных блужданий и имитации отжига. Вследствие чего для сравнительного анализа с другими методами был отобран метод пчелиной колонии, который также осуществляет модификации над имеющимися в памяти улья решениями.

Материалы и методы

Метод пчелиной колонии предложил Д. Карабога (D. Karaboga) [12, с. 1] в 2005 г. (по другим данным, Д. Фам (D. Pham) с соавторами [13, с. 1]), однако его основная идея во многом напоминает мультистарт-алгоритмы [14, с. 229], известные с середины XX века. Данный метод, как и метод муравьиной колонии, относится к классу биоинспирированных методов [15, с. 81].

В основу данного метода положен опыт наблюдения за поведением колонии медоносных пчёл, занимающихся в природе разведкой пространства, окружающего улей, на предмет поиска нектара с целью сбора его в дальнейшем. В природе пчелы в улье имеют чёткое разделение ролей: рабочие пчелы (фуражиры) занимаются сбором нектара, пчелы-разведчики (скауты) –

поиском наиболее перспективных областей с нектаром, трутни и матка задействованы в процессе размножения, часть пчёл занимается охраной улья и поддержанием его определённой температуры. При решении оптимизационных задач обычно используют только два типа пчёл: разведчиков и фуражиров, остальные в контексте рассматриваемых задач пока не находят применения.

Между указанными типами пчёл в улье поддерживается определённое соотношение (например, шесть рабочих пчёл на одного разведчика), оптимальное значение которого, по-видимому, было найдено в ходе эволюции, что обеспечивает организацию эффективной работы улья в целом.

Приведённые выше социальные роли агентов могут быть использованы при решении задач дискретной оптимизации [16, с. 183]. Роль разведчика будет заключаться в проведении разведки пространства допустимых решений $\mathfrak{R}$, с выбором одной из его точек $X_i \in \mathfrak{R}$, в которой целевая функция имеет некоторое значение $f(X_i)$. Данный выбор в простейшем случае может быть реализован с использованием метода случайного перебора. Учитывая факт невозможности хранения информации о всех путях в электронном аналоге улья, сохраняется информация только о H лучших местах $S = \{X_1, X_2, \dots, X_w\} \subseteq \mathfrak{R}$, которые характеризуются наиболее вы-

годными значениями целевой функции $f(X_1) \leq f(X_2) \leq \dots \leq f(X_w)$ (что в достаточной степени аналогично с ограничением на объём популяции при использовании генетического подхода, однако в данном случае величина H скорее характеризует информационную ёмкость «памяти» улья, нежели непосредственное количество пчёл в улье). Рабочая пчела в качестве направления движения выбирает одно из значений $X_i \in S$, $i = \overline{1, H}$, при этом в ходе своей работы она осуществляет разведку «вокруг» начальной точки X_i . Для этого необходимо каким-либо образом модифицировать начальное решение X_i , для чего можно использовать модифицирующие операции (в данном случае: выбрать случайную i -ю вершину, покрасить её в недопустимый j -й цвет, для всех соседних вершин присвоить допустимые цвета с целью получения корректной раскраски), применение каждой из которых приводит к однократному элементарному изменению решения $X_i \rightarrow X'_i$, а минимальное число подобных операций $d(X_i, X_j)$, необходимое для превращения X_i в X_j , можно рассматривать в качестве некоторой метрики, специфичной для выбранной задачи и являющейся аналогом широко известных расстояний Хэмминга [17, с. 147] или Левенштейна [18, с. 845]. Число R модифицирующих операций, последовательно применяемых к решению X_i с це-

лью получения решения X_j , не превышает значения метрики $d(X_i, X_j)$ и может характеризоваться как радиус для окрестности разведки. Результатом проделанной работы пчелы-фуражира является получение решения X_j и соответствующая ему оценка значения целевой функции $f(X_j)$.

Если хотя бы одно решение $X_k \in S$, $k = \overline{1, H}$ среди найденных ранее H решений уступает по качеству вновь найденному, предыдущее решение заменяется на новое при их неизменном общем количестве в электронной модели улья: $S^{(t)} = S^{(t-1)} \setminus \{X_k\} \cup \{X_j\}$, где t – номер итерации. Комбинируя работу разведчиков и рабочих пчёл в течение $C_{\max}$ итераций, следует ожидать монотонного увеличения качества решений в составе отобранного подмножества S . Выбор наилучшего среди них можно считать результатом работы метода.

Эффективность применения приведённого метода на практике зависит от ряда настроечных параметров, значения которых должны быть определены в ходе метаоптимизации. В рассматриваемой задаче значения настроечных параметров существенно отличаются в зависимости от обрабатываемых графов. Данная особенность метода пчелиной колонии является в достаточной степени неудобной и не позволяет выработать единые рекомендации по компромиссным значениям настроечных пара-

метров, которые были бы неплохими для всех условий применения методов, в отличие от ряда других итерационных эвристических методов. Данная закономерность прослеживается и в другой задаче дискретной комбинаторной оптимизации, рассмотренной в работе [19, с. 52].

Метод пчелиной колонии, как и методы имитации отжига и случайных блужданий, является двухстадийным, т.к. он использует случайный перебор в виде стратегии для разведчиков (первая стадия) и производит случайную разведку вблизи перспективных направлений (вторая стадия). Однако для задания начального решения можно применять и другие методы в рамках т.н. гибридизации методов [16, с. 280].

Рассматриваемый метод является усложнённым вариантом метода случайных блужданий, т.к. для обоих методов требуется найти некоторое начальное решение (для метода пчелиной колонии в текущей реализации – множество решений в ходе полётов пчёл-разведчиков), принцип работы модифицированного метода случайных блужданий, применяемый для решения намеченной задачи, приведён ниже.

1. Задать начальное решение $C_0(G)$: все вершины имеют разный цвет, либо применяется решение, полученное с помощью другого метода. Задать относительное количество модификаций R на одном шаге, вероятность α назначения первого или случайного недопустимого цвета выбранной вершине, ве-

роятность β назначения первого или случайного допустимого цвета всем смежным с выбранной вершинам в ходе выполнения модифицирующей операции.

2. Произвести $L = \lfloor R \cdot N + 1 \rfloor$ модификаций $o(\cdot)$ (в данном случае: выбрать случайную i -ю вершину, покрасить её в недопустимый j -й цвет, для всех соседних вершин присвоить допустимые цвета с целью получения корректной раскраски) с получением L решений: $C_i(G) = o(C_{i-1}(G))$. Оценить качество всех полученных решений, запомнить наилучшее.

3. Повторять п. 2 для начального решения $C_0(G)$ из п. 1 до тех пор, пока не будет сформировано $C_{\max}$ решений, и выбрать лучшее из них.

От классического метода случайных блужданий предложенный вариант реализации отличается тем, что производит $\left\lfloor \frac{C_{\max}}{L} \right\rfloor$ построений цепочек решений, отталкиваясь от начальной раскраски $C_0(G)$ в соответствии с одним из вариантов реализации мултистарта стратегии поиска решения. В случае необходимости получения «классического» поведения метода необходимо установить $R = 0$.

Принцип работы метода пчелиной колонии схематично представлен ниже.

1. Задать размер памяти улья H , соотношение числа рабочих пчёл к чис-

лу разведчиков N_w , относительное количество модификаций R на одном шаге, вероятность α назначения случайного или первого недопустимого цвета выбранной вершине, вероятность β назначения случайного или первого допустимого цвета всем смежным с выбранной вершинам.

2. Произвести $C_{\max} / (N_w + 1)$ вылетов разведчиков (нахождений решений, в данном случае с помощью метода случайного перебора с перебором вершин по минимуму допустимых цветов за 1 итерацию, наилучший порядок рассмотрения вершин взят в соответствии с результатами из работы [20, с. 101]).

3. Отобрать H лучших из них.

4. Для каждого из N_w рабочих выбрать из памяти улья лучшее решение для вылета; произвести $L = \lfloor R \cdot N + 1 \rfloor$ модификаций $o(\cdot)$ (в данном случае: выбрать случайную i -ю вершину, покрасить её в недопустимый j -й цвет, для всех соседних вершин присвоить допустимые цвета) с получением L решений: $C_i(G) = o(C_{i-1}(G))$. Лучшее решение из всех модификаций пчелы-рабочего заменяет худшее в памяти улья.

5. Повторить п.4, пока не будет проанализировано $C_{\max}$ раскрасок, и выбрать лучшее решение.

От классического метода пчелиной колонии предложенный вариант реализации отличается тем, что пчел-фуражир производит L построений це-

почек решений, отталкиваясь от начальной выбранной из памяти улья раскраски $C_k(G)$ в соответствии с одним из вариантов реализации мултистарт-стратегии поиска решения. В случае необходимости получения «классического» поведения метода необходимо установить $R = 0$.

В модифицированном методе пчелиной колонии присутствуют 5 настроечных параметров: H – размер памяти улья (означает объём выборки решений, найденных разведчиками); N_w – множитель рабочих пчёл (во сколько раз их больше, чем разведчиков); R – относительное количество вносимых изменений (означает, сколько необходимо произвести модифицирующих операций над графом в зависимости от его размера); α – вероятность того, что цвет для выбранной вершины будет выбран случайно или взят минимально недопустимый; β – вероятность того, что цвет для смежных вершин с выбранной будет выбран случайно или взят минимально допустимый.

Поскольку данный метод за 1 итерацию формирует не одно, а $L \cdot N_w$ решений, то было добавлено принудительное завершение работы при получении свыше $C_{\max}$ решений.

В ходе проверки было выявлено, что с увеличением количества итераций на несколько порядков, пропорционально увеличивалось и оптимальное

значение памяти улья. Вследствие этого решено было изменить его с конкретного числового значения на параметр W в диапазоне $[0; 1]$, который зависит от числа формируемых решений, т.е. количество вылетов пчёл-разведчиков будет равно $C_{\max} / (N_w + 1)$, после этого будет отобрано $H = \frac{C_{\max}}{N_w + 1} \cdot W$ лучших раскрасок и записано в память улья.

Результаты и их обсуждение

Из-за наличия настроечных параметров метода перед его использованием и для получения лучшего качества необходимо произвести метаоптимизацию. Соответствующие вычислительные эксперименты проводилась для $|\Lambda| = 500$ случайных графов для выборки $\Lambda = \{G_1, G_2, K, G_K\}$ графов с псевдослучайной структурой, размером $N = 40$ вершин и плотностью $d(G) = 0,777$, время на графиках показано в секундах.

Влияние параметра W , который определяет число полётов разведчиков по отношению к количеству вылетов рабочих пчёл (при значении $W = 0$ – будет ровно 1 вылет разведчика, остальные – рабочих пчёл; при значении 1 – будут только вылеты разведчиков; при значении $W = 0,5$ будет равенство числа полётов пчёл-рабочих и пчёл-разведчиков; в остальных случаях при значениях параметра в диапазоне $(0;1)$ будет пропорциональная зависи-

мость количества вылетов скаутов и фуражиров от данного параметра), на качество решения показано на графиках

ниже (рис. 2 – рис. 3), остальные параметры метода равны: $C_{\max} = 1000$; $N_w = 3$; $R = 1,5$; $\alpha = 0,4$; $\beta = 0,9$.

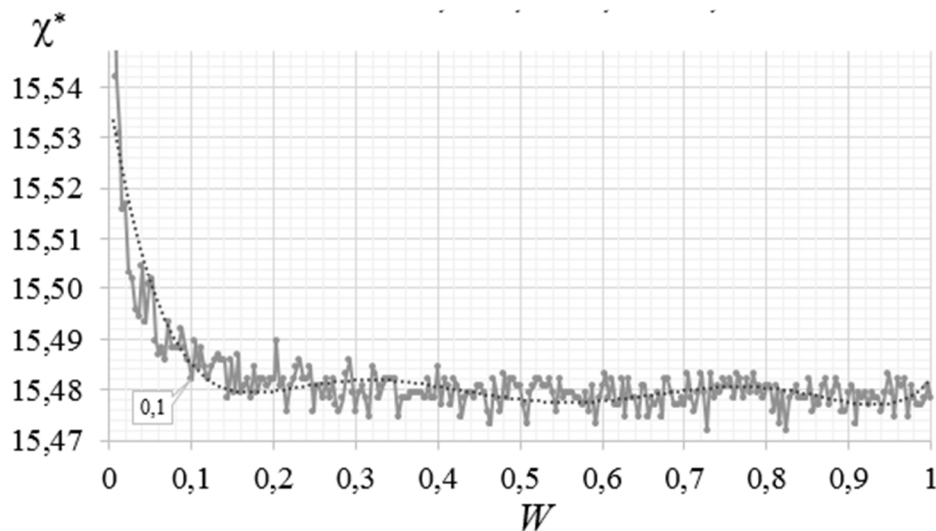


Рис. 1. Зависимость усреднённого хроматического числа χ^* от размера памяти улья W

Fig. 1. Dependence of the averaged chromatic number χ^* on the memory size of the bee hive W

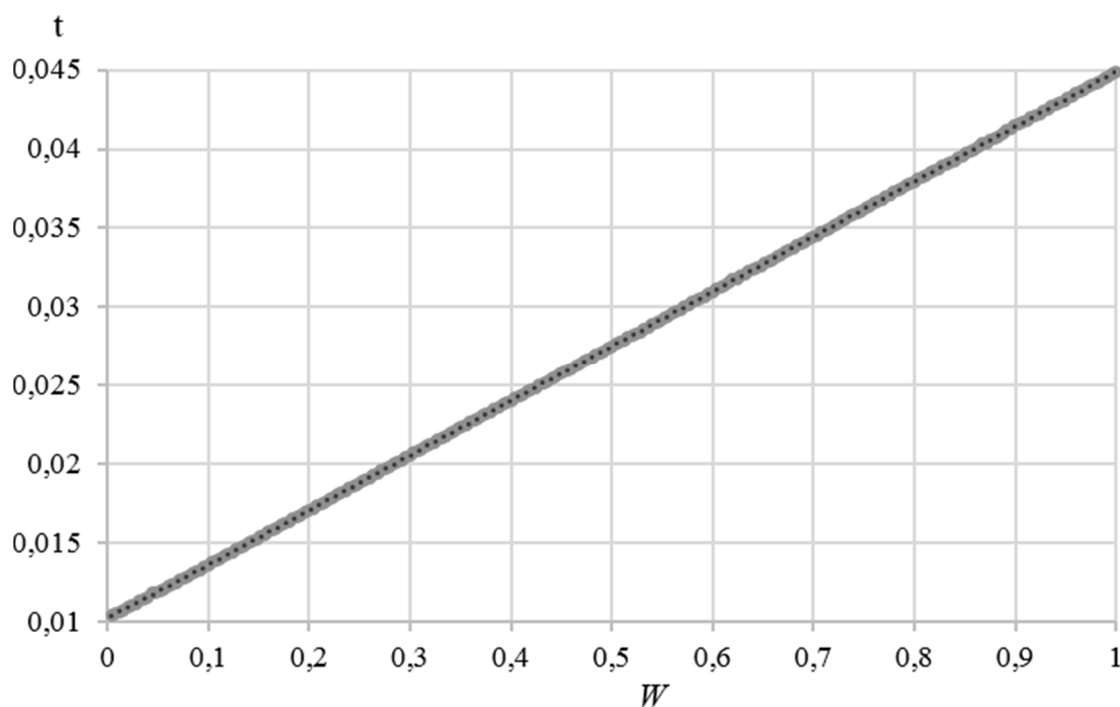


Рис. 2. Зависимость времени нахождения решения от размера памяти улья W

Fig. 2. Dependence of the time of finding the solution on the memory size of the bee hive W

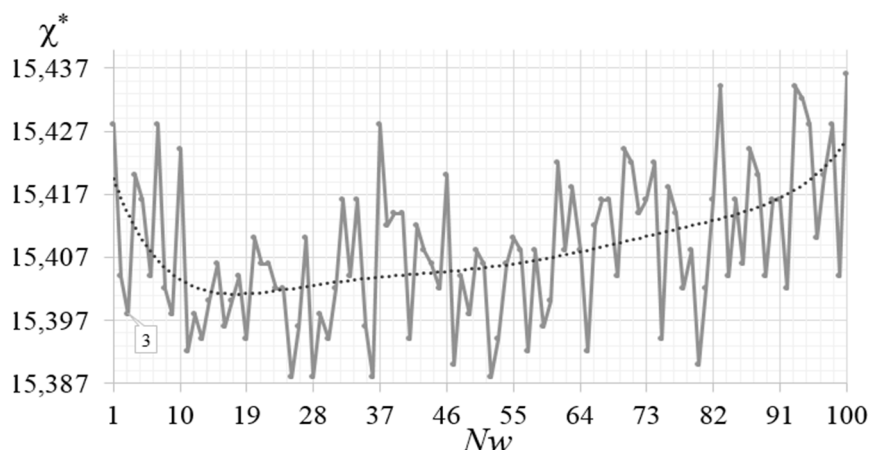


Рис. 3. Зависимость усреднённого хроматического числа χ^* от множителя количества рабочих пчёл N_w

Fig. 3. Dependence of the averaged chromatic number χ^* on the multiplier of the number of worker bees N_w

С увеличением значения параметра время решения повышается, что объясняется большей вариативностью выбора вылетов рабочих, вследствие чего было принято значение $W^* = 0,1$ из-за баланса между качеством получаемых решений и времени их нахождения. При

этом время имеет линейную зависимость от размера памяти улья.

Влияние параметра N_w на качество решения показано на графиках ниже (рис. 4 – рис. 5), остальные параметры метода равны: $C_{\max} = 1000$; $W = 0,1$; $R = 1,5$; $\alpha = 0,4$; $\beta = 0,9$.

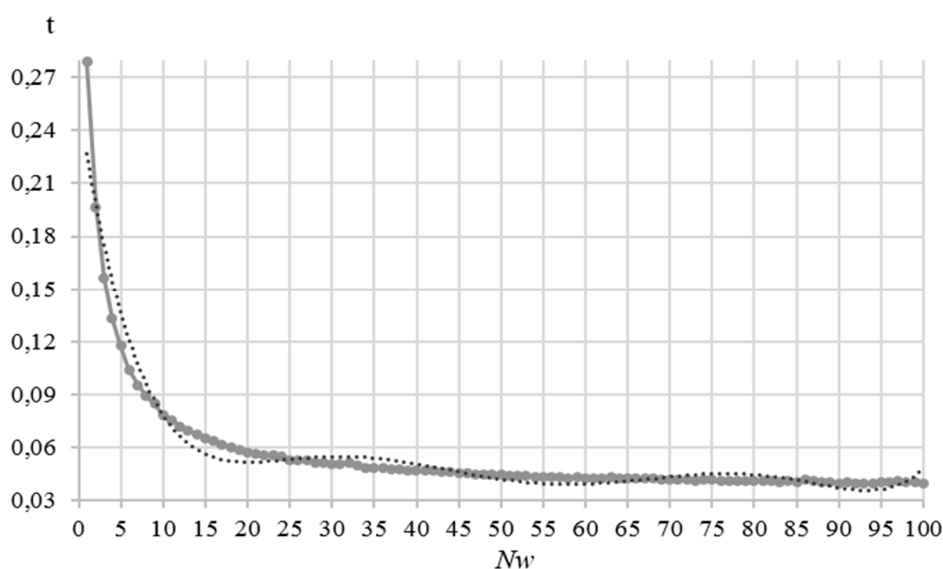


Рис. 4. Зависимость времени нахождения решения от множителя количества рабочих пчёл N_w

Fig. 4. Dependence of the time of finding the solution on the multiplier of the number of worker bees N_w

При малых значениях параметра наблюдается улучшение качества решения, что объясняется следующим образом: при большом количестве рабочих пчёл и малом числе разведчиков многим рабочим приходится «работать» в одних и тех же или близких областях пространства решений или вовсе «простаивать» (зависит от количества модификаций R), превращая метод в боль-

шей степени похожий на случайные блуждания, вследствие чего за оптимальное значение параметра было принято $N_w^* = 3$.

Влияние параметра R на качество решения показано на графиках ниже (рис. 6 – рис. 7), остальные параметры метода равны: $C_{\max} = 1000$; $W = 0,1$; $N_w = 3$; $\alpha = 0,4$; $\beta = 0,9$.

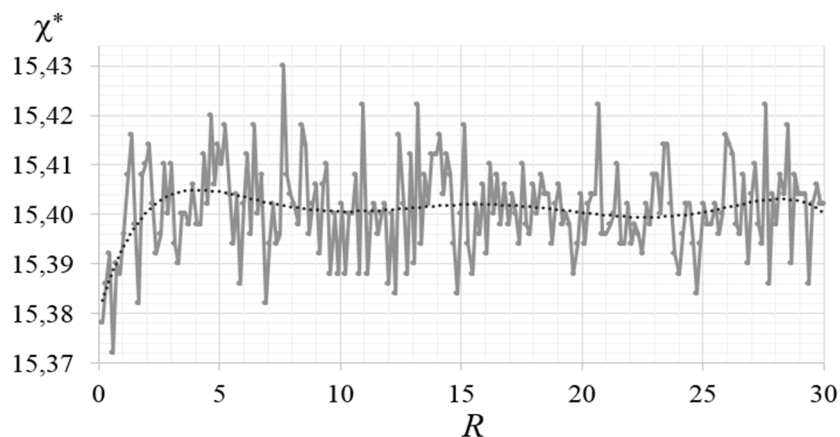


Рис. 5. Зависимость усреднённого хроматического числа χ^* от количества модификаций решения R

Fig. 5. Dependence of the averaged chromatic number χ^* on the number of solution modifications R

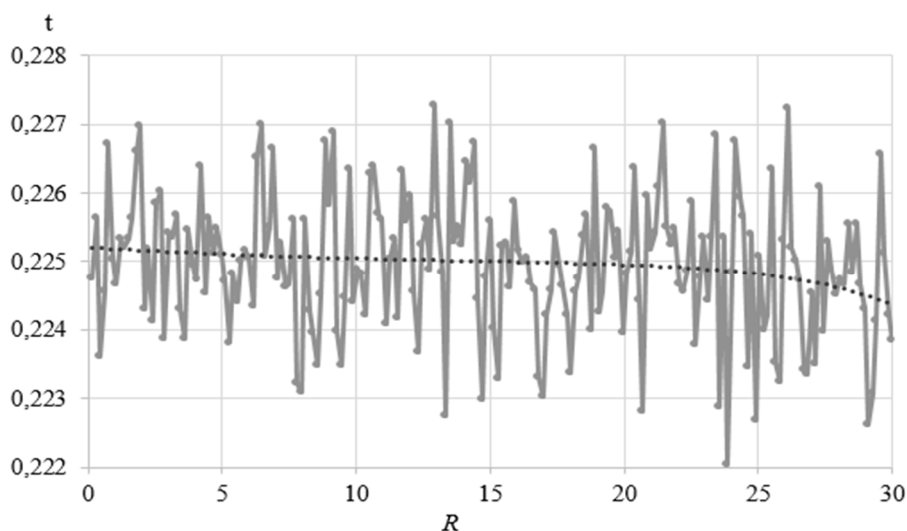


Рис. 6. Зависимость времени нахождения решения от количества модификаций решения R

Fig. 6. Dependence of the time of finding the solution on the number of solution modifications R

Статистически значимая зависимость качества решений от значения данного параметра отсутствует, за оптимальное было принято $R^* = 0,1$ из-за баланса вылетов рабочих пчёл и числа вносимых изменений 1 пчелой-фуражиром. Выбранное значение означает, что каждый рабочий будет производить $0,1 \cdot N = 0,1 \cdot 40 = 4$ модификаций решения, найденного разведчиком, т.н. радиус разведки. Ввиду того, что количество итераций (формируемых решений) ограничено значением $C_{\max} = 1000$, а количество вылетов разведчиков равно $\frac{C_{\max}}{N_w + 1} = \frac{1000}{3 + 1} = 250$, то в данной ситуации отработают все разведчики и 188 рабочих пчёл (причём будут выполнены

не все 4 модификации над 188-м решением пчёл-фуражиров, а только 2).

Влияние параметра α на качество решения показано на графиках ниже (рис. 8 – рис. 9), остальные параметры метода равны: $C_{\max} = 1000$; $W = 0,1$; $N_w = 3$; $R = 0,1$; $\beta = 0,9$.

Статистически значимое влияние данного параметра на качество формируемых решений практически не прослеживается и находится в пределах погрешности, за оптимальное было принято $\alpha^* = 1,0$, при котором время отыскания решений будет минимальным.

Влияние параметра β на качество решения показано на графиках ниже (рис. 10 – рис. 11), остальные параметры метода равны: $C_{\max} = 1000$; $W = 0,1$; $N_w = 3$; $R = 0,1$; $\beta = 1,0$.

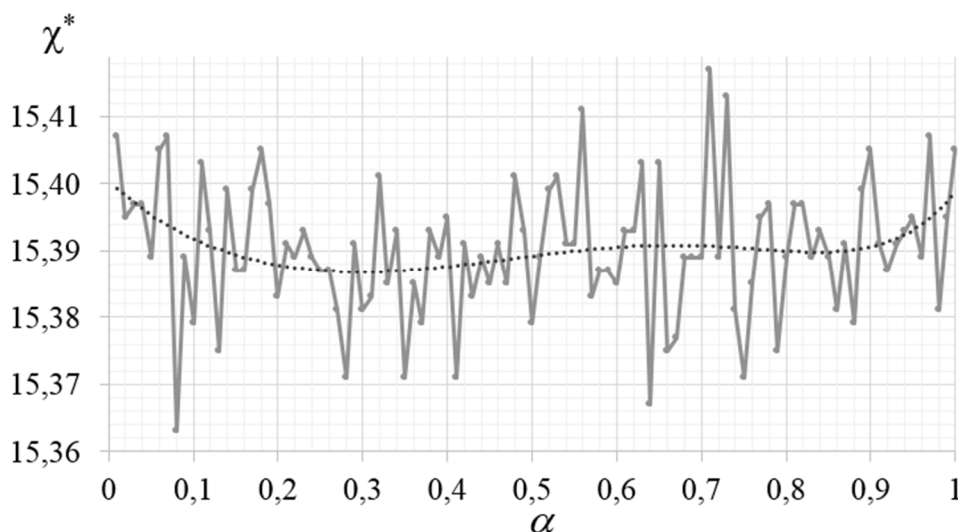


Рис. 7. Зависимость усреднённого хроматического числа χ^* от вероятности выбора случайного или минимально недопустимого цвета для выбранной вершины α

Fig. 7. Dependence of the averaged chromatic number χ^* on the probability of choosing a random or minimally invalid color for the selected vertex α

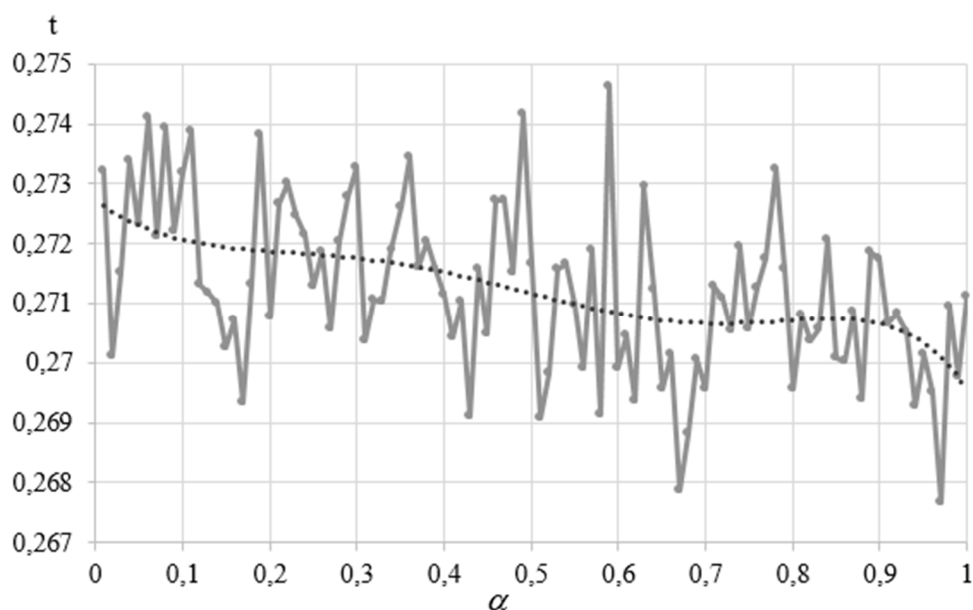


Рис. 8. Зависимость времени нахождения решения от вероятности выбора случайного или минимально недопустимого цвета для выбранной вершины α

Fig. 8. Dependence of the time of finding the solution on the probability of choosing a random or minimally invalid color for the selected vertex α

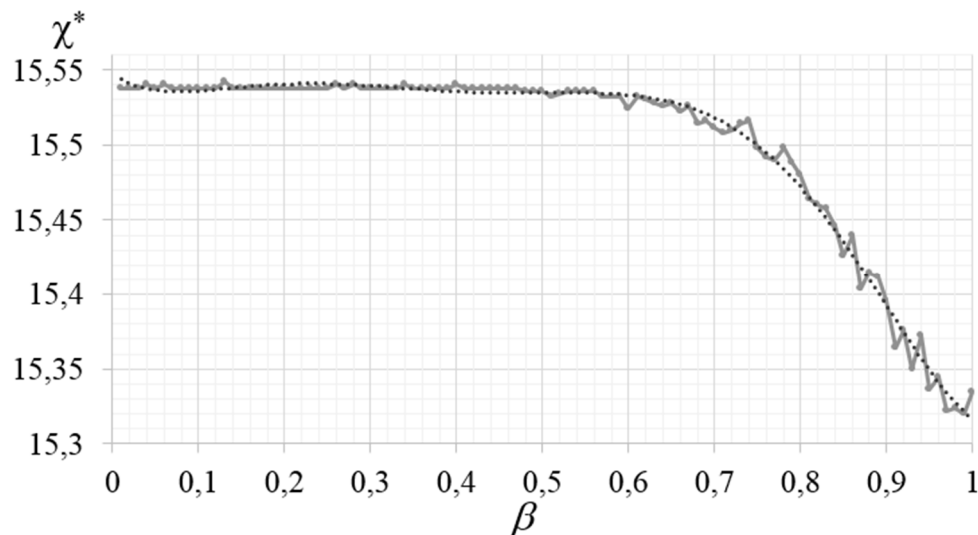


Рис. 9. Зависимость усреднённого хроматического числа χ^* от вероятности выбора случайного или минимально допустимого цвета для всех смежных с выбранной вершин β

Fig. 9. Dependence of the averaged chromatic number χ^* on the probability of choosing a random or minimum acceptable color for all vertices adjacent to the selected vertex β

При приближении значения параметра к 1 происходит уменьшение затрачиваемого вычислительного време-

ни и усреднённого хроматического числа, поэтому за оптимальное было принято $\beta^* = 1,0$.

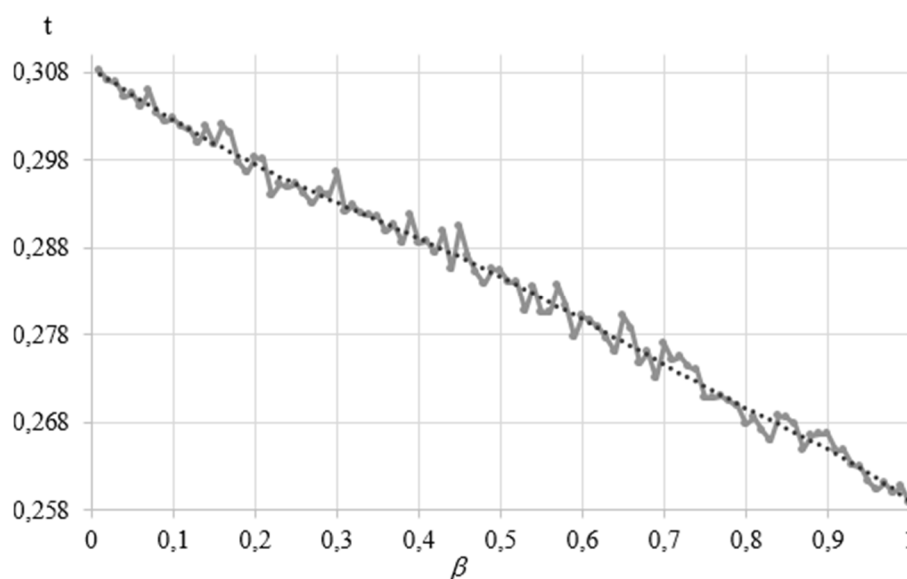


Рис. 10. Зависимость времени нахождения решения от вероятности выбора случайного или минимально допустимого цвета для всех смежных с выбранной вершин β

Fig. 10. Dependence of the time of finding the solution on the probability of choosing a random or minimum acceptable color for all vertices adjacent to the selected vertex β

Чтобы проверить скорость сходимости метода был проведён вычислительный эксперимент, его результаты показаны на рис. 12, среднее время решения при этом составило $\bar{t} = 0,29$ се-

кунд, настроечные параметры метода, используемые в экспериментах, по результатам метаоптимизации равны: $W = 0,1$; $N_w = 3$; $R = 0,1$; $\alpha = 1,0$; $\beta = 1,0$.

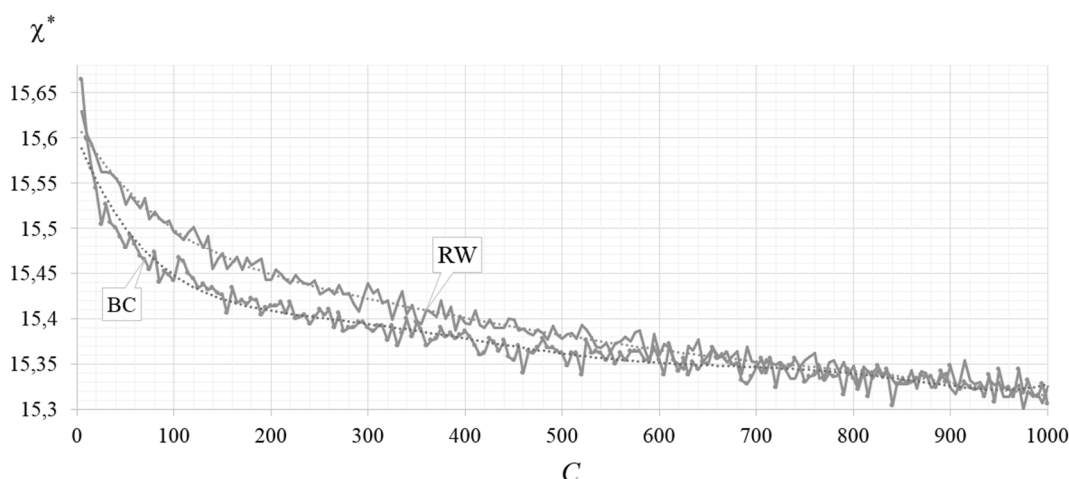


Рис. 11. Зависимость усреднённого хроматического числа χ^* от количества итераций (формируемых решений)

Fig. 11. Dependence of the averaged chromatic number χ^* on the number of iterations (generated solutions)

Скорость сходимости метода пчелиной колонии по сравнению с методом случайного перебора увеличилась, что позволяет затрачивать меньшее количество итераций для получения приемлемого качества решения.

Для более наглядного представления о сравнении исследованных эвристических методов при решении задачи определения хроматического числа графа полученные в ходе вычислительных экспериментов данные о качестве и

времени формирования решения представлены в табл. 1.

Из результатов, приведённых в табл. 1, можно сделать вывод, что метод пчелиной колонии по сравнению с методом случайных блужданий обеспечивает получение решений сопоставимого качества, при этом обладая более высокой скоростью сходимости и требуя меньших временных затрат для получения решений аналогичного качества.

Таблица 1. Результаты работы различных опробованных эвристических методов с усреднённым хроматическим числом и временем решения

Table 1. The results of various tested heuristic methods with averaged chromatic number and solution time

Метод / Method	Усреднённое хроматическое число / Averaged chromatic number	Время поиска решения, с / Time to find a solution, s
Жадный перебор (перебор вершин по минимуму цветов)	14,26	0,42
Случайный перебор (перебор вершин по минимуму цветов)	14,26	0,81
Взвешенный случайный перебор (перебор вершин по минимуму цветов)	14,1	1,07
Муравьиной колонии (перебор вершин по минимуму цветов)	14,21	0,88
Случайных блужданий	15,33	0,03
Имитации отжига	15,46	0,028
Пчелиной колонии	15,3	0,29

Однако исследованная группа методов, основывающихся на изменении текущего решения (случайные блуждания, имитация отжига, пчелиная колония), проигрывают по качеству группе

методов с последовательным формированием решения (жадный, случайный и взвешенный случайный переборы, муравьиная колония), в то же время являясь более быстрой.

Выводы

В результате проделанных вычислительных экспериментов было выявлено, что метод пчелиной колонии в задаче раскраски графа не является настолько эффективным, как эвристические методы с последовательным формированием решения: случайный перебор, взвешенный случайный перебор и метод муравьиной колонии. Обнаружено, что введенные настроечные параметры вероятности α выбора случайного или минимально недопустимого цвета выбранной вершины, а также вероятности β выбора случайного или минимально допустимого цвета для

всех смежных с выбранной вершин не оказывают существенного влияния на качество формируемых решений, однако увеличивают вычислительные затраты для их получения, поэтому выгоднее использовать жадный подход для выбора цвета вершины при модификации начального решения, чем случайный. Следует отметить, что метод пчелиной колонии обладает более высокой скоростью сходимости, чем метод случайных блужданий, при этом они сравнимы как по времени нахождения решений, так и по качеству, вследствие чего можно затрачивать меньшее число итераций для получения аналогичного качества.

Список литературы

1. Закревский А.Д., Поттосин Ю.В. Декомпозиция параллельных алгоритмов логического управления по заданному разбиению множества предложений // А и ВТ. 1985. № 4. С. 65-72.
2. Register allocation via coloring / Gregory J. Chaitin, Mark A. Auslander, Ashok K. Chandra, John Cocke, Martin E. Hopkins, Peter W. Markstein // Computer Languages. 1981. P. 47-57. [https://doi.org/10.1016/0096-0551\(81\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0096-0551(81)90048-5).
3. Keedwell A.D., Dénes J. Latin Squares and their Applications // Elsevier. 2015. 438 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03412-0>.
4. Филоненко И.Н., Чеботарев М.В. Алгоритм раскраски графа и его применение в области компьютерных сетей // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы. Коломна, 2018. С. 162-168. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35587418>.
5. Курейчик В.В., Заруба Д.В., Запорожец Д.Ю. Биоинспирированный алгоритм компоновки блоков ЭВА на основе модифицированной раскраски графа // Известия Южного федерального университета. 2015. № 4 (165). С. 6-14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23693391>.
6. Применение алгоритма последовательной раскраски графа в сотовой сети / Д.Э. Мурзаков, М.А. Зенков, А.Д. Жуков, В.В. Тишин // Естественные и математиче-

ские науки в современном мире. 2015. № 31. С. 22-32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23570102>.

7. Решение задачи раскраски взвешенного графа для мягкого распределения ресурса пропускной способности в сетях беспроводного абонентского доступа / В.И. Калюка, С.А. Остапенко, В.Г. Кобак, В.В. Зубакин, И.В. Морозов // Известия высших учебных заведений. Северокавказский регион. Технические науки. 2015. № 4 (185). С. 3-8. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-3-8>.

8. Макошенко Д.В. Назначение переменных на регистры с помощью древовидного параметрического алгоритма раскраски графа // Информационные технологии. 2010. № 6. С. 41-46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14998776>.

9. Colbourn C.J., Dinitz J.H. Handbook of Combinatorial Designs, Second Edition // Chapman & Hall/CRC. 2006. 1016 p. <http://en.bookfi.net/book/643841>.

10. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир. 1982. 416 с. URL: <https://b-ok.cc/book/437794/d9ea2f>.

11. Duffy K., O'Connell N., Sapozhnikov A. Complexity analysis of a decentralised graph colouring algorithm // Information Processing Letters. 2008. Vol. 107. Iss. 2. P. 60-63. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2008.01.002>.

12. Karaboga D.D. An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization // Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005. URL: https://abc.erciyes.edu.tr/pub/tr06_2005.pdf.

13. The Bees Algorithm / D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi // Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University. UK. 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-008045157-2/50081-X>.

14. Ватугин Э.И., Титов В.С., Емельянов С.Г. Основы дискретной комбинаторной оптимизации. М.: Аргамак-Медиа, 2016. 270 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25770934>.

15. Yang X.S. Nature-inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press. 2010. P. 81-95. URL: https://www.academia.edu/457296/Nature-inspired_metaheuristic_algorithms.

16. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25070137>.

17. Hamming R.W. Error detecting and error correcting codes // Bell System Technical Journal. 1950. Vol. 29. P. 147-160. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>.

18. Левенштейн В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Доклады академий наук СССР. 1965. Т. 163. Вып. 4. С. 845-848. URL: <http://mi.mathnet.ru/dan31411>.

19. Ватугин Э.И., Титов В.С. Особенности метаоптимизации алгоритма пчелиной колонии в задаче поиска кратчайшего пути в графе при наличии ограничений на плот-

ность графа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (19). С. 52-65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26396211>.

20. Пшеничных О., Гвоздева С.Н., Ватутин Э.И. О влиянии порядка рассмотрения вершин при поиске раскрасок графов общего вида с использованием жадного алгоритма // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2019. Т. 3. № 1. С. 101-106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39242603>.

References

1. Zakrevsky A.D., Pottosin Yu.V. Dekompozitsiya parallel'nykh algoritmov logicheskogo upravleniya po zadannomu razbieniye mnozhestva predlozhenii [Decomposition of parallel logic control algorithms by a given partition of the set of sentences]. *A i VT = A and VT*, 1985, no. 4, pp. 65-72 (In Russ.).

2. Chaitin Gregory J., Auslander Mark A., Chandra Ashok K., Cocke John, Hopkins Martin E., Peter W. Markstein. Register allocation via coloring. *Computer Languages*, 1981, pp. 47-57. [https://doi.org/10.1016/0096-0551\(81\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0096-0551(81)90048-5).

3. Keedwell A.D., Dénes J. Latin Squares and their Applications. *Elsevier*, 2015, 438 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03412-0>.

4. Filonenko I.N., Chebotarev M.V. [Graph coloring algorithm and its application in the field of computer networks]. *Tekhnika i tekhnologii, politika i ehkonomika: problemy i perspektivy* [Engineering and technology, politics and economics: problems and prospects]. Kolumna, 2018, pp. 162-68 (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35587418>.

5. Kureychik V.V., Zaruba D.V., Zaporozhets D.Yu. Bioinspirirovannyi algoritm komponovki blokov EVA na osnove modifitsirovannoi raskraski grafa [Bioinspired layout algorithm for EVA blocks based on modified graph coloring]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta = Proceedings of the Southern Federal University*, 2015, no. 4 (165), pp. 6-14 (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23693391>.

6. Murzakov D.E., Zenkov M.A., Zhukov A.D., Tishin V.V. Primenenie algoritma posledovatel'noi raskraski grafa v sotovoi seti [Application of a sequential graph coloring algorithm in a cellular network]. *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire = Natural and Mathematical Sciences in the Modern World*, 2015, no. 31, pp. 22-32 (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23570102>.

7. Kalyuka V.I., Ostapenko S.A., Kobak V.G., Zubakin V.V., Morozov I.V. Reshenie zadachi raskraski vzveshennogo grafa dlya myagkogo raspredeleniya resursa propusknoi sposobnosti v setyakh besprovodnogo abonentskogo dostupa [Solving the problem of coloring a weighted graph for soft distribution of the bandwidth resource in wireless subscriber access networks]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severokavkazskii region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasian*

Region. Technical Science, 2015, no. 4 (185), pp. 3-8 (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-3-8>.

8. Makoshenko D.V. Naznachenie peremennykh na registry s pomoshch'yu drevovidnogo parametriceskogo algoritma raskraski grafa [Assigning Variables to Registers Using a Tree-like Parametric Graph Coloring Algorithm]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technology*, 2010, no. 6, pp. 41-46 (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14998776>.

9. Colbourn C.J., Dinitz J.H. Handbook of Combinatorial Designs, Second Edition. *Chapman & Hall/CRC*, 2006, 1016 p. <http://en.bookfi.net/book/643841>.

10. Garey M., Johnson D. *Vychislitelnyye mashiny i trudnoreshayemye zadachi* [Computers and Intractability]. Moscow, 1982. 416 p. (In Russ.). <https://b-ok.cc/book/437794/d9ea2f>.

11. Duffy, K., O'Connell, N., Sapozhnikov, A. Complexity analysis of a decentralised graph colouring algorithm. *Information Processing Letters*, July 2008, vol. 107, is. 2, pp. 60-63. <https://doi.org/10.1016/j.ipl.2008.01.002>.

12. Karaboga D.D. An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005. https://abc.erciyes.edu.tr/pub/tr06_2005.pdf.

13. Pham D.T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M. The Bees Algorithm. Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-008045157-2/50081-X>.

14. Vatutin E.I., Titov V.S., Yemel'yanov S.G. *Osnovy diskretnoi kombinatornoi optimizatsii* [Basics of discrete combinatorial optimization]. Moscow, Argamak-Media Publ., 2016, 270 p. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25770934>.

15. Yang X.S. Nature-inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press, 2010, pp. 81-95. https://www.academia.edu/457296/Nature-inspired_metaheuristic_algorithms.

16. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoj* [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow, MGTU them. N.E. Bauman Publ., 2014. 446 p. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25070137>.

17. Hamming R.W. Error detecting and error correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, pp. 147-160. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x>.

18. Levenshteyn V.I. Dvoichnye kody s ispravleniem vypadenii, vstavok i zameshchenii simbolov [Binary Codes for Correcting Dropouts, Inserts, and Symbol Substitutions]. *Doklady akademii nauk SSSR = Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1965, vol. 163, no. 4, pp. 845-848 (In Russ.). <http://mi.mathnet.ru/dan31411>.

19. Vatutin. E.I., Titov V.S. Osobennosti metaoptimizatsii algoritma pchelinoi kolonii v zadache poiska kratchaishego puti v grafe pri nalichii ogranichenii na plotnost' grafa [Features of meta-optimization of the bee colony algorithm in the task of finding the shortest path in a graph in the presence of restrictions on the graph density]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University, 2016, no. 2 (19), pp. 52-65 (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26396211>.

20. Pshenichnykh A.O., Gvozdeva S.N., Vatutin E.I. O vliyaniy poryadka rassmotreniya verшин pri poiske raskrasok grafov obshchego vida s ispol'zovaniem zhadnogo algoritma [On the influence of the order of consideration of vertices in the search for colorings of graphs of a general form using a greedy algorithm]. *Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii = High Performance Computing Systems and Technologies*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 101-106 (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39242603>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Пшеничных Александр Олегович, магистрант кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: alex220697@mail.ru, ORCID: <http://0000-0003-4057-8862>

Pshenichnykh O. Aleksandr, Master Student of Computing Techniques Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: alex220697@mail.ru, ORCID: <http://0000-0003-4057-8862>

Ватутин Эдуард Игоревич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evatutin@rambler.ru, ORCID: <http://0000-0002-7362-7387>, Researcher ID: C-9412-2017

Vatutin I. Eduard, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Computing Techniques Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evatutin@rambler.ru, ORCID: <http://0000-0002-7362-7387>, Researcher ID: C-9412-2017

Формализация этапов жизненного цикла создания геоинформационной продукции на научно-производственном предприятии

Е.М. Зайцев¹, Е.А. Коломиец² ✉, В. Н. Николаев²

¹ АО НПФ «ИнфоСистем-35»
ул. 3-я Мытищенская, 16, стр. 37, г. Москва 129626, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: lenus07@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является формализация процессов создания геоинформационной продукции (ГИП), в рамках ее жизненного цикла (ЖЦ), с учетом разнородных видов ресурсов ГИС научно-производственного предприятия (НПП). В качестве объекта исследования выбрана типовая подсистема инфраструктуры АИС предприятия.

Методы. В статье на основе анализа научных источников и стандартов показано, что при создании ГИП требуются изменения традиционных подходов, принципов, моделей и методов как самих процессов создания ГИП, так и управления инфраструктурой и ресурсами НПП. Представлена в табличном виде модель, описывающая жизненный цикл создания ГИП с учетом перечня требуемых ресурсов и обеспечений. Выявлены особенности ЖЦ ГИП, базирующиеся на процессах геоинформационных технологий. Рассмотрен общий подход в формализации этапов, описывающих процессы обработки ГПИ и функционирования типовых элементов ГИС предприятия. На основе системных представлений и теоретико-множественного подхода разработана модель процесса автоматизированной обработки (ПАО) ГПИ, представленная декартовым произведением векторов. Выделены роль и особенности информационного обеспечения в создании ГИП.

Результаты. Проведенный анализ особенностей создания и функционирования ГИП, а также разработанное структурно-графическое и табличное представление позволили выявить взаимосвязь особенностей ГИП и содержания этапов их ЖЦ. Полученные результаты позволят четче позиционировать представляемые к разработке и эксплуатации элементы и компоненты ГИП, прежде всего в ГИС НПП, предоставят возможность адекватнее определить требования к системам данного класса.

Заключение. Представленные модели ЖЦ ГИП, учитывающие выявленные особенности их построения и функционирования, позволят, в дальнейшем, ставить и решать задачи моделирования и управления системами данного класса.

Ключевые слова: геопространственная информация; геоинформационная продукция; геоинформационная система; жизненный цикл; научно-производственное предприятие; процесс автоматизированной обработки; ресурсы; обеспечения; управление.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Зайцев Е.М., Коломиец Е.А., Николаев В. Н. Формализация этапов жизненного цикла создания геоинформационной продукции на научно-производственном предприятии // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 146-165. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>.

Поступила в редакцию 21.10.2020

Подписана в печать 02.11.2020

Опубликована 30.12.2020

Formalization of Life Cycle Stages of Geographic Information Products Creation at Research and Production Enterprises

Evgeniy M. Zaitsev ¹, Elena A. Kolomiets ² ✉, Viktor N. Nikolaev ²

¹ JSC NPF INFOSYSTEM-35

3rd Mytishchenskaya str. 16, building 37, Moscow 129626, Russian Federation

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: lenus07@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this article is to formalize the processes of creating geographic information products (GIP), within its life cycle (LC), taking into account heterogeneous types of GIS resources of a research - production enterprise (RPE). A typical subsystem of AIS infrastructure of an enterprise is an object of this study.

Methods. On the basis of an analysis of scientific sources and standards it was shown that changes in traditional approaches, principles, models are necessary in the creation of GIP. It is also necessary to change infrastructure and resources management of NPP. Presented in tabular form model is describing GIP life cycle taking into account the list of required resources and provisions. Features of LC GIP based on geoinformation technologies processes have been identified. The general approach in formalization of stages describing processes of GIP processing and operation of typical elements of GIS enterprise is described. A model of automated processing process (APP) of GIP is developed on the basis of system representations and theoretical-multiple approach. It is represented by the Cartesian product of vectors. The role and features of information support in the development of GIP are highlighted.

Results. The analysis of GIP functioning features, as well as developed structural graphic and tabular presentation, made it possible to identify links between GIP features and stages content of their LCs. The results will allow clearer positioning of GIP elements and components presented for development and operation, especially in GIS NPP. The results will provide an opportunity to define the requirements for systems of this class adequately.

Conclusion. The presented LC GIP models, taking into account the identified features of their construction and functioning, will allow, in the future, setting and solving modeling and management system tasks of this class.

Keywords: geospatial information; geoinformation products; geoinformation system; life cycle; research and production enterprise; automated processing process; resources; providing; management.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zaitsev E. M., Kolomiets E. A., Nikolaev V. N. Formalization of Life Cycle Stages of Geographic Information Products Creation at Research and Production Enterprises. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 146-165 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-146-165>.

Received 21.10.2020

Accepted 02.11.2020

Published 30.12.2020

Введение

В настоящее время, существенное развитие получили системы аэрокосмического мониторинга (АКМ) и дистанционного зондирования Земли, что обеспечивает повышение эффективности в ряде секторов народного хозяйства РФ. Использование результатов космической деятельности на основе применения геоинформационных технологий (ГИТ) и геоинформационных систем (ГИС) показывает их высокую эффективность при решении оборонных и народно-хозяйственных задач, а также проблем в области науки, экономики и промышленности [1].

В результате использования постоянно растущего потока геопространственной информации (ГПИ) и данных дистанционного зондирования (ДДЗ), получаемых от средств АКМ, широкого использования перечисленных инновационных технологий появилась возможность создания новой разновидности высокотехнологичных наукоемких товаров – геоинформационной продукции (ГИП) [2, 3, 4].

Это привело к необходимости изменения условий развития информационных и ГИТ, автоматизации процессов, протекающих во внутренней и внешней среде прежде всего научно-производственных предприятий (НПП), специализирующихся на создании ГИП.

Выполненные исследования показали, что при создании ГИП требуются изменения традиционных подходов, принципов, моделей и методов как самих процессов создания ГИП, так и управле-

ния инфраструктурой и ресурсами НПП [5, 6]. Создание и эффективное применение ГИП непосредственно связано с использованием в инфраструктуре НПП инновационных ГИС и ГИТ [7].

Материалы и методы

1. Особенности и модель жизненного цикла (ЖЦ) ГИП

Важным аспектом функционирования систем на основе геоинформационных технологий является анализ процессов и построения моделей комплексной, тематической обработки ГПИ и данных на всех фазах ее ЖЦ [8].

Под ЖЦ ГИП будем понимать непрерывный процесс, который начинается с момента принятия решения о необходимости создания ГИП или ее основных компонент и заканчивается в момент ее прекращения эксплуатации [8].

Особенности и табличная модель ЖЦ ГИП. Важным аспектом функционирования систем на основе геоинформационных технологий является анализ процессов и построения моделей комплексной, тематической обработки ГПИ и данных на всех фазах ее ЖЦ [9].

Существует ряд исследований в области ЖЦ больших информационных систем. Основным нормативным документом, регламентирующим ЖЦ программно-информационных компонент и сред, является международный стандарт ISO/IEC 12207¹. Он определяет

¹ ГОСТ Р 15288 ISO/IEC Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ, 2006. 73 с.

структуру ЖЦ больших систем, содержащую процессы, действия и задачи, которые должны быть выполнены во время создания информационных систем и их составляющих компонент.

Данный стандарт описывает структуру ЖЦ программного и информационного обеспечений, заказа, поставки, разработки, работы и поддержки программного обеспечения. Дополнительно описывается структура управления, контроля и совершенствования действий, участвующих в этом процессе.

Разработка и эксплуатация ГИП, в виде массивов ГПИ и геопространственных информационных моделей

(ГИМ), представляет собой одновременно процессы функционирования автоматизированных систем обработки, являются этапами жизненного цикла прохождения информации и входят в состав процедур ЖЦ работы с использованием ГИС и ГИТ (табл.1).

При этом сами массивы ГПИ, с одной стороны, представляют собой один из видов ресурсов автоматизированной системы – геопространственного информационного обеспечения (ГПИО), а с другой стороны, являются выходными наукоемкими информационными продуктами.

Таблица 1. Содержание процедур ЖЦ ГИП в составе АИС НПП

Table 1. Content of GIP LC procedures as part of the NPP AIS

Название этапа (фазы) / Name of the stage (phase)	Содержание этапа (процедуры) / Content of the stage (procedure)
Формирование облика ГПИ (как информационного продукта)	1. Анализ исходных компонент видовой и сопутствующей информации. 2. Анализ требований к составу и параметрам ГПИ. 3. Анализ имеющихся ГИТ и ресурсов. 4. Формирование требований к модели ГПИ – как НТП. 5. Планирование применения ресурсов ГИП. 6. Разработка технического задания
Создание (тематическая обработка ГПИ) ГИП	1. Предварительная обработка исходных снимков (фрагментов) аэрокосмической видовой и сопутствующей информации. 2. Векторизация фрагментов базовых и специальных слоев, привязка атрибутивной информации в БД. 3. Площадная, послойная и генеральная интеграция (сшивка) тематических слоев в массив ГПИ, ГИМ. 4. Разработка и интеграция в массив ГПИ специального программного обеспечения (СПО): управления ГПИ, визуализации, актуализации, сопряжения и конвертации, защиты и т.д. 5. Тестирование, верификация и формирование выходного массива. 6. Разработка эксплуатационной документации на массив ГПИ

Название этапа (фазы) / Name of the stage (phase)	Содержание этапа (процедуры) / Content of the stage (procedure)
Внедрение	1.Формирование комплекта (массива) ГПИ под объект и условия обработки. 2.Доставка и инсталляция массива ГПИ на АРМ целевого применения, настройка параметров под объект и задачи обработки. 3.Испытания массива ГПИ в условиях конкретного предприятия. 4.Обучение и тренировки персонала работе с ГПИ
Эксплуатация	1.Использование массива ГПИ, в составе ГИП, с целью: получения новой информации; выполнения расчетно-аналитических задач; обеспечения мероприятий; обучения и тренировки сотрудников. 2.Получение геопространственных данных с целью актуализации параметров объекта и условий обработки ГПИ
Модернизация (актуализация) ГИП	1. Корректировка базовой ГПИ. 2. Актуализация тематических слоев. 3. Разработка и интеграция в массив ГПИ СПО
Утилизация	1.Оценка морального и технологического уровня массива ГИП. 2.Физическое уничтожение ГИП с соблюдением требований безопасности и закрытости. 3. Экстренное уничтожение массива ГИП

В соответствии со стандартом ISO/IEC 12207 структура ЖЦ ГИП может быть представлена тремя группами процессов:

- основные процессы ЖЦ ГИП (формирование требований и облика, разработка, эксплуатация, сопровождение);

- вспомогательные процессы (документирование, управление составом и характеристиками ГИП, обеспечение качества, аттестация и сертификация выходного информационного продукта, решение текущих технологических проблем);

- организационные процессы (управление ресурсами ГИП и информационными проектами, создание инфра-

структуры проекта, улучшение технико-экономических показателей самой ГИП, обучение персонала).

Управление составом и характеристиками или конфигурацией ГИС и ГИТ и основными ресурсами позволяет организовать, систематически учитывать и контролировать внесение изменений в информационные массивы на всех стадиях их ЖЦ, при этом обеспечивать требуемое качество применения ГИП, это прежде всего верификация, тестирование выходного массива ГПИ [10].

Управление ресурсами корпоративной автоматизированной информационной системы (АИС) при создании ГИП осуществляется через планирова-

ние и организацию работ, создание квалифицированных коллективов разработчиков, контроль за сроками и качеством выполняемых работ [11, 12].

Техническое, программно-технологическое, организационное и интеллектуальное обеспечение информационного проекта включает выбор методов и инструментальных средств для реализации информационных проектов, определение методов формализации процессов функционирования, разработку методов и средств испытаний ГИП, обучение персонала и т.п.

Модель ЖЦ ГИП – структура, определяющая последовательность выполнения и взаимосвязи процессов, действий и задач, выполняемых на протяжении ЖЦ ГПИ, как конечного продукта функционирования АИС НПП [13, 14].

Технологические процессы, в рамках данных технологий, обеспечивают разработку и производство ГИП и имеют ряд особенностей, отличающих их от традиционных информационных технологий, это [1,3]:

- высокая наукоемкость и стоимость используемых ГИТ;

- использование в технологических процессах значительного числа патентов, изобретений, моделей, лицензий, процессов «ноу-хау» и т.д.;

- большинство процессов анализа, обработки, управления информацией выполняется в звене «человек – информационные ресурсы» и обладает значительной долей неопределенности и новизны;

- большая часть разрабатываемой и изготавливаемой ГИП выполняется в виде электронных массивов ГПИ, геопространственных информационных моделей (ГИМ), геопространственного информационного обеспечения (ГПИО) и т.д., которые используются в перспективных автоматизированных системах, решающих новые задачи.

Таким образом, инновационная ГИС формирует качественно новый вид товара – ГИП, сочетающие свойства геопространственных и экономических данных [4, 15].

Основная функция инновационной АИС, на основе ГИС и ГИТ, предприятия – это обработка разнородной информации, привязывание ее к геопространственным данным и формирование ГИП.

2. Формализация процессов создания ГИП

Анализ тенденций изменения требований к основным параметрам исходной ГПИ и процессам разработки элементов и ресурсов ГИП как новой разновидности ГПИО, выполненный выше, показывает актуальность и необходимость проведения исследований в области анализа процессов обработки ГПИ. Совокупность процессов обработки ГПИ на каждой фазе ее ЖЦ ГИП в целом и представляет собой процесс функционирования ГИС предприятия.

Одним из основных направлений решения проблемы повышения эффективности процессов обработки ГПИ является комплексное моделирование про-

цессов разработки, проектирования, изготовления и испытания системы автоматизированных комплексов в составе АИС НПП, реализующей «сквозное» прохождение информации в рамках ЖЦ ГПИ [3, 4, 16, 17]. При решении этой проблемы возникают задачи, связанные с разработкой методов анализа и синтеза систем такого класса.

Рассмотрим общий подход в формализации этапов, описывающих процессы обработки ГПИ и функционирования типовых элементов АИС. При этом целью разработки моделей и их исследование является формализация на их основе общей задачи рационального построения подсистем и ресурсов АИС НПП, суть которой заключается в установлении функциональных взаимосвязей между показателями эффективности средств автоматизации, их характеристиками и параметрами внешней среды.

На основе системных представлений и теоретико-множественного подхода, в общем виде, модель процесса автоматизированной обработки (ПАО) ГПИ представим декартовым произведением [18]

$$\langle \text{ПАО} \rangle = \langle W_1 \times W_2 \times W_3 \times W_4 \rangle, \quad (1)$$

где W – векторы с индексами, соответствующими: 1 - исходной информации об объекте автоматизированной обработки и внешней среде; 2 – средствам процесса обработки; 3 – результатам обработки; 4 – управлению процессом обработки.

Каждый объект обработки, на соответствующей фазе ЖЦ ГПИ, в структурном смысле представляет собой электронный массив ГПИ и состоит из различного числа определенным образом связанных между собой геоинформационных слоев, моделей, данных. По отношению к АИС предприятия совокупность исходных видовых космических снимков, аэроматериалов, данных, требований к ГПИ и процессам ее обработки является внешней средой, вследствие чего вектор W_1 детально описывает ГПИ, поступающую с предыдущих источников информации, как

$$\langle W_1 \rangle = \langle W_{11} \times W_{12} \times W_{13} \rangle, \quad (2)$$

где W_{11} – тип и класс исходной (по отношению к этапу обработки) видовой и сопутствующей информации: ЦКМ, ЦМР, геокодированные подложки, массивы информации в БД и т.д.;

W_{12} – вектор параметров информационных массивов (ИМ): количество объектов, слоев, уровень сложности и т.д.;

W_{13} – временная характеристика потоков заявок ИМ.

Преобразование информационного массива (ИМ) осуществляется на основе четырех основных типов обеспечений АИС НПП [19]

$$\langle W_2 \rangle = \langle W_{21} \times W_{22} \times W_{23} \times W_{24} \rangle, \quad (3)$$

где W_{21} – программно-технологическое обеспечение (ПТО);

W_{22} – информационное обеспечение (ИО);

W_{23} – комплекс технических средств (КТС);

W_{24} – интеллектуальное обеспечение (ИНО).

Анализируя возможности и условия применения данных моделей ЖЦ, при построении ГИП следует иметь в виду, что системы такого класса целесообразно представлять в виде следующих обеспечений (ресурсов) [19] (табл. 2):

- технического обеспечения (ТО);
- программно-технологического обеспечения (ПТО);
- информационного обеспечения (ИО);
- интеллектуального обеспечения (ИНО).

Таблица 2. Перечень ресурсов ГИС НПП для создания ГИП

Table 2. List of GIS NPP resources for GIP creation

Название этапа (фазы) / Name of the stage (phase)	Необходимый вид ресурса и компонентов обеспечений для создания ГИП / Required type of resource and security components for creating a GIP			
	Программно-технологическое обеспечение (ПТО)- W_{21} / Software and technology support (STS)	Информационное обеспечение (ИО) - W_{22} / Information support (IS)	Комплекс технических средств (КТС) - W_{23} / Complex of technical means (CTM)	Интеллектуальное обеспечение (ИНО) - W_{24} / Intelligent software (IS)
Внешнее проектирование (на основе исходной ГПИ)	ПО предварительной и специальной обработки, обеспечивающее ПО, драйверы сенсоров и периферийных устройств	БИР, архивы ГПИ, исходные изображения, массивы и характеристики потоков исходной ГПИ и ДДЗ	Средства получения информации: Аппаратные средства обработки ГПИ на борту: Средства передачи и ретрансляции массивов исходных изображений	Математические модели, методы, «ноу-хау». Патенты и полезные программные модели
Формирование требований к облику ГИП	ПО тематической и специальной обработки, обеспечивающее ПО, файлы требований формирования ГИП	Различные БД, БИР, архивы ГПИ, исходные изображения, репозитории ГИМ, массивы ГПИ, массивы различных данных	Средства подготовки информации. Аппаратные средства предварительной обработки информации	Математические модели, методы, «ноу-хау». Базы знаний. Патенты и полезные программные модели
Создание (тематическая обработка ГПИ) ГИП	Операционные системы, ПО тематической и специальной обработки, ПО управления, обеспечивающее ПО, драйверы технологических автоматов, периферийных устройств	Различные БД, СУБД, БИР, архивы ГПИ, исходные изображения, репозитории ГИМ, массивы ГПИ, массивы различных данных	Средства подготовки информации. Аппаратные средства обработки информации. Средства реализации результатов обработки	Математические модели, методы, «ноу-хау». Средства, методы и методики обучения и тренировки персонала. Базы знаний. Патенты и полезные программные модели

Название этапа (фазы) / Name of the stage (phase)	Необходимый вид ресурса и компонентов обеспечений для создания ГИП / Required type of resource and security components for creating a GIP			
	Программно-технологическое обеспечение (ПТО)- W_{21} / Software and technology support (STS)	Информационное обеспечение (ИО) - W_{22} / Information support (IS)	Комплекс технических средств (КТС) - W_{23} / Complex of technical means (CTM)	Интеллектуальное обеспечение (ИНО) - W_{24} / Intelligent software (IS)
Внедрение, инсталляция ГИП	Операционные системы, ПО тематической и специальной обработки, ПО управления, обеспечивающее ПО, драйверы технологических автоматов, периферийных устройств	Различные БД, СУБД, БИР, архивы ГПИ, исходные изображения, репозитории ГИМ, массивы ГПИ, массивы различных данных	Средства подготовки информации. Аппаратные средства обработки информации. Средства реализации результатов обработки	Патенты и полезные программные модели
Эксплуатация	Операционные системы, ПО тематической и специальной обработки, ПО управления, обеспечивающее ПО, драйверы технологических автоматов, периферийных устройств	Различные БД, СУБД, БИР, архивы ГПИ, исходные изображения, репозитории ГИМ, массивы ГПИ, массивы различных данных	Средства подготовки информации. Аппаратные средства обработки информации. Средства реализации результатов обработки	Средства, методы и методики обучения и тренировки персонала. Базы геоданных
Модернизация (актуализация) ГИП	ПО предварительной и специальной обработки, обеспечивающее ПО, драйверы сенсоров и периферийных устройств	Различные БД, СУБД, БИР, архивы ГПИ, исходные изображения, репозитории ГИМ, массивы ГПИ, массивы различных данных	Средства подготовки информации. Аппаратные средства обработки информации. Средства реализации результатов обработки	Математические модели, методы, «ноу-хау». Базы знаний. Патенты и полезные программные модели
Утилизация	ПО управления устройств утилизации	Электронные массивы БД, СУБД, БИР, архивы ГПИ, исходных изображений, репозитории ГИМ, массивы ГПИ, массивы различных данных	Средства подготовки информации к утилизации. Механические и электронные средства уничтожения	Средства, методы уничтожения информации

Первые два вида обеспечения образуют программно-техническую вычислительную среду ГИП и представляют собой инструмент для решения широкого класса задач. Их создание хорошо описывается каскадной моделью, что методологически и практически закреп-

лено в документах, регламентирующих проведение НИОКР в области обработки и применения ГИП¹.

¹ ГОСТ Р 15288 ISO/IEC Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ, 2006. 73 с.

Компонента технического обеспечения (ТО) представляет собой КТС по подготовке, обработке информации и визуализации результатов обработки массивов ГПИ.

ПТО подразделяется на ряд основных групп.

К первой группе относятся информационно-вычислительные среды и операционные системы (ОС), обеспечивающие процесс функционирования вычислительных средств определенных классов. Обычно ОС, входящие в состав ПО и ИО, и являются инвариантными относительно ПАО.

Вторая группа представляет собой комплекс подсистем и пакетов прикладных программ, которые совместно с управляющими программами, на основе геоинформационных технологий ориентированы на обработку заданных типов элементов ГПИ. Данный вид ПО является специализированным в технологическом плане и определяет проблемную ориентацию ГИС предприятия.

Обеспечивающие подсистемы и программы ввода и вывода информации на периферийные устройства инвариантны относительно массивов ГПИ и ориентированы на определенный вид геоинформационной технологии [20].

Важное место занимает ИНО, представляющее собой совокупность математических моделей процессов обработки, интеллектуальной собственности, «ноу-хау», баз знаний, квалифицированного персонала и средств их подготовки и тренировки. Основу ИО в

ГИС НПП составляет система БД и СУБД. Составными компонентами здесь являются централизованная и локальные базы данных различных типов и архивы массивов данных и ГПИ. При этом в зависимости от типа ПАО, состава и характеристик ПО, конкретных характеристик КТС массивы данных могут иметь различную структуру¹.

Информационное обеспечение имеет двойственный характер применения. С одной стороны, это система БД, в которых хранятся ранее сформированные массивы ГПИ в виде: ГИМ, фрагментов цифровых моделей рельефа и местности, атрибутивной информации и т.д. В этом виде ИО выступает как обеспечивающий ресурс функционирования ГИП. С другой стороны, хранимые в БД массивы ГПИ, подвергаются:

- модернизации, когда разрабатываются и встраиваются в массивы ГПИ программы, решающие задачи управления, визуализации, защиты информации и т.д.;
- актуализации, когда в специализированные и тематические слои вводятся новые данные.

В этом случае ИО выступает в виде новых информационных продуктов, выходных массивов ГПИ и является результатом функционирования ГИС предприятия. Создание информационного продукта основано на прибавлении

¹ ГОСТ Р 15288 ISO/IEC Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. М.: Стандартинформ, 2006. 73 с.

к основной, хранимой в БД информации, новой порции информации, т.е. массив ГПИ усложняется и развивается эволюционным путем.

В данной ситуации в целом основные процессы ЖЦ ГПИ целесообразно описывать спиральной моделью. Ввиду важности роли информационного ресурса в процессе функционирования ГИП рассмотрим более детально основные процедуры ЖЦ ГПИ на фоне применяемых ресурсов (табл. 2).

Несмотря на значительное количество этапов и процедур, описывающих ЖЦ ГИП, целесообразно разделить все виды обеспечений на две части. Первая включает процессы ЖЦ ТО, ПТО, ИНО, а вторая – процедуры ЖЦ ГПИ.

Такое разделение является принципиальным, поскольку первоначально разрабатываются и реализуются компоненты ГИП в виде ТО, ПТО, ИНО, которые выступают как инструмент, посредством которого создается наукоемкий информационный продукт – массив ГПИ, то есть процессы ЖЦ ГПИ начинаются при наличии других видов обеспечений.

Рассматривая процесс ЖЦ ГИП относительно ее основных обеспечений (ресурсов) следует выделить следующие особенности, относящиеся только к ИО [19]:

– ЖЦ ИО начинается только после разработки и начала эксплуатации ТО, ПТО, ИНО входящих в подсистемы реализующих этапы предварительной и интегральной (комплексной) обработки ГПИ;

– характер взаимосвязей между этапами и процедурами в модели ЖЦ ГПИ отличается от моделей других видов обеспечений, он имеет характер многочисленных итераций вида «формирование – эксплуатация – актуализация -», связанных со своевременной актуализацией массивов ГПИ;

– длительность этапов ЖЦ ГПИ намного короче времени жизни остальных видов ресурсов;

– интенсивность формирования и актуализация массивов ГПИ как нового информационного научно-технического продукта намного превышают, темпы модернизации элементов и других ресурсов ГИП.

В плановом режиме процессы формирования и актуализации рабочих выходных массивов ГПИ представляют собой основные процессы функционирования ГИП как таковой. Анализ показывает, что наиболее чувствительными к действию факторов являются этапы тематической (комплексной) обработки и актуализации (модернизации) массивов ГПИ. Это объясняется тем фактом, что на данных этапах для автоматизированной обработки ГПИ применяется большое количество наукоемких технологий.

На этапе внедрения сильно влияют факторы, обуславливающие форму представления информационных массивов и влияющие на возможность изменения физических свойств.

В целом на основе анализа можно выявить особенности функционирования

ния ГИП, в процессе ее ЖЦ. Данными особенностями являются [5]:

1. Интегральный (тематический) характер обработки ГПИ, вызванный необходимостью привязки к объектам координатно-метрической, атрибутивной информации и формированием многослойных массивов ГПИ.

2. Распределенность основных видов обеспечений, обусловленная как разнообразностью исходной видовой информацией, так и сетевым характером размещения информационно-вычислительных ресурсов.

3. Высокая наукоемкость процессов обработки ГПИ, связанная, с необходимостью использования цепочки высокотехнологичных процессов обработки информации.

4. Параллельная коллективная обработка ГПИ, в рамках одного информационного проекта, обусловленная следующими причинами:

- физиологической невозможностью качественной обработки одним оператором больших объемов информации;
- одновременным поступлением на обработку большого числа видового картографического материала (снимков, трапечий, фрагментов и т.д.) на обширные территории;
- повышенными требованиями к времени получения законченного информационного проекта;
- необходимостью интенсификации процессов внедрения нового вида информационного обеспечения - ГПИО.

5. Необходимость защиты ресурсов ГИП на всех этапах ее ЖЦ.

Описание на вербальном уровне, выявление особенностей построения и функционирования ГИП и основных видов обеспечений в процессе ее ЖЦ позволяет, в дальнейшем, ставить и решать задачи моделирования и управления системами данного класса.

На всех этапах ПАО ГИП производится проверка полученного результата с заданными требованиями. Процедура проверки и требования к результатам обработки, т.е. к массиву выходной ГПИ на соответствующем j -этапе обработки, определяются вектором W_3 .

При этом выходной массив ГИП, как проектное решение, следует считать допустимым, если вектор параметров качества соответствует заданным [18]

$$Q_{j(OAP)} \geq Q_{j(OAP_{зад})}, \quad (4)$$

где Q_j – вектор параметров выходного ИМ на j -этапе ПАО.

Выполнение данного условия достигается путем управления ПАО посредством воздействия вектора W_4 , который определяет стратегию достижения цели на всех этапах обработки (формирования) ГПИ.

Описанная на системном уровне модель ПАО позволяет определить назначение, состав основных системных ресурсов (компонент), необходимых для построения ГИС НПП.

Результаты и их обсуждение

Проанализируем результат использования предложенной модели форма-

лизации на примере функционирования тематических АРМ, в составе ЛВС, СО ГПИ НПП.

Входной информационный поток, описываемый параметрами вектора W_1 , поступает на вход СО ГПИ, в виде (табл. 3):

– геокодированных растровых картографических материалов; ортотрансформированных изображений;

– справочной информации;

– данных базовых информационных слоев ГПИ;

– данных решения прикладных задач.

Обработка данных, составляющих входной информационный поток, производится в СО ГПИ на основе структурированных ресурсов каждого АРМ, описываемых вектором W_2 (табл. 4).

Таблица 3. Пример структуризации и оценки параметров информационных потоков и элементов обработки для СО ГПИ в составе АРМ вида W_1 при создании системы обработки ГПИ в рамках одного проекта (задачи)

Table 3. Example of structuring and evaluating the parameters of information flows and processing elements for SO GPI as part of a W_1 AWP when creating a GPI processing system within a single project (tasks)

Функции АРМ (задачи) / AWP functions (tasks)	Параметры функционирования АРМ в составе СО ГПИ НПП – W_1 / Parameters of AWP functioning as a part of SO GPI NPP						
	Количество одновременных проектов – S / Number of simultaneous projects	Тип массива ГПИ – $i = 1(1)I$ / The type of the array GUI	Вид этапа – $j = 1(1)J$ / View of the stage	«Сложность» массива – $\kappa = 1(1)K$ / The "complexity" of the array	Коэффициент качества задачи – X_{ij} / The quality factor of the task	Интенсивность потока заявок – Λ , 1/час / The intensity of the flow of application	Среднее время получения преобразованной – $T_{npi}(k, x)$, час / Average time to get the converted
АРМ-Обработки и хранения сопутствующей информации	1-50	1-10	1-8	1-6	0,98	5 - 10	0,1 – 0,2
АРМ-Создания базовых информационных слоев	1-16	1-16	1-4	1-6	0,98	20-200	0,05 – 0,1
АРМ-Администрирования и обеспечения безопасности информации	1-100	1-20	любой	1-6	0,98	1 - 10	0,01 – 0,05

Таблица 4. Пример формализованного выбора перечня ресурсов АРМ вида W2 при создании системы обработки ГПИ**Table 4.** Example of a formalized selection of a list of W2 AWP resources when creating a GPI processing system

Функции АРМ (задачи) / AWP functions (tasks)	Базовые виды обеспечений (ресурсы) АРМ - W_2 / Basic types of arm security (resources)]			
	ТО - W_{21} / TS	ПТО - W_{22} / STS	ИО - W_{23} / IS	ИНО - W_{24} / IS
АРМ-Обработки и хранения сопутствующей информации	ПЭВМ (двух-процессорный) – 2,0 ГГц, ОЗУ – 1 Гб, ДЗУ – 200 Гб, монитор TFT 24, дисковый массив – 1,6 Тб, сканер ПРОСКАН	ОПО: MS Windows 2010 Professional, MS Office, ACD See. СПО: Графический редактор Adobe Photoshop CS 8; хранения и обработки ГПИ Arc View 8.3; распознавания текста по отсканированным материалам ABBYY FineReader 6.0 Professional Trail; векторизатор картографических изображений Easy Trace; Easy Trace Pro 7.95; конвертор файлов Garmin 2SHP	Форматы TIF, JPEG, IMG	Оператор
АРМ-Создания базовых информационных слоев	ПЭВМ (двух-процессорный) – 2,0 ГГц, ОЗУ – 1 Гб, ДЗУ – 80 Гб, 2 монитора TFT 24, дисковый массив – 1,6 Тб, сканер ПРОСКАН	ОПО: MS Windows 2010 Professional, MS Office, , ACD See. СПО: Dr.Web, ПО IPB, Erdas Essential; обработки ГПИ Arc View 3.3 рус.; векторизатор изображений Microstation v.8.1; векторизатор картографических изображений Easy Trace Pro 7.95; ПО измерения вертикалей конвертор Microstation	Форматы TIF, JPEG, IMG	Инженер-разработчик. Оператор
АРМ-Администрирования и обеспечения безопасности информации	ПЭВМ (двух-процессорный) – 3,0 ГГц, ОЗУ – 2 Гб, ДЗУ – 150 Гб, монитор TFT 20. Комплект сетевого оборудования	ОПО: MS Windows 2010 Professional, MS Office, ACD See. СПО: ПО администрирования ЛВС, ПО управления доступом, Страж, Dr.Web, ПО администрирования и управления ЛВС	Коды и пароли доступа. Протоколы обмена	Квалифицированный оператор

Информация, циркулирующая в подсистеме СО ГПИ, состоит из информационных файлов:

– картографических материалов в виде тиражных оттисков;

– геокодированных растровых картографических материалов (SID, IMG);

– изображения зданий в цифровом виде или в виде фотографий в форматах JPEG, BMP, TIFF;

- ортотрансформированных изображений земной поверхности (HMR, SIO);
- справочной информации на основе мультимедиа-материалов, баз данных, фотоальбомов, справочников, маршрутов транспорта различного назначения в виде тиражных оттисков или в электронном (цифровом) виде;
- заявок на разработку СПО или решение прикладных задач.

Выходные данные СО ГПИ представляют собой ГИП в виде:

- цифровые растровые и векторные карты местности в виде Shape-файлов;
- разработанные базовые слои ГПИ;
- специальные тематические данные, представленные в отдельных слоях ГПИ;
- справочные данные о зданиях, улицах, дорогах, а также сопутствующая информация в форматах TXT, HTML, BMP, Shape-файлы и пр.;
- варианты решения прикладных задач в цифровой и документальной формах представления.

Проведенный анализ особенностей создания и функционирования ГИП, а также разработанное структурно-графическое и табличное представление позволили выявить взаимосвязь особенностей ГИП и содержания этапов их ЖЦ. Полученные результаты позволяют четко позиционировать представляемые к разработке и эксплуатации элементы и компоненты ГИП, прежде всего в ГИС НПП, предоставят возможность адекватнее определить требования к системам данного класса.

Выводы

На основе системных представлений и теоретико-множественного подхода выполнена формализация процессов описания построения ГИП и ее элементов. В рамках концептуального подхода построена модель процесса автоматизированной обработки ГПИ в виде декартового произведения.

Проведен анализ содержания этапов ЖЦ ГИП и определен подход к формализации процессов, реализующие указанные этапы. Выполненный анализ позволил выявить особенности функционирования ГИП, в процессе ее ЖЦ. Данными особенностями являются:

- интегральный характер обработки ГПИ, вызванный необходимостью привязки к объектам координатно-метрической, атрибутивной информации и формированием многослойных массивов ГПИ;
- распределенность основных ресурсов, обусловленная как разнообразностью исходной видовой информацией, так и сетевым характером размещения информационно-вычислительных ресурсов;
- высокая наукоемкость процессов обработки ГПИ, связанная с необходимостью использования цепочки высокотехнологичных процессов обработки информации;
- параллельная коллективная обработка ГПИ, обусловленная особенностями использования интеллектуального обеспечения;

– необходимость защиты ресурсов ГИП на всех этапах ее ЖЦ.

Описанные на модели и выявленные особенности построения и функционирования ГИП и основных видов

обеспечений в процессе ее ЖЦ позволят, в дальнейшем, ставить и решать задачи моделирования и управления системами данного класса.

Список литературы

1. Йордан Э., Аргила К. Структурные модели в объектно-ориентированном анализе и проектировании. М.: ЛОРИ, 1999. 264 с.
2. Методология создания автоматизированных информационных систем коллективной обработки разнородной информации от средств аэрокосмического мониторинга / Г.В. Кузьмин, И.В. Макарьин, В.Н. Николаев, Н.Р. Стратилатов. Курск, 2018. 245 с.
3. Розенберг И.Н. Геоинформационная модель // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 5-4. С. 675-676.
4. Цветков В.Я. Информационные модели и геоинформационные модели // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 4 (16). С. 114-120.
5. Информационно-коммуникационные технологии как средство повышения эффективности управления промышленным предприятием / Н.И. Лыгина, О.В. Рудакова, А.Н. Алексахин, Л.А. Терехова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2017. Т. 7, № 4 (25). С. 136–148.
6. Геоинформатика: в 2 кн. Кн. 2 / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов [и др.]; под ред. проф. В.С. Тикунова. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 384 с.
7. Каблашова И.В., Логунова И.В., Саликов Ю.А. Инновационное развитие системы управления предприятием в условиях цифровой трансформации // Организатор производства. 2019. Т. 27, № 2. С. 46–58.
8. Morteza Omidipoor, Mohammadreza Jelokhani-Niaraki, Athena Moeinmehr, Abolghasem Sadeghi-Niaraki, Soo-Mi Choi, A GIS-based decision support system for facilitating participatory urban renewal process // Land Use Policy. 2019. Vol. 88. P.104-150.
9. Майоров А.А., Цветков В.Я. Геоинформатика как важнейшее направление развития информатики // Информационные технологии. 2013. № 11. С. 2-7.
10. Шайтура С. В. Обзор технологий создания геоинформационной продукции // Информационные технологии. 2011. № 9. С. 27-30.
11. Анализ состояния исследований проблем управления жизненным циклом искусственно созданных объектов / Р.М. Юсупов, Б.В. Соколов, А.И. Птушкин, А.В. Иконникова, С.А. Потрясаев, Е.Г. Цивирко // Труды СПИИРАН. 2011. Вып. 16. С. 37-109.

12. Sergejs Kodors, Aldis Rausis, Aivars Ratkevics, Janis Zvirgzds, Artis Teilans, Ivonna Ansona, Real Estate Monitoring System Based on Remote Sensing and Image Recognition Technologies // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 104. P. 460-467.
13. Andréa Oliveira da Silva, Ricardo Augusto Souza Fernandes, Smart governance based on multipurpose territorial cadastre and geographic information system: An analysis of geoinformation, transparency and collaborative participation for Brazilian capitals // *Land Use Policy*. 2020. Vol. 97. P. 104752.
14. Kramarov S., Khramov V. Methodology of Formation of Unite Geo-Informational Space in the Region. In: Sukhomlin V., Zubareva E. (eds) *Modern Information Technology and IT Education // SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*. 2020. Vol 1201. Springer, Cham.
15. Дышлюк С.С., Николаева О.Н., Ромашова Л.А. Научно- методические основы формализации процессов составления тематических карт для реализации инструментальной справочно-аналитической геоинформационной системы // *Вестник СГГА*. 2011. Вып. 1 (14). С. 49–54.
16. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Б.М.: МО СССР, 1989.
17. Цветков В.Я. ГИС и технологии. М. : Финансы и статистика, 1998. 287 с.
18. Николаев В.Н. Управление жизненным циклом инновационной ГИС: монография. Саабрюкен: Palmarium academic publishing, 2013. 374 с.
19. Основные направления применения результатов космической деятельности в социально-экономических системах Курской области / В.Н. Николаев, А.М. Потапенко, В.Н. Новиков, И.В. Макарьин // *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2016. № 8(18). С. 91-97.
20. Atefeh Dehghani Ashkezari, Nasser Hosseinzadeh, Ayoub Chebli, Mahammed Al-badi, Development of an enterprise Geographic Information System (GIS) integrated with smart grid // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2018. Vol. 14. P. 25-34.

References

1. Yordan E., Argila K. *Strukturnye modeli v ob"ektno-orientirovannom analize i proektirovanii* [Structural models in object-oriented analysis and design]. Moscow, LORI Publ., 1999. 264 p. (In Russ.).
2. Kuzmin G. V., Makarin I. V., Nikolaev V. N., Stratilatov N. R. *Metodologiya sozdaniya avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem kollektivnoi obrabotki raznorodnoi informatsii ot sredstv aerokosmicheskogo monitoringa* [Methodology for creating automated

information systems for the collective processing of heterogeneous information from aerospace monitoring tools]. Kursk, 2018. 245 p. (In Russ.).

3. Rosenberg I. N. Geoinformatsionnaya model' [Geoinformation model]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 5-4, pp. 675-676 (In Russ.).

4. Tsvetkov V. Ya. Informatsionnye modeli i geoinformatsionnye modeli [Information models and geoinformation models]. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii = Educational Resources and Technologies*, 2016. no. 4 (16). pp. 114-120 (In Russ.).

5. Lygina N. I., Rudakova O. V., Aleksakhin A. N., Terekhova L. A. Informatsionno-kommunikatsionnye tekhnologii kak sredstvo povysheniya effektivnosti upravleniya promyshlennym predpriyatiem [Information and communication technologies as a means of improving the efficiency of industrial enterprise management]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.*, 2017, vol. 7, no. 4 (25), pp. 136-148 (In Russ.).

6. Kapralov E. G., Koshkarev A.V., Tikunov V. S. et al. *Geoinformatika* [Geoinformatics]. Moscow, 2008. 384 p. (In Russ.).

7. Kablashova I. V., Logunova I. V., Salikov Yu.A. Innovatsionnoe razvitie sistemy upravleniya predpriyatiem v usloviyakh tsifrovoi transformatsii [Innovative development of the enterprise management system in the conditions of digital transformation]. *Organizator proizvodstva = Organizer of Production*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 46-58 (In Russ.).

8. Morteza Omidipoor, Mohammadreza Jelokhani-Niaraki, Athena Moeinmehr, Abolghasem Sadeghi-Niaraki, su-Mi Choi, GIS-oriented system of decision support to facilitate the participation in the urban renewal of the political process. *Land Use Policy*, 2019, vol. 88, pp. 104-150.

9. Mayorov A. A., Tsvetkov V. Y. Geoinformatika kak vazhneishee napravlenie razvitiya informatiki [Geoinformatics as an important direction of development of computer science]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technology*, 2013. no. 11, pp. 2-7 (In Russ.).

10. Shaitura S. V. Obzor tekhnologii sozdaniya geoinformatsionnoi produktsii [Review of technologies for creating geoinformation products]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technology*, 2011, no. 9, pp. 27-30 (In Russ.).

11. Yusupov R. M., Sokolov B. V., Ptushkin A. I., Ikonnikova A.V., Shkolaev S. A., Tsivirko E. G. Analiz sostoyaniya issledovaniy problem upravleniya zhiznennym tsiklom iskusstvenno sozdannykh ob"ektov [Analysis of the state of research on problems of life cycle

164 Информатика, вычислительная техника и управление / Computer science, computer engineering and control management of artificially created objects]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2011, is. 16, pp. 37-109 (In Russ.).

12. Sergejs Kodors, Aldis Rausis, Aivars Ratkevich, Janis Zvirgzds, Artis Teilans, Yvonne Anseong. Real Estate Monitoring System Based on Remote Sensing and Image Recognition Technologies [Monitoring of real estate based on remote sensing technology and image recognition]. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 104, pp. 460-467 (In Russ.).

13. Andre Oliveira da Silva, Ricardo Augusto Souza Fernandes, Intelligent control on the basis of the multipurpose territorial cadastre and geographic information systems: an Analysis of geo-information, transparency and joint participation to Brazilian capitals. *Land Use Policy*, 2020, vol. 97, pp. 104752 (In Russ.).

14. Kramarov S., Khramov V. (2020) methodology for the formation of a single geoinformation space in the region. In: Sukhomlin V., Zubareva E. (ed.) modern information technologies and it education. *CITITO-2018. Communications in computer science and engineering*, vol. 1201. Springer, Cham.

15. Dyshlyuk S. S., Nikolaeva O. N., Romashova L. A. Nauchno-metodicheskie osnovy formalizatsii protsessov sostavleniya tematicheskikh kart dlya realizatsii instrumental'noi spravochno-analiticheskoi geoinformatsionnoi sistemy [Scientific and methodological bases of formalization of the processes of drawing up thematic maps for the implementation of the instrumental reference and analytical geoinformation system]. *Vestnik SGGA = Vestnik SGGA*, 2011, is. 1 (14), pp. 49-54 (In Russ.).

16. Petukhov G. B. *Osnovy teorii effektivnosti tselenapravlennykh protsessov* [Fundamentals of the theory of efficiency of purposeful processes]. Moscow, 1989 (In Russ.)

17. Tsvetkov V. Ya. GIS i tekhnologii [GIS and technologies]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1998. 287 p. (In Russ.).

18. Nikolaev V. N. *Upravlenie zhiznennym tsiklom innovatsionnoi GIS* [Life cycle management of innovative GIS]. Saabryuken, Palmarium academic publishing, 2013. 374 p. (In Russ.).

19. Nikolaev V. N., Potapenko A.M., Novikov V. N., Makarin I. V. Osnovnye napravleniya primeneniya rezul'tatov kosmicheskoi deyatel'nosti v sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh Kurskoi oblasti [Main directions of application of space activity results in socio-economic systems of the Kursk region]. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya = Innovative Economy: Prospects for Development and Improvement*, 2016, no. 8(18), pp. 91-97 (In Russ.).

20. Atefeh Dehghani Ashkezari, Nasser Hosseinzadeh, Ayub Chebli, Mahamm Albadi, development of a corporate geographic information system (GIS) integrated with smart grid. *Sustainable Energy, Grids and Net-works*, 2018, vol. 14, pp. 25-34.

Информация об авторах / Information about the Authors

Зайцев Евгений Михайлович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, АО НПФ «ИнфоСистем-35», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: info@npf-infosystem.ru

Evgeniy M. Zaitsev, Cand. of Sci. (Engineering), Deputy General Director of JSC NPF INFOSYSTEM-35, Moscow, Russian Federation, e-mail: info@npf-infosystem.ru

Коломиец Елена Александровна, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: lenus07@yandex.ru

Elena A. Kolomiets, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: lenus07@yandex.ru

Николаев Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: nikovic54@yandex.ru

Viktor N. Nikolaev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: nikovic54@yandex.ru

Алгоритм управления малогабаритным беспилотным подводным комплексом

В. Е. Бондырев¹, С. И. Князев¹, В. И. Королев¹, С. Ф. Яцун¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. Создание систем мониторинга водоемов позволяет оперативно оценивать экологическую ситуацию в различных точках района мониторинга. Одним из основных этапов исследования качества воды является отбор проб, который сегодня осуществляется на стационарных постах, что делает невозможным обеспечение оперативного контроля на различных участках объекта наблюдения. Решение проблемы возможно за счет применения мобильных роботизированных платформ. Целью работы является создание математической модели и алгоритма управления автономным движением подводного роботизированного устройства для сбора проб воды в водоеме.

Методы. Для этого решены следующие задачи: разработана структура устройства, которая состоит из блока силового каркаса, блоков винтовых электроприводов, блоков рулей глубины и направления. А также блока бортового источника питания, блока сенсоров, обеспечивающих взаимодействие подводного аппарата с окружающей средой. Сформулированы задачи управления, для этого разработана схема движения устройства в водоеме.

Результаты. Предложен модульный метод планирования траектории, основанный на понятии единичный цикл движения, который состоит из 2-х поворотов и 2-х прямолинейных этапов 2R2P, также предложена модель управляющего алгоритма и исследованы реакции аппарата на внешние возмущения. При решении задач применены общие теоремы динамики, метод синтеза алгоритма по обратной задаче динамики.

Заключение. В результате проведенных исследований рассмотрена реакция системы на возмущающие воздействия, действующие в продольном направлении, приведены графики возмущения, случайного типа с нормальным законом распределения и отклонение центра масс от заданного положения.

Ключевые слова: система мониторинга водоемов; малогабаритный беспилотный подводный комплекс; структурная схема; возмущающие воздействия; математическая модель; планирование траектории движения.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90053.

Для цитирования: Алгоритм управления малогабаритным беспилотным подводным комплексом / В. Е. Бондырев, С. И. Князев, В. И. Королев, С. Ф. Яцун // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 166-179. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-166-179>.

Поступила в редакцию 30.07.2020

Подписана в печать 17.08.2020

Опубликована 30.12.2020

Small-size Unmanned Control Algorithm of an Underwater Complex

Vladimir E. Bondyrev¹, Sergey I. Knyazev¹, Vladimir I. Korolev¹,
Sergey F. Jatsun¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: teormeh@inbox.ru

Abstract

Purpose of research: The creation of water bodies monitoring systems makes it possible to evaluate environmental situation in various points of monitoring area quickly. One of the main stages of water quality research is sampling, which is currently carried out at stationary posts, which makes it impossible to ensure operational control in various areas of an observation site. The problem can be solved by using mobile robotic platforms. The purpose of this study is to create mathematical model and algorithm for controlling autonomous movement of an underwater robotic device for collecting water samples in a reservoir.

Methods. The following problems were solved for this purpose: the structure of the device was developed, which consists of a power frame unit, units of screw electric drives, units of depth and direction rudders. On-board power supply unit, sensor unit providing interaction of underwater vehicle with environment were also developed. Control tasks are formulated. A scheme of device movement in a reservoir has been developed for this purpose.

Results. Modular method of trajectory planning is proposed. It is based on a single motion cycle concept, which consists of 2 turns and 2 straight-line stages of 2R2P. A model of control algorithm is also proposed and reactions of apparatus to external disturbances are studied. General dynamics theorems, method of algorithm synthesizing according to inverse dynamics problem were applied when solving problems.

Conclusion: As a result of conducted studies, the system response to disturbances acting in longitudinal direction is described, disturbance diagrams are also described, random type with normal distribution law and mass center deviation s from the given position are given.

Keywords: water bodies monitoring system; small unmanned underwater complex; structural diagram; disturbing effects; mathematical model; planning the motion path.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The study was carried out with the financial support of RFFI in the framework of as part of scientific project No. 19-33-90053.

For citation: Bondyrev V. E., Knyazev S. I., Korolev V. I., Jatsun S. F. Small-size Unmanned Control Algorithm of an Underwater Complex. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 166-179 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-166-179>.

Received 30.07.2020

Accepted 17.08.2020

Published 30.12.2020

Введение

Современное развитие промышленности, и связанное с этим загрязнение окружающей среды, ряд масштаб-

ных техногенных аварий, вынуждают выдвигать проблемы экологии в число первоочередных. Создание систем мониторинга водоемов (СМВ) позволяет оперативно оценивать экологическую

ситуацию в различных точках района мониторинга.

Одним из основных этапов исследования качества воды является отбор проб, который осуществляется оператором на стационарных постах, укомплектованных соответствующим оборудованием. Однако стационарность таких постов делает невозможной обеспечение оперативного контроля на различных участках объекта наблюдения. Поэтому, существует проблема оперативного и безопасного получения информации, необходимой и достаточной для оценки качества водоема и принятия соответствующих ситуации мер.

В последние годы появляются роботизированные мобильные платформы (РМП) надводного и подводного базирования, позволяющие в автономном режиме обеспечить забор проб воды и передачу информации на пост наблюдения. Для системы мониторинга водоемов роботизированного типа (СМВРТ) требуется создать небольшие, но маневренные малогабаритные беспилотные подводные комплексы (МБПК), позволяющие осуществлять движение по заданным траекториям и производить забор проб воды в заданных точках [1-12].

Для реализации автономного или телеуправляемого движения МБПК необходимо разработать алгоритмы управления на основе математических моделей с учетом как детерминированных, так и случайных возмущений. Таким образом, повышение точности движения МБПК по заданной траектории за счет синтеза оптимальных

управляющих алгоритмов и совершенствования структурных связей элементов СМВРТ является актуальным направлением исследования.

Материалы и методы

Структура МБПК

Рассмотрим структуру МБПК, которая показана на рис.1. Система состоит из блока силового каркаса, блоков винтовых электроприводов, блоков рулей глубины и направления. Блока бортового источника питания, блока сенсоров, обеспечивающих взаимодействие МБПК с окружающей средой. МБПК также снабжен секвентальным блоком забора проб. В кассете может размещаться 10 или 20 емкостей.

Математическая модель

Схема МБПК при движении в водоеме приведена на рис. 2. МБПК движется относительно неподвижной системы координат $OXYZ$. С центром масс связана подвижная система координат $SX_2Y_2Z_2$. На схеме приняты следующие обозначения: 1 – правый винтовой электропривод; 2 – корпус МБПК; 3 – левый винтовой электропривод; 4 – бортовой вычислитель; 5 – сенсоры; 6 – препятствие, расстояние между МБПК и препятствиями обозначим l . Для получения системы дифференциальных уравнений движения МБПК воспользуемся общими теоремами динамики. Для определения уравнений, описывающих движение центра масс МБПК, применим теорему об изменении количества движения механической системы в виде:

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \bar{\Phi}, \quad (1)$$

где $\bar{Q}$ – количество движения рассматриваемой механической системы определим по формуле:

$$\bar{Q} = \sum \bar{q}_i, \quad (2)$$

$$\bar{\Phi} = \bar{G} + \bar{P} + \bar{H} + \bar{F}. \quad (3)$$

$\bar{\Phi}$ – главный вектор внешних сил, приложенных к системе.

$$\bar{\Phi} = (\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z)^T.$$

1) $\bar{G} = -\sum m_i g \bar{j}$ – вес, $\bar{j}$ – единичный вектор оси OY ;

2) $\bar{P} = \sum V_i \rho \bar{j}$ – сила Архимеда; V_i – объем элемента МБПК; ρ – плотность воды.

3) сила сопротивления $\bar{H}$, возникающая при движении МБПК, приложена в точке C , определяется по формуле:

$$\bar{H} = (1/2)\zeta S \rho \bar{V} |\bar{V}|,$$

где ζ – безразмерный коэффициент лобового сопротивления, ρ – плотность вязкой среды, S – эффективная площадь корпуса; $\bar{V}$ – скорость движения относительно потока воды;

4) управляющие силы, вызванные взаимодействием винтовых движителей с водой, приложены к точкам C_1, C_3 соответственно. Эти силы направлены вдоль осей $O_i X_i$ соответствующих локальных систем координат. Векторы этих сил в неподвижной системе координат определим по формулам:

$$\bar{F}_1^{(0)} = T_{12} T_{20} \cdot \bar{F}_1^{(1)},$$

$$\bar{F}_3^{(0)} = T_{32} T_{20} \cdot \bar{F}_3^{(3)}.$$

Также, со стороны рулей действует сила, приложена:

$$\bar{F}_2^{(0)} = T_{20} F_2^{(2)}.$$

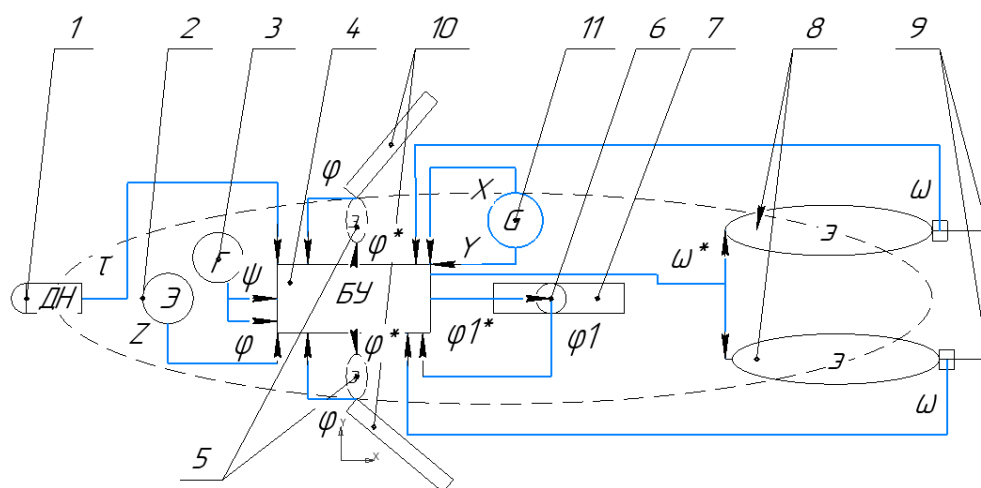


Рис. 1. Структура МБПК: 1 – датчик расстояния до препятствия; 2 – эхолот; 3 – гироскоп; 4 – блок управления; 5 – поворотные электроприводы левого и правого; 6 – клапан механизма забора воды; 7 – емкости для хранения проб воды; 8 – электродвигатели рулей поворота и глубины; 9 – рули направления и глубины; 10 – бортовые винтовые движители с переменным вектором тяги; 11 – GPS навигатор

Fig. 1. MUUK Structure: 1 – sensor the distance from obstacles; 2 – the sounder; 3 – gyro; 4 – control unit; 5 – turning left and right actuators; 6 – way valve mechanism water intake; 7 – capacity of storage of water samples; 8 – electric rudder and depth; 9 – rudders and depth; 10 – side-screw propulsion with variable thrust vector; 11 – GPS

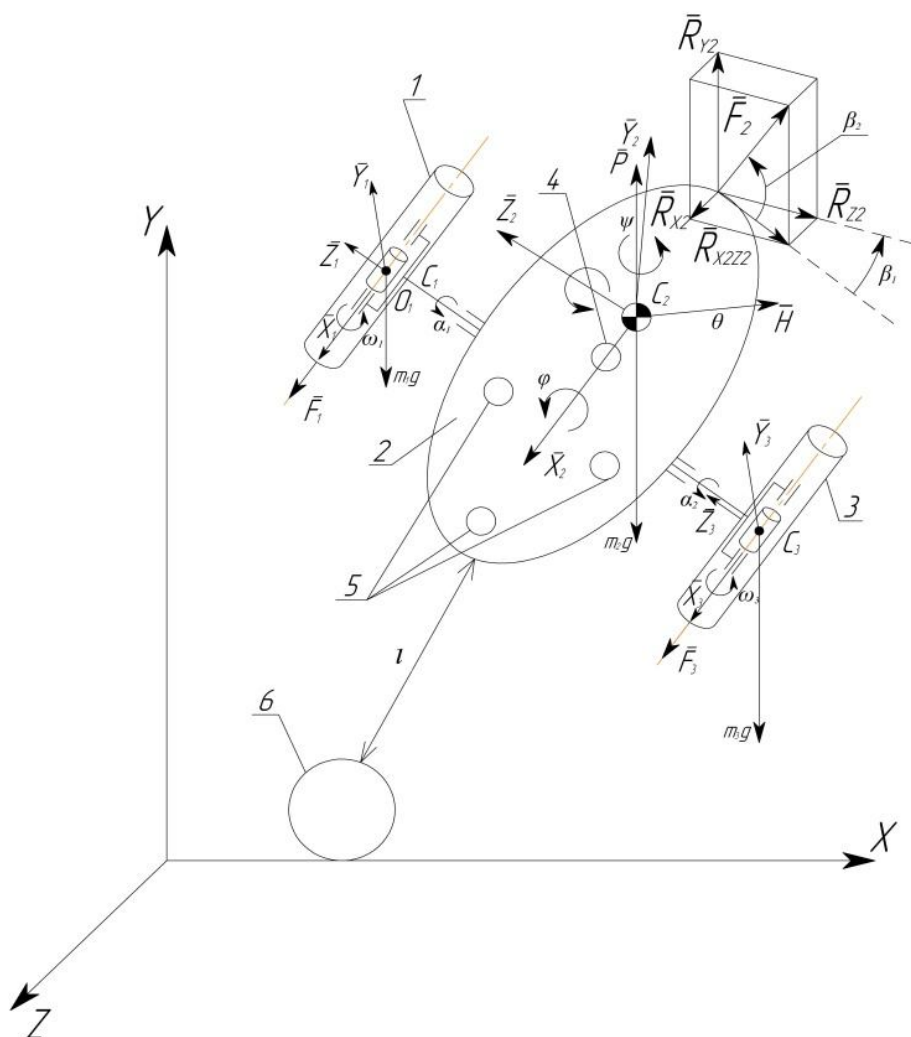


Рис. 2. Схема МБПК при движении в водоеме с учетом взаимодействия с препятствием:

1 – правый винтовой электропривод; 2 – корпус МБПК; 3 – левый винтовой электропривод; 4 – бортовой вычислитель; 5 – сенсоры; 6 – препятствие

Fig. 2. Scheme of MUUK when moving in a reservoir, taking into account interaction with an obstacle.

1 – right screw electric drive; 2 – MBPC case; 3 – left screw electric drive; 4 – on-board computer; 5 – sensors; 6 – obstacle

Матрицы, определяющие поворот винтового движителя относительно корпуса, представим в виде:

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_{32} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрица поворота второй системы координат относительно неподвижной имеет вид:

$$T_{20} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos f - \sin \theta \sin \psi \sin f & -\cos \theta \sin f & \cos f \sin \psi + \cos \psi \sin \theta \sin f \\ \cos \psi \sin f + \cos f \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \cos f & \sin \psi \sin f - \cos \psi \cos f \sin \theta \\ -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнение (1), с учетом (2), (3) представим в виде:

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = (m_1 + m_2 + m_3) \frac{d\bar{v}_c}{dt} = \bar{G} + \bar{H} + \bar{P} + T_{12}T_{20}\bar{F}_1^{(1)} + T_{32}T_{20}\bar{F}_3^{(3)} + T_{20}\bar{F}_2 \quad (4)$$

Для определения уравнений вращательного движения, воспользуемся теоремой об изменении момента количества движения в виде:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{L} \times \bar{\omega} = \bar{M}_c^e, \quad (5)$$

где $\bar{L}$ – Кинетический момент МБПК; $\bar{M}_c^e$ – главный момент внешних сил.

$\bar{L} = I\bar{\omega}$, где I – тензор инерции;

$$I = \begin{bmatrix} J^x & J^{xy} & J^{xz} \\ J^{yx} & J^y & J^{yz} \\ J^{zx} & J^{zy} & J^z \end{bmatrix}; \quad \bar{\omega} - \text{угловая скорость.}$$

рость.

$$\bar{\omega} = (\omega_{x2} + \omega_{y2} + \omega_{z2})^T. \quad (6)$$

Если система координат $CXYZ$ является главной, то:

$$\frac{d\bar{L}}{dt} + \bar{L} \times \bar{\omega} = \begin{bmatrix} J^x \dot{\omega}_x \\ J^y \dot{\omega}_y \\ J^z \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_y \omega_z (J^x - J^y) \\ \omega_x \omega_z (J^y - J^z) \\ \omega_x \omega_y (J^z - J^x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{x2} \\ M_{y2} \\ M_{z2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Формулы (4) и (7) с учетом кинематических уравнений Эйлера образуют систему дифференциальных уравнений, описывающих движение МБПК в пространстве. Управляющие силы, создаваемые винтовыми движителями и рулями глубины и направления в первой, второй и третьей системах координат, имеют вид:

$$\bar{F}_1^{(1)} = \begin{bmatrix} F_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{F}_3^{(3)} = \begin{bmatrix} F_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Величина сил $\bar{F}_1^{(1)}$, $\bar{F}_3^{(3)}$ зависит от угловой скорости вращения винтов. Далее примем, что $F_i = b_i \omega_i^2$, b_i – эмпирический коэффициент. Определим математическую модель управляющей силы, связанной с изменением угла поворота рулей поворота β_1 и глубины β_2 .

$$F_2^{(2)} = (R_0, R_0 \sin \beta_2, R_0 \sin \beta_1)^T$$

$$F_2^{(0)} = F_2^{(2)}; \quad R_0 = r_0 v_x |v_x|, \quad (9)$$

где r_0 – экспериментально определяемая постоянная; v_x – продольная скорость. Определим моменты сил, возникающих со стороны правого движителя относительно центра масс корпуса:

$$\vec{M}(F_1) = \vec{r}_{CC1}^{(2)} \times \vec{F}_1^{(2)} = \dot{r}_{CC1}^{(2)} \times T_{12} \cdot \vec{F}_1$$

$$\vec{M}(\bar{F}_1) = \begin{bmatrix} -a \\ b \\ c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

a , b , c – геометрические размеры, определяющие положение центра винтового движителя. Аналогично определим момент, создаваемый силой левого движителя относительно центра масс корпуса:

$$\vec{M}(\bar{F}_3) = \begin{bmatrix} -a \\ b \\ c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

С применением уравнений (4), (7) построена программа расчета движения МБПК в режиме автономного движения и телеуправления, позволяющая вычислять изменение положения, ориентации и скоростей центра масс МБПК, в про-

странстве под действием системы внешних сил и моментов (8), (9).

Планирование траектории движения

Рассмотрим модульный метод планирования траектории, основанный на понятии единичный цикл движения МБПК, который состоит из 2-х поворотов и 2-х прямолинейных этапов 2R2P (рис.3). Используя понятие цикл движения можно построить различные траектории движения МБПК.

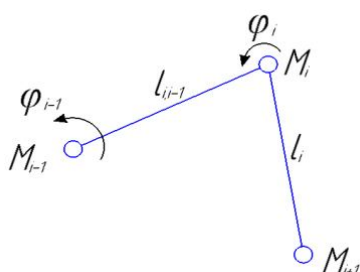


Рис. 3. Схема модуля планируемой траектории (цикл 2R2P)

Fig. 3. Diagram of the planned trajectory module (2R2P cycle)

Примеры траекторий приведены на рис.4 и рис.5.

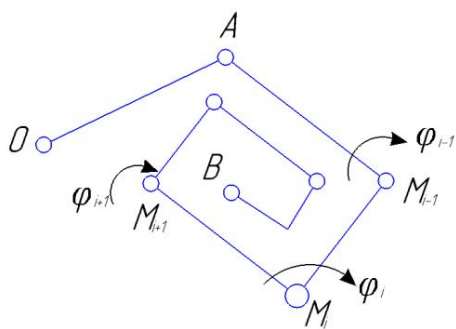


Рис. 4. Траектория движения МБПК типа «Спираль»

Fig.4. The trajectory of the MBPC type "Spiral"

$$\varphi_{i-1} = \varphi_i; l_i = l_{i-1} - \Delta l$$

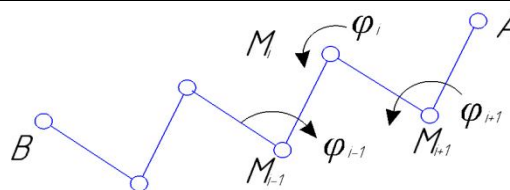


Рис. 5. Траектории движения МБПК типа «Дорожка»

Fig. 5. Trajectory of the MBPC of the "Track" type

$l_i - \varphi_{i-1} = -\varphi_i; l_i = l_{i-1}; l_i$ – длина i -го отрезка траектории.

Результаты и их обсуждение

Широко использован структурно-логический подход, когда система представляется структурой из блоков, а количественные характеристики системы выражаются через аналогичные характеристики блоков с помощью алгебры логики. Решаются следующие типы задач: расчет характеристик систем с различной структурой; качественный анализ работы систем различной структуры при вариациях характеристик блоков; оптимальное управление работой системы с различной структурой. Анализируются программы для ЕС ЭВМ, реализующие предложенные алгоритмы.

Вопросам синтеза систем автоматического управления в условиях неопределенности ряда параметров уделяется большое внимание в работах [13-20].

Преобразуем систему дифференциальных уравнений (4), (7) к виду:

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = \bar{\Phi}_1(\bar{\xi}) + B(\bar{\xi})\bar{U}. \quad (10)$$

Управление движением МБПК осуществляется шестью управляющими

напряжениями u_i , вектор управляющих воздействий имеет вид:

$$\bar{U} = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)^T, \quad (11)$$

система управления МБПК имеет замкнутый вид. В качестве управляемых параметров, примем:

$$\xi = (v_X, v_Y, v_Z, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z)^T.$$

Тогда система управления МБПК содержит шесть каналов обратных связей. Закон управления получен с применением метода синтеза управляющего алгоритма на основе решения задачи обратной динамики в виде:

$$\bar{U} = \bar{U}(\xi, \ddot{r}(t), \dot{r}(t), \bar{r}(t), W, t). \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что для создания требуемого сигнала управления необходимо измерять управляемую величину $\xi(t)$, внешние возмущения W ,

а также функцию, определяющую желаемое положение ЦМ МБПК $\bar{r}(t)$ и ее производные.

Далее рассмотрена реакция системы на возмущающие воздействия случайного типа, действующие в продольном направлении МБПК, вдоль оси SX_2 . На рис.6-9 приведен график возмущения, случайного типа с нормальным законом распределения и реакция системы на это воздействие в виде ошибки по X .

Полученные диаграммы показывают зависимость реакции системы на характер возмущения (см. рис.7 и рис.9.). Так наличие ненулевого математического ожидания приводит к появлению значительной динамической ошибки, которая после снятия возмущения стремится к нулю.

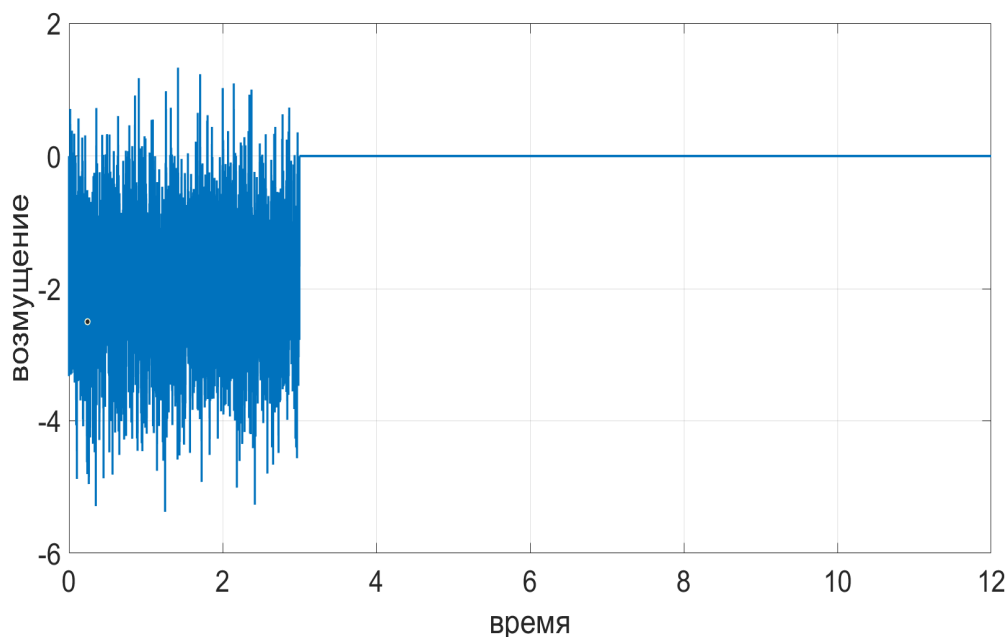


Рис. 6. Случайное воздействие с параметрами; $m = -2$, $\sigma = 1$

Fig. 6. Graph of random perturbation on the X-axis $m = -2$, $\sigma = 1$

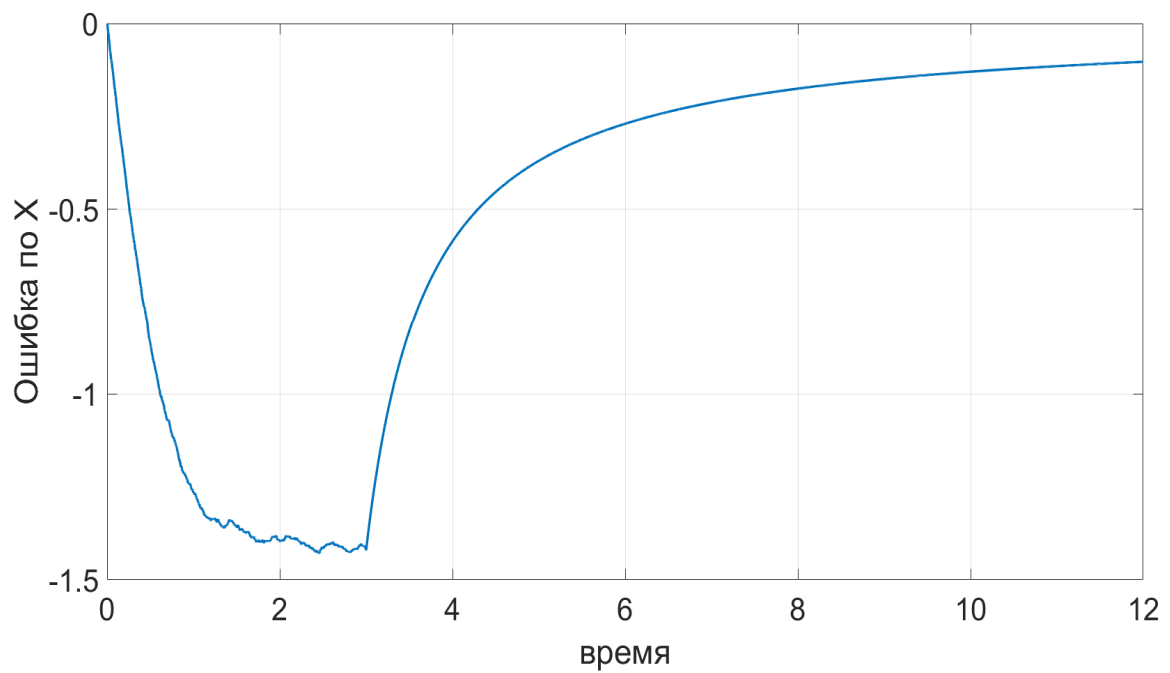


Рис. 7. Ошибка по оси X с параметрами случайного воздействия $m = -2$, $\sigma = 1$

Fig. 7. Graph of error on the X-axis during random perturbation $m = -2$, $\sigma = 1$

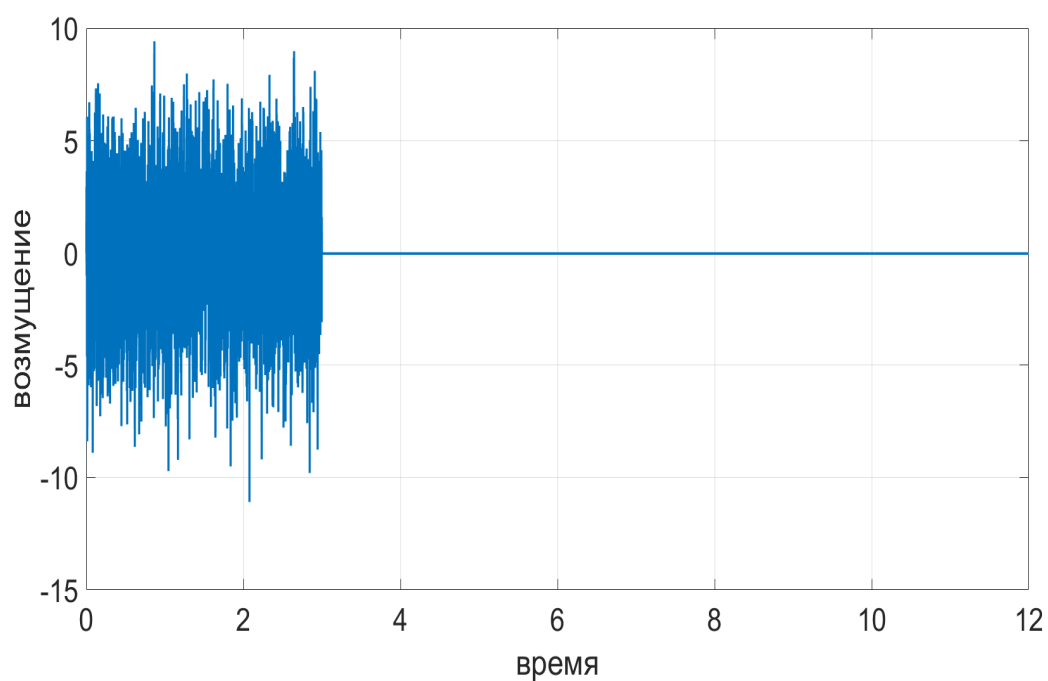


Рис. 8. Случайное воздействие с параметрами $m = 0$, $\sigma = 3$

Fig. 8. Graph of random perturbation on the X-axis $m = 0$, $\sigma = 3$

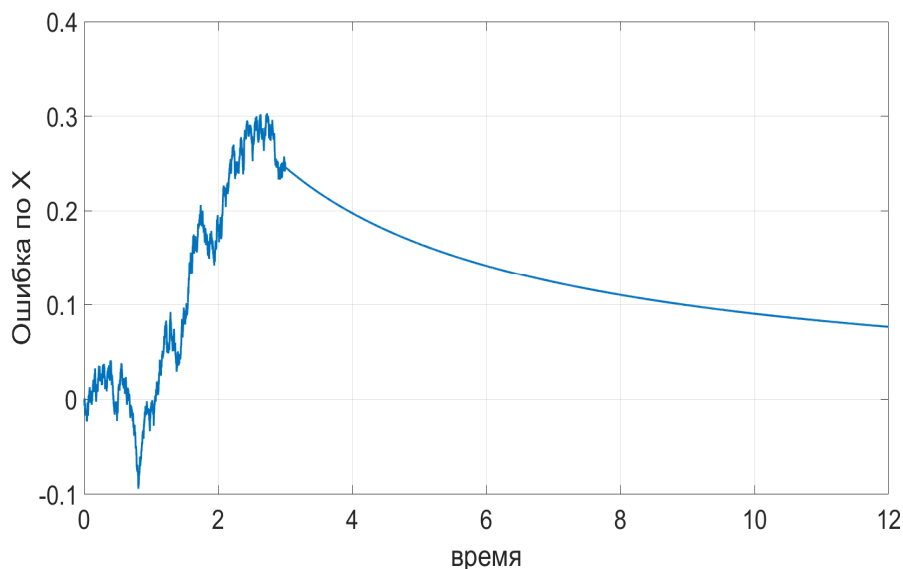


Рис.9. Ошибка по оси X с параметрами случайного воздействия $m = 0$, $\sigma = 3$

Fig. 9. Graph of error on the X-axis during random perturbation $m = 0$, $\sigma = 3$

С ростом дисперсии величина ошибки также возрастает, однако система, в исследуемом диапазоне параметров, остается устойчивой.

Выводы

1. Разработана структура малогабаритного беспилотного мобильного комплекса (МБПК), управление движением которого осуществляется винтовыми движителями с переменным вектором тяги и рулей направления и глубины, для высокоточного перемещения по траектории для забора проб воды в за-

данных точках водоема, как на поверхности, так и на заданной глубине.

2. Предложен метод модульного планирования траектории движения в виде кусочно-линейных отрезков траектории на основе модуля 2R2P, состоящего из двух прямолинейных движений и двух вращений в характерных точках траектории.

3. Исследована реакция МБПК для различных внешних возмущений. Показано, что система устойчива в широком диапазоне изменения параметров.

Список литературы

1. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 1 (15). С. 4–16.
2. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' RealTime Behavior / S. Melman, V. Bobkov, A. Inzartsev, A. Pavin // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.

3. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform) // Proceedings of the OCEANS'16 MTS/IEEE Conference. Monterey, USA, 2016.

4. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 39–47.

5. Reconfigurable Webbased Simulation Environment for AUV / A. Pavin, A. Inzartsev, G. Eliseenko, O. Lebedko, M. A. Panin // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.

6. Реконфигурируемая кроссплатформенная среда моделирования поведения необитаемого подводного аппарата / А.В. Инзарцев, А.М. Павин, Г.Д. Елисеенко, Д.Н. Родькин, А.В. Сидоренко, О.А. Лебедко, М.А. Панин // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 2 (20). С. 28–34.

7. Pavin A. Underwater Object Recognition in Photo Images // Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference. Washington DC, USA, 2015.

8. Распознавание и обследование малоразмерных подводных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов / А.В. Инзарцев, А.М. Павин, О.А. Лебедко, М.А. Панин // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 36–43.

9. Князев С. И., Маслов А. А., Яцун С. Ф. Математическая модель малогабаритного беспилотного подводного комплекса для экологического мониторинга водоемов // XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2019). М., 2020. С. 480-483.

10. Князев С.И., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Управляемое движение малогабаритного подводного робототехнического комплекса (МБПК) // Балтийский морской форум. Материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2019. С. 40-45.

11. Князев С. И., Яцун А. С., Яцун С. Ф. Управляемое движение малогабаритного подводного робототехнического комплекса (МБПК) // Балтийский морской форум. Материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2019. С. 40-45.

12. Ефимов С. В., Князев С. И., Яцун С. Ф. Изучение управляемого движения малогабаритного подводного комплекса – анализатора загрязнений акватории // Cloud of Science. 2020. Т.7, №3. С.488-497.

13. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982. 392 с.

14. Лурье Б.Я., Энрайт П. Дж. Классические методы автоматического управления / под ред. А.А.Ланнэ. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 640 с.

15. Schweppe F. Uncertain dynamic systems. Englewood Cliffs; N.J.: Prentice Hall, 1973. 563 с.
16. Куржанский А.Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1977. 392 с.
17. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988. 321с.
18. Солодовников В.В. Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Мир, 1999. 495 с.
19. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. М.: Наука, 1987. 304 с.
20. Левин В. И. Оптимальное проектирование в условиях неопределенности. Метод детерминизации // Онтология проектирования. 2013. № 3 (9). С. 41–52.

References

1. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Bagnitsky A.V. Planirovanie i osushchestvlenie deistvii obsledovatel'skogo podvodnogo robota na baze povedencheskikh metodov [Planning and implementation of actions of a survey underwater robot based on behavioral methods]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*, 2013, no. 1 (15), pp. 4-16 (In Russ.).
2. Melman S., Bobkov V., Inzartsev A., Pavin A. Distributed Simulation Framework for Investigation of Autonomous Underwater Vehicles' RealTime Behavior. *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference*. Washington DC, USA, 2015.
3. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G. Reconfigurable Distributed Software Platform for a Group of UUVs (Yet Another Robot Platform). *Proceedings of the OCEANS'16 MTS/IEEE Conference*. Monterey, USA, 2016.
4. Kostenko V. V., Pavin A.M. Avtomaticheskoe pozitsionirovanie neobitaemogo podvodnogo apparata nad ob"ektami morskogo dna s ispol'zovaniem fotoizobrazhenii [Automatic positioning of an uninhabited underwater vehicle over objects of the sea floor using photo images]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*, 2014, no. 1(17), pp. 39-47 (In Russ.).
5. Pavin A., Inzartsev A., Eliseenko G., Lebedko O., Panin M. A Reconfigurable Web-based Simulation Environment for AUV. *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference*. Washington DC, USA, 2015.
6. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Eliseenko G. D., Rodkin D. N., Sidorenko A.V., Lebedko O. A., Panin M. A. Rekonfiguriruemaya krossplatformennaya sreda modelirovaniya povedeniya neobitaemogo podvodnogo apparata [Reconfigurable cross-platform environment for modeling the behavior of an uninhabited underwater vehicle]. *Podvodnye issledo-*

vaniya i ro-bototekhnika = Underwater Research and Robotics, 2015, no. 2 (20), pp. 28-34 (In Russ.).

7. Pavin A. Underwater Object Recognition in Photo Images. *Proceedings of the OCEANS'15 MTS/IEEE Conference*. Washington DC, USA, 2015.

8. Inzartsev A.V., Pavin A.M., Lebedko O. A., Panin M. A. Raspoznavanie i obsledovanie malorazmernykh podvodnykh ob"ektov s pomoshch'yu avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Recognition and survey of small-sized underwater objects using Autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater Research and Robotics*, 2016, no. 2 (22), pp. 36–43 (In Russ.).

9. Knyazev S. I., Maslov A. A., Yatsun S. F. [Mathematical model of a small-sized unmanned underwater complex for environmental monitoring of reservoirs]. *XXXI Mezhdunarodnaya innovatsionnaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS-2019)* [XXXI international innovative conference of young scientists and students on machine science (MICMUS-2019)]. Moscow, 2020, pp. 480-483 (In Russ.).

10. Knyazev S. I., Yatsun A. S., Yatsun S. F. [Controlled movement of a small-sized underwater robotic complex (MBPC)]. *Baltiiskii morskoi forum. Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma* [Collection "Baltic sea forum". Materials of the VII international Baltic sea forum]. Kaliningrad, 2019, pp. 40-45 (In Russ.).

11. Knyazev S. I., Yatsun A. S., Yatsun S. F. [Controlled movement of a small-sized underwater robotic complex (MBPC)]. *Baltiiskii morskoi forum. Materialy VII Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma* [Collection "Baltic sea forum". Materials of the VII international Baltic sea forum]. Kaliningrad, 2019, pp. 40-45 (In Russ.).

12. Efimov S. V., Knyazev S. I., Yatsun S. F. Izuchenie upravlyaemogo dvizheniya malogabaritnogo podvodnogo kompleksa - analizatora zagryaznenii akvatorii [Study of controlled movement of a small-sized underwater complex-water pollution analyzer]. *Cloud of Science*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 488-497 (In Russ.).

13. Basharin A.V., Novikov V. A., Sokolovsky G. G. *Upravlenie elektroprivodami* [Management of electric drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 392 p. (In Russ.)

14. Lurie B. Ya., Enright P. J. *Klassicheskie metody avtomaticheskogo upravleniya* [Classical methods of automatic control]. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2004. 640 p. (In Russ.).

15. Schweppe F. Uncertain dynamic systems. Englewood Cliffs; N. J.: Prentice Hall, 1973. 563 p.

16. Kurzhansky A. B. *Upravlenie i nablyudenie v usloviyakh neopredelennosti* [Management and observation in conditions of uncertainty]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 1977. 392 p. (In Russ.).

17. Chernousko F. L. *Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem* [Estimation of the phase state of dynamical systems]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 321 p. (In Russ.).

18. Solodovnikov V. V. *Avtomaticheskoe upravlenie i vychislitel'naya tekhnika* [Automatic control and computer technology]. Moscow, Mir Publ., 1999. 495 p. (In Russ.).
19. Levin V. I. *Strukturno-logicheskie metody issledovaniya slozhnykh sistem s primeneniem EVM* [Structural and logical methods of studying complex systems using computers]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 304 p. (In Russ.).
20. Levin V. I. Optimal'noe proektirovanie v usloviyakh neopredelennosti. Metod determinizatsii [Optimal design under uncertainty. The method of determinization]. *Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology*, 2013, no. 3 (9), pp. 41-52 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондырев Владимир Евгеньевич, доктор педагогических наук, ведущий научный сотрудник НИИ РЭС, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Vladimir E. Bondyrev, Dr. of Sci. (Pedagogical), Leading Researcher of the Research Institute of RES, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Князев Сергей Иванович, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Sergey I. Knyazev, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Королёв Владимир Иванович, аспирант, вице-президент Объединённой судостроительной компании по военному кораблестроению, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru

Vladimir I. Korolev, Post-Graduate Student, Department of Mechanics, Vice-President of the United Shipbuilding Company for Military Shipbuilding Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru

Яцун Сергей Федорович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Sergei F. Yatsun, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: teormeh@inbox.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7420-0772>

Взаимодействие человека и работа в коллаборативных робототехнических системах

Р.Р. Галин¹ ✉, В.В. Серебряный², Г.К. Тевяшов¹, А.А. Широкий¹

¹ Лаборатория киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук
ул. Профсоюзная 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1, г. Москва 105005, Российская Федерация

✉ e-mail: grr@ipu.ru

Резюме

Цель исследования заключается в поиске разрешимых постановок задач повышения эффективности коллаборативного взаимодействия людей и роботов в эргатических робототехнических системах, или, по-другому, в коллаборативных робототехнических системах.

Методы. Для достижения поставленной цели проведён комплексный анализ работ, опубликованных в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях с открытым доступом. В § 1 приведены основные термины и понятия коллаборативной робототехники и обсуждается их текущее понимание в исследовательском сообществе. Описана структура рабочих пространств в зоне взаимодействия человека и робота, перечислены критерии отнесения робота к классу коллаборативных. В § 2 описаны критерии безопасного взаимодействия человека и робота в едином рабочем пространстве. В § 3 обсуждаются различные основания классификаций взаимодействий человека и робота в коллаборативных РТС.

Результаты. Значительная часть опубликованных работ по коллаборативной робототехнике посвящена организации безопасного взаимодействия человека и робота, а вопросам повышения эффективности такого взаимодействия пока уделяется значительно меньше внимания. Весьма актуальной задачей в проблеме повышения эффективности коллаборативных робототехнических систем является идентификация задач, аналогичные которым уже решались в других предметных областях – в частности, в области управления организационными системами. В § 4 обоснована возможность использования термина «команда» для коллаборативных роботов в коллаборативной РТС. В § 5 предложена формальная постановка задачи оптимального распределения работ в команде коллаборативных роботов, аналогичная задаче формирования неоднородной команды в теории управления организационными системами.

Заключение. Предложенная постановка задачи оптимального распределения работ в команде коллаборативных роботов показывает возможность использования для управления коллаборативными робототехническими системами с целью повышения эффективности взаимодействия людей и роботов результатов, полученных в рамках группы математических моделей формирования и функционирования команд. Представляется перспективным продолжить поиск в направлении адаптации моделей и механизмов управления теории управления организационными системами и методологии комплексной деятельности.

Ключевые слова: коллаборативный робот; робототехническая система; интеллектуальный агент; распределение функций; эффективность; безопасное взаимодействие; взаимодействие человека и робота.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19-01-00767.

Для цитирования: Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах / Р.Р. Галин, В.В. Серебранный, Г.К. Тевяшов, А.А. Широкий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 180-199. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-180-199>.

Поступила в редакцию 19.10.2020

Подписана в печать 25.11.2020

Опубликована 30.12.2020

Human-robot Interaction in Collaborative Robotic Systems

Rinat R. Galin ¹ ✉, Vladimir V. Serebrennyj ², Gleb K. Tevyashov ¹,
Alexander A. Shiroky ¹

¹ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
65 Profsoyuznaya st., Moscow 117997, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University
5/1 2nd Baumanskaya st., Moscow 105005, Russian Federation

✉ e-mail: grr@ipu.ru

Abstract

Purpose or research is to find solvable tasks for increasing the effectiveness of collaborative interaction between people and robots in ergatic robotic systems, or, in other words, in collaborative robotic systems.

Methods. A comprehensive analysis of works published in highly rated peer-reviewed open-access scientific publications was carried out to achieve this goal. Main terms and concepts of collaborative robotics are described in § 1 and their current understanding in the research community is also described. The structure of workspaces in interaction zone of a person and robot is described. The criteria for assigning robot to the class of collaborative ones are also described. The criteria for safe interaction of a person and robot in a single workspace is described in § 2. Various grounds for classifying human-robot interactions in collaborative RTAs are described in § 3.

Results. A significant part of published works about collaborative robotics is devoted to the organization of safe man and robot interaction. Less attention is paid to the effectiveness improvement of such interaction. An up-to-date task in the problem of efficiency improvement of collaborative robotic systems is the identification of tasks that have already been solved in other areas - in particular, in the field of organizational systems management. The possibility of using the term "team" for collaborative robots in a collaborative PTC is stated in § 4. A formal problem setting of optimal distribution in teamwork of collaborative robots, similar to the problem of heterogeneous team formation in the theory of organizational systems management is proposed in § 5.

Conclusions. Proposed task setting of optimal distribution of works in collaborative robots' team shows possibility of using results obtained in group of mathematical models of commands formation and functioning for control of collaborative robotic systems in order to increase efficiency of people and robots interaction. It is prospectively to continue the search for adapting models and governance mechanisms to the theory of organizational system management and integrated activities methodology.

Keywords: collaborative robot; robotic system; intelligent agent; distribution of functions; efficiency; safe interaction; human-robot interaction.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work was carried out with the partial support of RFFI, grant No. 19-01-00767.

For citation: Galin R. R., Serebrennyj V. V., Tevyashov G. K., Shiroky A. A. Human-robot Interaction in Collaborative Robotic Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 180-199 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-180-199>.

Received 19.10.2020

Accepted 25.11.2020

Published 30.12.2020

Введение

Роботизация подразумевает освобождение человека от выполнения тяжелого и опасного труда, что приводит к повышению производительности процесса производства и снижения происшествий на промышленных объектах. Однако в связи с бурным развитием киберфизических систем и технологий к настоящему времени фокус внедрения роботов сместился от специальных производственных роботов к коллаборативным и социальным. Это значит, что уже сейчас приходится говорить не столько о роботизации производства, сколько о широком внедрении роботов во все сферы жизни и деятельности человека.

Традиционно среди всего разнообразия различных роботов принято выделять три основных класса — промышленных, коллаборативных и сервисных роботов. Некоторые исследователи включают класс коллаборативных роботов в класс промышленных роботов (как частный случай), что не является правильным ни с точки зрения классификации, ни с точки зрения их назначения. Кроме того, в настоящее время активное развитие получили так называемые социальные роботы — роботы (чаще антропоморфного или зооморфного типа), ориентированные на

социальное взаимодействие с человеком, которые имеют функции и черты, присущие как сервисным, так и коллаборативным роботам.

Несмотря на бурную роботизацию в рамках так называемой Индустрии 4.0 (4 промышленной революции), существует ряд видов деятельности, где полное замещение человеческого труда пока невозможно, но частичная его роботизация способна ускорить производственно-технологический процесс [1]. В связи с этим появилось и широко распространилось понятие взаимодействия человека и робота (human-robot interaction, HRI) или, как частный случай, коллаборативное взаимодействие (human-robot collaboration, HRC) — процесс совместной целенаправленной и безопасной деятельности человека и робота. Соответственно, роботы, используемые для этих целей, называются коллаборативными роботами или коботами.

В настоящей работе кратко описано текущее состояние коллаборативной робототехники и предлагается подход для решения задач повышения эффективности коллаборативных робототехнических систем (РТС). Этот аспект пока мало затрагивается исследовательским сообществом — основная масса работ посвящена организации и управлению безопасностью коллаборативных РТС.

Структура изложения материала в работе следующая. § 1 посвящён понятию «коллаборативный робот». Обсуждаются его трактовки в литературе, а также ключевые отличия от других классов робототехнических систем. В § 2 описаны критерии безопасного взаимодействия человека и робота в едином рабочем пространстве. В § 3 обсуждаются различные основания классификаций взаимодействий человека и робота в коллаборативных РТС. В § 4 обоснована возможность использования термина «команда» для коботов в коллаборативной РТС. В § 5 предложена формальная постановка задачи формирования неоднородной команды коботов, сводящаяся к решению задачи оптимизации.

Предложенная формальная постановка задачи открывает возможность использовать существующие методы решения задач оптимизации для повышения эффективности коллаборативных РТС.

Материалы и методы

1. Коллаборативные роботы и их отличительные особенности

Понятие «коллаборативное взаимодействие» обозначает процесс безопасного производственного сотрудничества человека и робота, а класс роботов, работающий таким образом – коллаборативными роботами (или коботами) [2, 3]. Термин «коллаборативный робот» претерпел ряд изменений за счет значи-

тельного прогресса в области робототехники. Первоначально термин «коллаборативный робот» использовался для обозначения промышленного манипулятора, и компания General Motors первая использовала его в рамках исследовательского проекта, в котором он означал «робота, работающего с человеком рука об руку» [4].

В зоне взаимодействия кобота и человека выделяют четыре вложенных пространства [5]:

1) максимальное — полный объем пространства с учётом объема деталей, который максимально может быть использован коботом;

2) запретное — часть максимального пространства, доступ к которому для человека ограничен при работе робота;

3) пространство операций — часть запретного пространства, которую кобот использует для совершения действий;

4) коллаборативное пространство — часть пространства операций, предназначенное для безопасного совместной деятельности человека и робота.

На сегодняшний день вектор развития области коллаборативных роботов направлен на управление множеством гетерогенных коботов в коллаборативном пространстве. Вследствие этого, к коботу — интеллектуальному агенту предъявляются требования активности, гибкой автономности, сетевой самоорганизации, прогнозирования запросов

пользователя, надёжности и некоторые другие [6].

При выполнении работ по проектированию коллаборативных РТС применяются следующие принципы (принципы HRC):

1. Операции, выполняемые коботом, должны быть безопасны по отношению к другим агентам при действии в совместном пространстве, и в первую очередь к человеку-оператору, а также к объектам внешней среды [7].

2. Робот должен приспосабливаться к человеку, а не наоборот (т. е., если коллаборативная система функционирует недостаточно эффективно, то необходимо дорабатывать именно робота, а не искать замену человеку-оператору).

3. Должны создаваться такие условия, в которых любой человек-оператор в рабочем пространстве мог бы максимально использовать возможности кобота.

4. При проектировании системы следует добиваться повышения производительности труда и снижения количества ошибок [8].

Из перечисленных принципов следуют ключевые отличия коботов от других классов робототехнических систем. Так, сервисные роботы, в отличие от коботов, не обязаны уметь работать с людьми в одном пространстве, так как могут функционировать автономно или под дистанционным управлением [9].

Промышленные роботы используются в производстве, но их эксплуата-

ция не подразумевает совместную работу с человеком. Они, по существу, являются автоматически управляемыми, перепрограммируемыми универсальными манипуляторами [10]. В то же время, коллаборативный робот предполагает обязательную интерактивную совместную работу с человеком, а сфера его применения значительно шире. Но, в отличие от промышленных роботов, коботы менее точны и более подвержены ошибкам, их движения медленнее из-за требований безопасности HRC, а их рабочее пространство меньше (табл. 1) [11].

Таким образом, для реализации принципов HRC, робот в человеко-машинном сотрудничестве должен быть безопасным, удобным в использовании, адаптивным и легко программируемым. Безопасность означает защиту людей от возможных травм при контакте с роботами во время совместной работы. Под удобством здесь понимается то, что действия робота должны соответствовать когнитивным привычкам людей, и люди смогут распознавать намерения робота. Адаптивность означает возможность робота понимать потребности людей и точно подстраиваться к движению людей и различным задачам. Простота программирования означает, что людям должно быть легко программировать, изучать методы работы и легко управлять роботом [3].

Таблица 1. Качественное сравнение коботов и промышленных роботов [11, 12]**Table 1.** Qualitative comparison of cobots and industrial robots [11, 12]

Характеристики / Specifications	Промышленные роботы / Industrial robots	Коботы / Cobots
Тип установки (обычно)	Фиксированный	Мобильный
Тип выполняемых задач	Только повторяемый	Повторяемый и неповторяющийся
Изменения задач	Редко	Часто
Взаимодействие с работником	Только во время программирования	Часто и безопасно
Выгода при мелкосерийном и односерийном производстве	Нет	Да
Доступные габаритные размеры	Маленькие или большие	Только маленькие
Скорость работы	От медленной до высокой	Медленная (ограничена в соответствии со стандартами безопасности)
Цена	Ниже	Выше
Точность работы	Ниже	Выше
Грузоподъемность	Выше	Ниже
Программируемость	Более сложная и трудоемкая	Проще и быстрее
Обслуживание (время и стоимость)	Больше	Меньше
Вес робота	Больше	Меньше
Датчики безопасности и внешних сил	Обычно отсутствует	Входит
Доступное рабочее пространство	Больше	Меньше

2. Безопасное взаимодействие человека и робота в едином рабочем пространстве

Безопасность людей-операторов в коллаборативных РТС в настоящее время рассматривается в трёх аспектах [13]:

– безопасность при столкновении должна быть обеспечена таким образом, чтобы столкновения между роботами, людьми и препятствиями были «безопасными», то есть контролируемыми. Главной целью тут является ограниче-

ние сил/воздействий, оказываемых на людей.

– активная безопасность для временного обнаружения неизбежных столкновений между людьми и оборудованием и контролируемого прекращения эксплуатации. Для этого могут быть использованы датчики приближения, системы наблюдения и датчики силы/контакта.

– адаптивная безопасность для вмешательства в работу аппаратного оборудования и применения корректирующих действий, приводящих к предотвращению столкновений без остановки работы устройства.

Обеспечение безопасности регулируется национальными и международными стандартами [13, 14]. Поскольку коллаборативное пространство (или, иначе, ячейка) включает в себя не только человека и робота, но и другие вспомогательные устройства (например, электрические отвертки, электрические зажимные устройства и т. д.), каждая ячейка содержит уникальные риски, которые необходимо снижать.

Коллаборативные роботы имеют дополнительные функции^{1,2} [14–15] (см. также рис. 1), которые регламентиру-

ются в стандартах робототехнических решений, в том числе и специально для вопросов безопасности:

«Безопасная контролируемая остановка» – робот останавливается, когда человек-оператор входит в совместное рабочее пространство, и продолжает работу, когда рабочее пространство свободно (позволяет оператору напрямую взаимодействовать с роботизированной системой при определенных обстоятельствах);

«Ручное управление» — движения робота контролируются человеком-оператором (оператор использует ручное устройство для передачи команд движения);

«Контроль скорости и разделения» – оператор и роботизированная система могут одновременно перемещаться в совместном рабочем пространстве;

«Ограничение мощности и силы» – контактные силы между человеком-оператором и движущимся роботом технически ограничены безопасным уровнем (физический контакт между системой робота и человеком-оператором может происходить как намеренно, так и непреднамеренно).

Анализ работы [16] позволяет выделить две группы методов, обеспечивающих требуемый уровень безопасности во всех обозначенных выше аспектах. Во-первых, это методы управления в технических системах, к которым отнесены следующие [16]:

Управление движением – до контакта с человеком и после. Прекол-

¹ ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”. Homepage: <https://www.iso.org/standard/62996.html>, last accessed 2020/10/20.

² ISO 10218-1, 2:2011 “Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1, 2: Robot systems and integration”, Geneva. 2011.

лизионные методы заключаются в ограничении основных параметров робота (скорость, энергия, и т. п.) или в предотвращении столкновений с помощью ме-

тодов, включающих определение зон безопасности, отслеживание расстояния разделения и направление движения робота в сторону от людей.

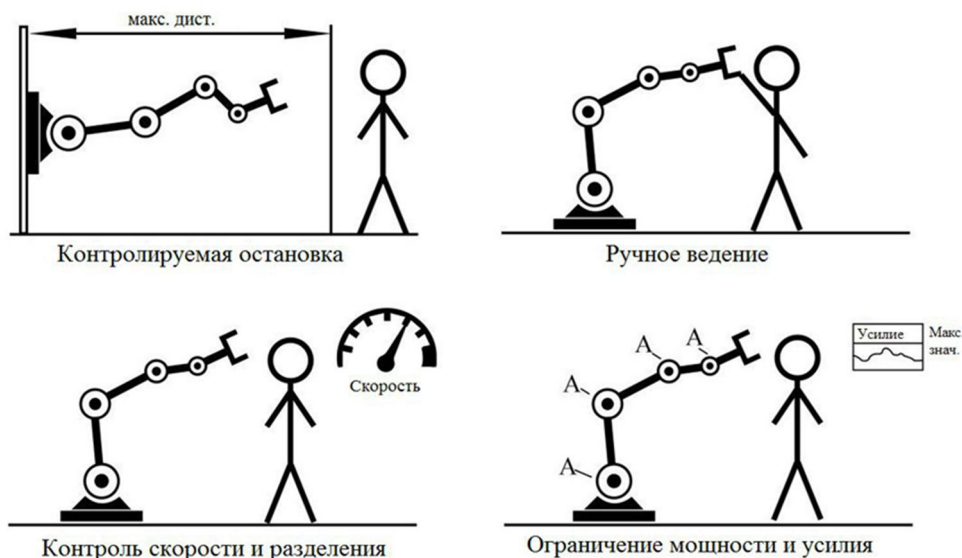


Рис. 1. Дополнительные функции коллаборативных роботов, направленные на обеспечение безопасности человека-оператора

Fig 1. Additional functions of collaborative robots aimed at ensuring the safety of the human operator

Пост-коллизийные методы включают в себя различные способы минимизации травм путем переключения между различными методами управления при обнаружении столкновения. Кроме того, для эффективного сотрудничества различают намеренный и ненамеренный контакт и допускают безопасный физический контакт.

Планирование движения. Цель — планирование безопасных траекторий движения робота для избегания потенциальных столкновений. Для этого учитываются различные параметры, связанные с человеком (расстояние между роботом и человеком, направление взгляда при формировании планов движения и др.).

Предсказание движений человека.

Такой прогноз включает в себя возможные действия и движения человека и строится с помощью различных методов, включая сопоставление последовательностей, вероятностное распознавание плана и анализ характеристик движения. Необходимо учитывать предсказуемость робота, поскольку при многоагентном взаимодействии роль робота так же важна, как роль оператора.

Во-вторых, это методы организационного управления. В [16] предлагается проводить анализ психологических характеристик операторов с помощью физиологического зондирования, вопросников и поведенческих показателей, идентификации. Авторы отмечают, что

важно понимать психофизиологическое состояние человека во время взаимодействия с роботом, которое могло бы предотвратить возможный вред. Например, такие факторы, как боязнь работы с роботом, усталость, плохой опыт взаимодействия и другие.

3. Взаимодействие человека и робота

Концептуально, взаимодействие человека и робота и рабочий процесс в коллаборативно РТС можно разбить на следующие классы [17, 18]:

- сосуществование;
- кооперация;
- коллаборация.

При этом класс взаимодействий определяется четырьмя атрибутами [17, 18]:

- рабочее время;
- рабочее пространство;
- общая цель;
- физический контакт.

Соотношение классов и атрибутов взаимодействия показано на рис. 2.

В представленной концепции классификации взаимодействий рабочее время определяется как время, в течение которого человек и робот взаимодействуют в рабочем пространстве. Если существует общее время в одном рабочем пространстве, то данное взаимодействие представляет собой сосуществование человека и робота.

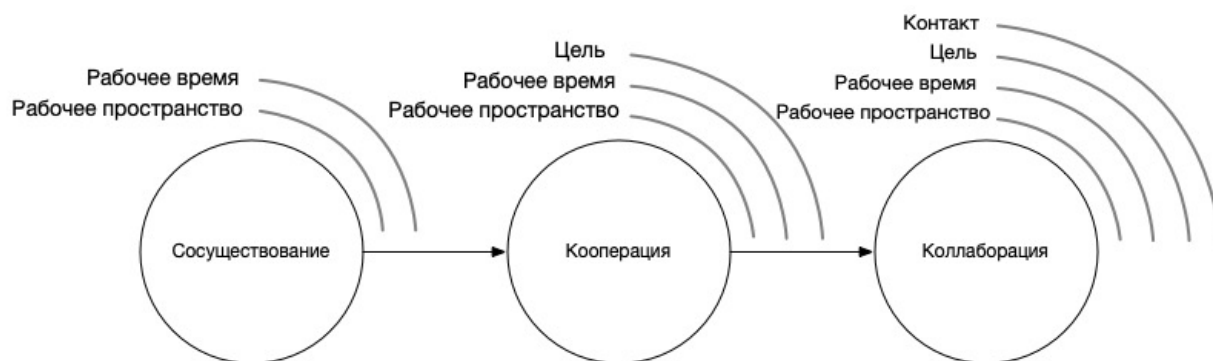


Рис. 2. Классификация взаимодействия человека и робота

Fig. 1. Human-robot interaction classification

При условии единой цели взаимодействия, человек и робот могут иметь различные задачи (сотрудничество), а если происходит прямой контакт (например, тактильный или слуховой), то взаимодействие может быть обозначено как коллаборация человека и робота.

Другие основания классификаций взаимодействий человека и робота представлены в табл. 2 [19].

В работе [24] предложено дополнительное основание классификации взаимодействий — автономность участников коллаборативной РТС. Выстроенные отношения лидер — последователь выражают, насколько действия робота непосредственно определяются со стороны человека-оператора, или какой участник берет на себя ведущую роль в данной задаче.

Таблица 2. Основания классификации взаимодействий человека и робота**Table 2.** Grounds for classifying human-robot interactions

Категория / Category	Описание / Description
По типу задач	В зависимости от поставленной задачи, проектируется и используется система. Таким образом, задача должна быть идентифицирована как часть классификации системы. Тип задачи позволяет неявно представить среду робота
По уровню критичности задачи	Критичность задачи измеряет важность правильного выполнения задачи с точки зрения ее негативных последствий в случае возникновения проблем. Ошибки в работе коллаборативного робота могут привести к летальному исходу при взаимодействии человека и робота. Поэтому, критичность задачи определяется мерой субъективной в рамках коллаборативной робототехники
Морфология робота	Внешний вид роботов может быть различен, в зависимости от задачи, для которой робот был создан или среды его применения. Форма и структура робота способствуют установке социальных ожиданий
Отношение людей к роботу	Отношение людей к роботам напрямую влияет на взаимодействие человека и робота в системе. Эта классификация таксономии не измеряет взаимодействие между операторами и роботами, просто отражает число каждого из них и представляется в нередуцированном дробном выражении
По составу команды	Состав может иметь значения однородные или разнородные. Гетерогенность может быть дополнительно уточнена с помощью списка, содержащего типы роботов в команде и количество каждого типа роботов, используемых в команде
По уровню совместного взаимодействия между командами	В зависимости от состава команды возможны различные сценарии взаимодействия
Роль взаимодействия	Согласно [20], распределение ролей со стороны человека при взаимодействии с роботом может быть на следующих позициях: супервайзер, оператор, член команды, программист и наблюдатель
По типу физической близости человека и робота	Согласно [21], рассматривают пять типов физической близости человека и робота при взаимодействии: избегание, прохождение, следование, приближение и прикосновение
Принятие решений	При проектировании интерфейса для взаимодействия человека и робота важным значением является информация о наличии типов датчиков на роботе и обработки информации, получаемой с датчиков

Категория / Category	Описание / Description
Пространство и время	Пространственно-временная таксономия [22] делит взаимодействие человека и робота на четыре категории в зависимости от того, используют ли люди и роботы вычислительные системы одновременно (синхронно) или в разное время (асинхронно) и находясь в одном и том же месте (совместно) или в разных местах (несогласованно)
Уровень автономности или степень вмешательства	Автономность или степень вмешательства при взаимодействии человека и робота может быть измерена тем, насколько человек может пренебречь системой [23]

Разделение по автономии или инициативе может варьироваться в зависимости от области применения. По типу

активности в коллаборативной РТС можно выделить классы, представленные на рис. 3.

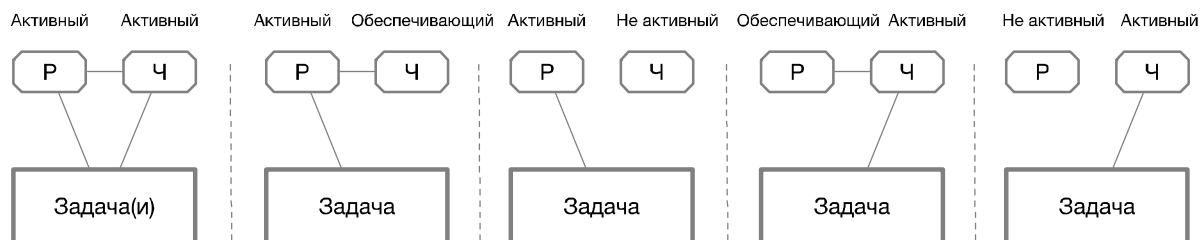


Рис. 3. Классы взаимодействия человека и робота по инициативности

Fig. 3. Classes of human-robot interaction by initiative

Следует понимать, что распределение ролей назначается до выполнения задач. В некоторых случаях могут рассматриваться адаптивные агенты, отвечающие за назначение активных или обеспечивающих участников системы.

Результат и их обсуждение

4. Многоагентные коллаборативные РТС и команды роботов

При взаимодействии участников в коллаборативной РТС необходимо учитывать два аспекта. Первый аспект – общность цели участников, второй –

автономность и согласованность действий участников в различных ситуациях при достижении цели.

Многоагентные системы представляют собой некоторое множество интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом, учитывая взаимное влияние со стороны внешней среды [25, 26]. В коллаборативных РТС в качестве интеллектуальных агентов выступают коботы. Ключевыми свойствами таких агентов являются целенаправленность и автономность, связанная с действиями на основе целена-

правленных проблемно-ориентированных рассуждений. Более подробно понятие интеллектуального агента раскрыто в работах [6, 27–29].

С другой стороны, множество коботов в коллаборативной РТС обладает характеристиками, свойственными понятию «команда» [30]:

- единство цели;
- совместная деятельность;
- непротиворечивость интересов;
- автономность деятельности;
- специализация и взаимодополняемость ролей.

Согласно [30–32], следует рассматривать два периода жизненного цикла команды — этап ее формирования и этап функционирования. По отношению к рассматриваемому классу коллаборативных РТС этап формирования разделен на определение состава участников команды и ее адаптацию в соответствии с решаемой задачей. Этап функционирования рассматривается в рамках коллаборативного пространства, стационарного функционирования.

Отметим, что большинство исследований в области коллаборативной робототехники сосредоточены на изучении последнего этапа. В то же время, на практике часто возникают задачи, относящиеся к этапу формирования команды. Всё более распространённым является формат производства, при котором требуется производить большое количество маленьких партий (или даже уникальных) изделий. Для таких производств организация коллаборативных

РТС является хорошей возможностью оптимизировать затраты и повысить качество продукции. Можно с уверенностью утверждать, что в дальнейшем таких производств будет всё больше, а специфические для них задачи — всё более актуальными [33 – 35].

Ниже предложена общая постановка задачи формирования неоднородной команды коботов для выполнения заданного объёма работ различных видов (по аналогии с [31]).

5. Формирование неоднородной команды в коллаборативной РТС

Рассмотрим коллаборативную РТС, для успешного функционирования которой необходимо выполнять q различных функций (видов работ) из множества $U = \{u_k\}_{k=1}^q$. Для простоты будем предполагать, что в системе присутствует q человек-операторов, причём k -й оператор компетентен в выполнении функции $u_k \in U, k \in [1, q]$.

Для повышения эффективности операторов будем назначать им коллаборативных роботов из множества $B = \{b_i\}_{i=1}^m$. Считаем, что коботы могут выполнять любые функции, но с разной эффективностью (в том числе, возможно, нулевой). Обозначим $0 \leq r_{ik} \leq 1$ эффективность выполнения i -м коботом k -го вида работ. При этом один кобот может вначале «помогать» одному человеку-оператору, а потом — другому. Иными словами, назначенных к выполнению видов работ для каждого кобота в общем случае может быть больше одного.

Матрица $r = \|r_{ik}\|$ характеризует потенциальные возможности команды коботов по выполнению заданного набора функций / видов работ. При этом для каждого из них можно (по аналогии с [31]) ввести характеристики универсальности

$$s_i = \sum_{k=1}^q I(i, k), i \in [1, m], I(i, k) = \begin{cases} 0, & \text{если } r_{ik} = 0 \\ 1, & \text{если } r_{ik} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

– средней эффективности

$$\bar{r}_i = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q r_{ik}, i \in [1, m], \quad (2)$$

– специализированности

$$d_i = \sqrt{\frac{1}{q-1} \sum_{k=1}^q (\bar{r}_i - r_{ik})^2}, i \in [1, m]. \quad (3)$$

Для команды в целом можно посчитать характеристики средней эффективности выполнения каждого вида работ

$$R_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_{ik}, k \in [1, q], \quad (4)$$

а также неоднородности

$$D = \frac{1}{2mq(m-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^q |r_{ik} - r_{jk}|. \quad (5)$$

Предположим, что требуемые к выполнению объемы работ заданы вектором $V = (V^1, \dots, V^q)$, $V^k \geq 0, k \in [1, q]$. Будем считать, что выполнение коботами тех или иных объемов работ приводит к появлению некоторых затрат, зависящих от объемов назначенных работ каждого вида и соответствующего значения эффективности данного кобота (содержательно их можно интерпретировать, например, как время выполне-

ния). Пусть эти зависимости описаны неотрицательными, монотонно возрастающими по первому аргументу и монотонно убывающими — по второму, функциями $c_i(x_i, r_i)$, где x_i — назначенный объем работ некоторого вида, а r_i — соответствующее данному виду работ значение эффективности i -го кобота. При этом установим, что $c_i(0, \cdot) = 0$.

Если выполнены условия

– любой кобот может выполнить любой неотрицательный объем работ каждого вида;

– функции затрат аддитивны по различным видам работ,

– то можно поставить задачу оптимального в смысле минимизации затрат коллаборативной РТС распределения работ между коботами:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^q c_i(x_{ik}, r_{ik}) \rightarrow \min_{\{x_{ik} \geq 0\}}, \\ \sum_{i=1}^m x_{ik} = V^k, k \in [1, q]. \end{cases} \quad (6)$$

Данная задача рассматривалась в [31] для случая человеческих команд с функциями затрат вида обобщённых производственных функций Кобба-Дугласа:

$$c_i(x_i, r_i) = \sum_{k=1}^q r_{ik} \varphi\left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right), i \in [1, m], \quad (7)$$

где $\varphi(\cdot)$ — возрастающая выпуклая гладкая функция, $\varphi(0) = 0$. На рис. 4 показано сравнение функций затрат со значениями эффективности 0,7 и 1.

В то же время, специфика коллаборативных команд требует рассмотрения постановок с учётом дополнительных факторов и ограничений, в том числе несвойственных человеческим командам.

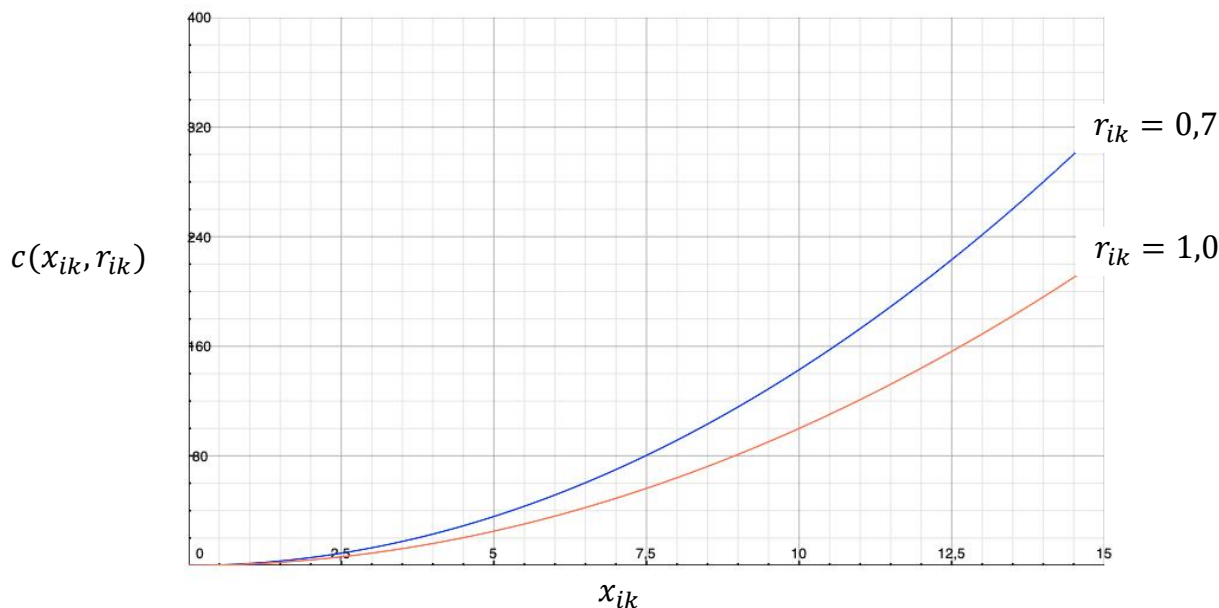


Рис. 4. Сравнение функций затрат вида (7) с $\varphi\left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right) = \left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right)^2$ на выполнение i -м коботом двух видов работ

Fig. 4. Comparison of cost functions (7) and $\varphi\left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right) = \left(\frac{x_{ik}}{r_{ik}}\right)^2$ to perform two types of work by i -th cobot

Перечислим некоторые из них:

- зависимость затрат коботов от числа роботов, назначенных на выполнение одного и того же объема работ;
- зависимость эффективности кобота от того, с каким человеком-оператором он взаимодействует;
- неаддитивность затрат по видам работ (например, появление дополнительных затрат при переходе от одного вида к другому).

Отметим, что предложенная выше общая постановка может быть модифицирована для учёта всех перечисленных факторов и ограничений. Решать такие задачи можно, применяя методы теории оптимизации.

Выводы

Значительная часть опубликованных работ по коллаборативной робото-

технике посвящена организации безопасного взаимодействия человека и робота. В то же время, вопросам повышения эффективности такого взаимодействия уделяется значительно меньше внимания. В настоящей работе предложен подход к повышению эффективности коллаборативных робототехнических систем через управление их составом на основе выполняемых ими функций и объемов работ. Для этого обоснована возможность использования термина «команда» для участников коллаборативной РТС и предложена формальная постановка задачи формирования неоднородной команды в коллаборативной РТС, сводящаяся к решению задачи оптимизации.

Список литературы

1. Galin R., Meshcheryakov R. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics // ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science. 2019. Vol 11659. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
2. Ермишин К.В., Ющенко А.С. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. №3(12). С. 3-9.
3. Galin R., Meshcheryakov R. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) // Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020. Vol 187. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_14.
4. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (Дата обращения 20.10.2020).
5. Mihelj M., et al. (2018). Collaborative Robots. Robotics. P. 173–187. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12.
6. Sycara K., Pannu A., Williamson M. Distributed Intelligent Agents // IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications. 1996. Vol. 11. № 6. P. 36–46.
7. Franklin C. S. et al. Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace // Journal of Safety Research. 2020. Vol. 73. P. 1-8. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands.
8. Konz S. Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons, Inc., 1990.
9. Paluch S., Wirtz J., Kunz W.H. Service Robots and the Future of Services. In: Bruhn M., Burmann C., Kirchgeorg M. (eds) Marketing Weiterdenken. Springer Gabler, Wiesbaden. 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-31563-4_21.
10. Конюховская А., Цыпленкова В. Рынок робототехники: угрозы и возможности для России. М., 2020.
11. Matúšová M., Bučányová M., Hrušková E. The future of industry with collaborative robots // MATEC Web of Conferences. Vol. 299. P. 1-6. EDP Sciences, Les Ulis, France (2019).
12. Knudsen M., Kaivo-oja J. Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature. In: Taşkın, H., Erden, C., Uygun, Ö. (eds.) // Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications. 2020. Vol. 3(2). P. 13-20. Harun Taşkın, Turkey.
13. Michalos G., et al. Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces // Procedia CIRP. 2015. №37. P. 248–253. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014.

14. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications / V. Villani, F. Pini, F. Leali, C. Secchi // *Mechatronics* 55. 2018. P. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.
15. Galin R.R., Meshcheryakov R.V. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020. Vol 272. Springer, Cham.
16. Lasota P., Shah J. Analyzing the effects of human-aware motion planning on close-proximity human-robot collaboration // *Human Factors*. 2015. №57(1). P. 21-33.
17. Schmidtler A., et al. Human Centered Assistance Applications for the working environment of the future // *Occupational Ergonomics*. 2015. № 12(3). P. 83-95.
18. Hoffman G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2019. P. 1–10. DOI:10.1109/THMS.2019.2904558.
19. Holly A., Yanko Jill, D. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy // *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2004. P. 2841-2846.
20. Scholtz J. Theory and Evaluation of Human Robot Interactions.” *Hawaii International Conference on System Science* 36 (HICSS 36). Hawaii, January 2003.
21. Huttenrauch H., Eklundb K. S. Investigating socially interactive robots that give the right cues and make their presence felt // *Proceedings of the CHI 2004 Workshop on Shaping Human-Robot Interaction*, 2004. P 17 - 20.
22. Ellis C. A., Gibbs S. J., Rein G. L. Groupware: some issues and experiences” // *Communications of the ACM*. 1991. № 34(1). P. 39 - 58.
23. Goodrich M. A., Crandall J. W., Stimpson J.L. Neglect tolerant teaming: issues and dilemmas // *Proceedings of the 2003 AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments*. 2003.
24. Wang X. V., et al. Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation // *CIRP Annals*. 2017. № 66(1). P. 5–8. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.101.
25. Wooldridge, M., Jennings, N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey // *Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994)*/ Ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin: Springer Verlag, 1995. P.1-22.
26. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice // *The Knowledge Engineering Review*. 1995. Vol.10, №2. P.115-152.
27. Тимофеев А.В. Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // *Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий*. СПб.: СПИИ РАН, 1999. С. 71-81.
28. Multi-agent Robotic Sys-tems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) / S. Vorotnikov, K. Ermishin, A. Nazarova, A. Yuschenko // *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2001. Vol 11097. Springer, Cham.

29. Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г. Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // Вестник ЮНЦ РАН. 2005. Т. 1, вып. 2. С. 20-27.
30. Beer M. *Organization Change and Development: A System View*. London: Scott-Glenview: Foresman & Co, 1980.
31. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. М.: Изд-во физико-математической литературы. 2008. 184 с.
32. Бронштейн М. Управление командами для «чайников». М.: Вильямс, 2004.
33. Осипов О.Ю., Мещеряков Р.В., Шепеленко М.Г. Проектирование цифровых моделей элементов электромашинной части электромехатронных модулей робототехнических систем // Экстремальная робототехника. 2017. № 1. С. 160-164.
34. Консон Ю.А., Ронжин А.Л. Оптимизация производства для современной работы робота и человека. // Современные информационные технологии. Теория и практика. Чита: ЧГУ, 2017. С. 23-29.
35. Городецкий В.И. Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов. Обзор (Часть 2) // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. №3. С. 34–47.

References

1. Galin R., Meshcheryakov R. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol 11659. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
2. Ermishin K., Yuschenko A. Kollaborativnye mobil'nye roboty – novyi etap razvitiya servisnoi robototekhniki [Collaborative mobile robots - a new stage of development of service robotics]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = J. Robot. Tech. Cybern*, 2016, no. 3(12), pp. 3–9 (In Russ.).
3. Galin, R. Meshcheryakov R. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds). *Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol 187. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_14.
4. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. [Electronic resource]. Available at: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (accessed 20.10.2020).
5. Mihelj M., et al. Collaborative Robots. *Robotics*, 2018, pp. 173–187. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12.
6. Sycara K., Pannu A., M. Williamson. Distributed Intelligent Agents. *IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications*, 1996, vol. 11, no 6, pp. 36–46.

7. Franklin C. S. et al. Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace. *In: Journal of Safety Research*, 2020, vol. 73, pp. 1-8. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands.
8. Konz S. Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons, Inc., 1990.
9. Paluch, S., Wirtz, J., Kunz, W.H. (2020) Service Robots and the Future of Services. *In: Bruhn M., Burmann C., Kirchgeorg M. (eds) Marketing Weiterdenken*. Springer Gabler, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-31563-4_21.
10. Konyuhovskaya A., Cyplenkova V. *Rynok robototekhniki: ugrozy i vozmozhnosti dlya Rossii* [The Robotics Market: Threats and Opportunities for Russia]. Moscow, 2020 (In Russ.)
11. Matúšová M., Bučányová M., Hrušková E. The future of industry with collaborative robots. *In: MATEC Web of Conferences*, 2019, vol. 299, pp. 1-6. EDP Sciences, Les Ulis, France.
12. Knudsen, M., Kaivo-oja, J. Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature. *In: Taşkın, H., Erden, C., Uygun, Ö. (eds.). Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, 2020, vol. 3(2), pp. 13-20. Harun Taşkın, Turkey.
13. Michalos G., et al. Design Considerations for Safe Human-robot Collaborative Workplaces. *Procedia CIRP*, 2015, no. 37, pp. 248–253. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.014.
14. Villani V., Pini F., Leali F., Secchi C. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 2018, 55, pp. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.
15. Galin R.R., Meshcheryakov R.V. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. *In: Kravets A. (eds) Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*. Studies in Systems, Decision and Control, 2020, vol 272. Springer, Cham.
16. Lasota P., Shah J. Analyzing the effects of human-aware motion planning on close-proximity human-robot collaboration. *Human Factors*, 2015, no. 57(1), pp. 21-33.
17. Schmidtler A., et al. Human Centered Assistance Applications for the working environment of the future. *Occupational Ergonomics*, 2015, no. 12(3), pp. 83-95.
18. Hoffman G. Evaluating Fluency in Human–Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2019, 1–10. DOI:10.1109/THMS.2019.2904558.
19. Holly, A. Yanko, Jill D. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, pp. 2841-2846.
20. Scholtz J. Theory and Evaluation of Human Robot Interactions.” Hawaii International Conference on System Science 36 (HICSS 36). Hawaii, January 2003.
21. Huttenrauch H., Eklundb K. S. Investigating socially interactive robots that give the right cues and make their presence felt. *Proceedings of the CHI 2004 Workshop on Shaping Human-Robot Interaction*, 2004, pp. 17 - 20.
22. Ellis C. A., Gibbs S. J., Rein G. L. Groupware: some issues and experiences.” *Communications of the ACM*, 1991, no. 34(1), pp. 39 - 58.

23. Goodrich M. A., Crandall J. W., Stimpson J.L. Neglect tolerant teaming: issues and dilemmas." *In Proceedings of the 2003 AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments*. 2003.
24. Wang X. V., et al. Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation. *CIRP Annals*, 2017, no. 66(1), pp. 5–8. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.101.
25. Wooldridge M., Jennings N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. *Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages* (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994); ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin, Springer Verlag, 1995, pp.1-22.
26. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review*, 1995. vol.10, no.2, pp.115-152.
27. Timofeev A.V. [Multi-agent and intelligent management of complex robotic systems]. *Teoreticheskie osnovy i prikladnye zadachi intel-lektual'nykh informatsionnykh tekhnologii* [Theoretical foundations and applied problems of intelligent information technologies]. Saint Petersburg, SPIIRAS Publ., 1999, pp. 71-81 (In Russ.).
28. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. Multi-agent Robotic Systems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 11097. Springer, Cham.
29. Gajduk A.R., Kalyaev I.A., Kapustyan S.G. Upravlenie kollektivom intellektual'nykh ob"ektov na osnove stainykh printsipov [Managing a team of intelligent objects based on pack principles]. *Vestnik YuNTs RAN = Bulletin YNC RAS*, 2005, vol. 1, is. 2, pp. 20-27 (In Russ.).
30. Beer M. *Organization Change and Development: A System View*. London: Scott-Glenview: Foresman & Co, 1980.
31. Novikov D. A. *Matematicheskie modeli formirovaniya i funktsionirovaniya komand* [Mathematical models of formation and functioning of teams]. Moscow, 2008. 184 p. (In Russ.)
32. Bronshtejn M. *Upravlenie komandami dlya «chainikov»* [Team management for dummies]. Moscow, Vil'yams Publ., 2004 (In Russ.).
33. Osipov O. Yu., Meshcheryakov R. V., Shepelenko M. G. Proektirovanie tsifrovyykh modelei elementov elektromashinnoi chasti elektromekhatronnykh modulei robototekhnicheskikh sistem [Design of digital models of elements of the electric machine part of Electromechanical modules of robotic systems]. *Ekstremal'naya robototekhnika = Extreme Robotics*, 2017, no. 1, pp. 160-164 (In Russ.).
34. Konson Yu.A., Ronzhin A.L. [Production optimization for modern robot and human operation]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii. Teoriya i praktika* [Modern information technologies. Theory and practice]. Tchita, 2017, pp. 23-29 (In Russ.).
35. Gorodeckij V.I. Teoriya, modeli, infrastruktury i yazyki spetsifikatsii komandnogo povedeniya avtonomnykh agentov. Obzor (Chast' 2) [Theory, models, infrastructures, and

languages of specification of command behavior of Autonomous agents. Overview (Part 2)]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii = Artificial Intelligence and Decision Making*, 2011, no.3, pp. 34–47 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Галин Ринат Романович, научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Москва, Российская Федерация, e-mail: grr@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6429-7868>

Rinat R. Galin, Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Moscow, Russian Federation, e-mail: grr@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6429-7868>

Серебрянный Владимир Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой СМ-7 «Робототехнические системы и мехатроника», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vsereb@bmstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1182-2117>

Vladimir V. Serebrennyj, Cand. of Sci. (Engineering), Head of SM-7 Robotic systems and mechatronics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: vsereb@bmstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1182-2117>

Тевяшов Глеб Константинович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: tgk@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3949-4936>

Gleb K. Tevyashov, Post-Graduate Student, Junior Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: tgk@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3949-4936>

Широкий Александр Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории киберфизических систем Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: shiroky@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9130-5541>

Alexander A. Shiroky, Cand. of Sci. (mathematics), Senior Researcher, Cyberphysical Systems Lab., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: shiroky@ipu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9130-5541>

Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата

В.В. Нгуен¹ ✉, Е.Е. Усина²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская 67, лит. А, г. Санкт-Петербург 190000, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук 14 линия В.О., 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: vinhnguyen.tccnqp@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Повышение точности наведения робототехнического захвата, установленного на беспилотном летательном аппарате, и стабильности всей комбинированной воздушной манипуляционной системы является основной целью данного исследования. Для достижения указанной цели была решена частная задача разработки системы управления манипулятором, которая учитывает совместное рабочее пространство манипулятора и беспилотного летательного аппарата.

Методы. В данной работе предложена кинематическая модель манипулятора с тремя степенями свободы, которая является частью воздушной манипуляционной системы квадрантора. Поворотное движение двух последовательных звеньев выполняется с помощью шарнирного соединения. Для данного манипулятора были решены прямая и обратная задача кинематики, а также получены уравнения для динамической модели. Динамический отклик каждого звена достаточен для быстрой стабилизации системы с небольшим перерегулированием. На основе этих данных для управления манипулятором был разработан самонастраивающийся нечеткий пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор. Система управления для каждого звена манипулятора состоит из ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-вывода с использованием метода Мамдани.

Результаты. Было проведено моделирование разработанной системы управления манипулятором при отсутствии возмущений. Показано, что предложенная система управления удовлетворяет заданным требованиям и обеспечивает непрерывное и плавное перемещение звеньев манипулятора по рассчитанной траектории.

Заключение. Разработанный метод управления движением трехзвенного манипулятора обеспечивает горизонтальный сдвиг центра масс не более 1,25 мм, что является приемлемым результатом для быстрой стабилизации беспилотным летательным манипулятором и проведения дальнейших практических экспериментов.

Ключевые слова: беспилотный летательный манипулятор; воздушная манипуляционная система; манипулятор; робототехника; нечеткий ПИД-регулятор; центр масс; БЛА.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Нгуен В.В., Усина Е.Е. Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 200-216. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-200-216>.

Поступила в редакцию 21.09.2020

Подписана в печать 14.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Dynamic Models of Unmanned Aerial Vehicle Manipulator Control and Stabilization

Van V. Nguyen¹ ✉, Elizaveta E. Usina²

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI)
67, Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg 190000, Russian Federation

² St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
39, 14th Line, St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: vinhnguyen.tccnqp@gmail.com

Abstract

Purpose or research. Improving guidance accuracy of robotic capture mounted on an unmanned aerial vehicle and the stability of combined aerial manipulation system is the main objective of this study. In order to achieve this goal, a particular task of developing a manipulator control system that considers joint working space of manipulator and unmanned aerial vehicle has been solved.

Methods. Kinematic model of a manipulator with three degrees of freedom is proposed in this work. This is a part of air manipulation system of quadrotor. Rotary movement of two successive links is performed by means of hinge joint. Direct and inverse kinematic tasks were solved for this manipulator. Equations for dynamic model were also obtained. Dynamic response of each link is sufficient for quick stabilization of the system with little re-adjustment. Self-tuning fuzzy proportional-integral-differentiating (PID) regulator was developed based on these data to control the manipulator. Control system for each manipulator link consists of a PID regulator and a fuzzy PID output using Mamdani method.

Results. Simulation of developed manipulator control system was carried out in the absence of disturbances. The proposed control system satisfies specified requirements and ensures continuous and smooth movement of manipulator links in calculated trajectory.

Conclusion. The developed three-link manipulator motion control method provides a horizontal mass center shift not more than 1.25 mm, which is an acceptable result for rapid stabilization of unmanned aerial manipulator and further practical experiments.

Keywords: unmanned aerial manipulator; air manipulation system; manipulator; robotics; fuzzy PID regulator; center of mass; UAV.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Nguyen V. V., Usina E. E. Dynamic Models of Unmanned Aerial Vehicle Manipulator Control and Stabilization. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 200-216 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-200-216>.

Received 21.09.2020

Accepted 14.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БЛА) оснащены вы-

сокоёмкими аккумуляторами, за счет чего обладают большей грузоподъем-

ностью. Это позволяет устанавливать на БЛА различные механизмы, например, манипуляторы для выполнения задач физического взаимодействия с объектами окружающей среды [1]. Комбинированная система, объединяющая БЛА и манипулятор, в литературе часто называется беспилотным летательным манипулятором (БЛМ) или воздушной манипуляционной системой [2, 3, 4]. БЛМ представляет собой сложную систему, состоящую из БЛА и манипулятора с рабочим концевым механизмом. Поскольку для выполнения данных задач необходимым условием является возможность точного позиционирования БЛА в воздушном пространстве, то в таком случае в качестве БЛА используются мультироторы, которые способны двигаться в любом направлении при различных скоростях, а также зависать над объектами в отличие от прочих моделей летательных аппаратов [5].

Большинство существующих конструкторских решений манипуляционных систем БЛА представляют собой манипулятор с несколькими степенями свободы, на конце которого установлены один или несколько различных захватных механизмов, позволяющих удерживать предметы разнообразных форм [6-10]. Рассмотрим некоторые существующие системы управления БЛМ. Так, например, в работе [11] БЛМ состоит из двухзвенного манипулятора, прикрепленного к нижней части квадрантора, способного нести массивную полезную нагрузку. Контроллер системы управ-

ления был разработан на основе надежного внутреннего контура компенсации (Robust Internal-loop Compensator) и по результатам моделирования управления доказал свою эффективность перед регулятором с нечеткой логики (РНЛ) по следующим параметрам: высокая скорость вычислений и возможность подавления помех.

В работе [12] тестирование различных регуляторов для робота-манипулятора с 3 степенями свободы показало, что пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор и пропорционально-дифференцирующий (ПД) регулятор работают лучше, чем РНЛ, с точки зрения времени нарастания и времени установления, в то время как РНЛ показывает меньшее время перерегулирования.

В работе [13] для управления манипулятором с 2 степенями свободы был использован нечеткий самонастраивающийся ПИД-регулятор. По сравнению с традиционным ПИД-регулятором, данный регулятор превосходит его по следующим параметрам: меньшее время отклика, небольшое перерегулирование и высокая стабилизация, хорошие статические и динамические характеристики. Данные результаты указывают на то, что традиционный ПИД-регулятор не может обеспечить высокую точность из-за нелинейности системы. Эффективность работы нечеткого ПИД-регулятора перед традиционным ПИД-регулятором также была доказана в [14, 15].

В [16] для манипулятора с 2 степенями свободы были разработаны четыре регулятора: ПИД-регулятор, нечеткий регулятор Мамдани, нечеткий регулятор Сугэно, гибридный нечеткий регулятор, сочетающий ПИД и нечеткий регулятор Мамдани. Нечеткий регулятор Сугэно показал максимальную скорость и крутящий момент, но при этом имел ошибку положения суставов установившегося состояния. Наибольшая точность определения рабочей точки была достигнута при использовании нечеткого гибридного управления.

В данном исследовании была предложена система управления звеньями манипулятора с 3 степенями свободы, устанавливаемого на квадатор. Управление осуществляется с помощью нечеткого ПИД-регулятора и учитывает особенности конструкции БЛМ.

Материалы и методы

В ходе исследования в первую очередь было предложено решение прямой задачи кинематики для манипулятора, состоящего из 3 звеньев с 3 степенями свободы. Для поворотного движения двух последовательных звеньев между ними установлено шарнирное соединение (рис. 1). Две последовательные оси шарниров вращения параллельны друг другу. Манипулятор имеет 3 звена весом по 0,15 кг и следующими размерами: $M_1 = 0,15$ м, $M_2 = 0,30$ м, $M_3 = 0,15$ м. Данные размеры выбраны исходя из рабочей длины манипулятора и базового

размера БЛА. Обозначим, что манипулятор перемещает, поднимает и отпускает объект, при этом сохраняя его центр тяжести на вертикальной оси [17].

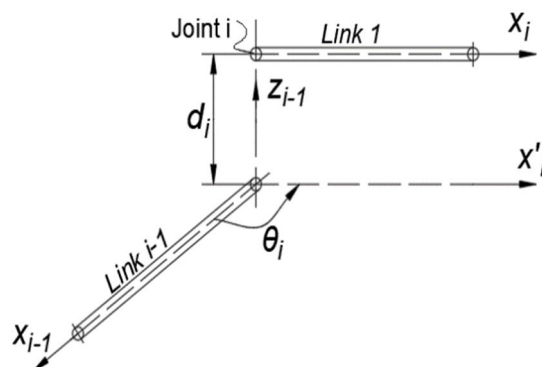


Рис. 1. Схема нумерации звеньев и шарниров манипулятора

Fig. 1. Numbering scheme of manipulator links and joints

Матрица вращения для данного типа соединения выглядит следующим образом [18]:

$${}^{i-1}R_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 \\ s_i & c_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $c_i = \cos \theta_i$; $s_i = \sin \theta_i$.

Для присвоения систем координат звеньям был использован алгоритм Денавита-Хартенберга. Таким образом, имеется следующий набор геометрических параметров последовательного цепного манипулятора, представленный в табл. 1, где a_i – расстояние от z_{i-1} до z_i вдоль x_{i-1} ; α_i – угол от z_{i-1} до z_i относительно x_{i-1} ; d_i – расстояние от x_{i-1} до x_i вдоль z_i ; θ_i – угол от x_{i-1} до x_i относительно z_i .

Таблица 1. Параметры алгоритма Денавита-Хартенберга трехзвенного манипулятора**Table 1.** Parameters of Denavit-Hartenberg algorithm for a three-link manipulator

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	M_1	0	θ_1
2	0	M_2	0	θ_2
3	0	M_3	0	θ_3

Система координат i может быть расположена относительно системы координат $i-1$ путем выполнения поворота на угол θ_i . ${}^{i-1}T_i$ – однородная матрица преобразования для определения координат относительного положения звена i относительно звена $i-1$.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_i c_i \\ s_i & c_i & 0 & a_i s_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$${}^0T_i^{COM} = \prod_{l=1}^i {}^{l-1}T_l^{COM} = \begin{bmatrix} c_{1..i} & -s_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^{i-1} l_k c_{1..k} + (l_i c_{1..i}) / 2 \\ s_{1..i} & c_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^{i-1} l_k s_{1..k} + (l_i s_{1..i}) / 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Из формулы (1) получаем координаты положения рабочего органа манипулятора с 3 степенями свободы:

$$\begin{cases} x_3 = l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ y_3 = l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} \end{cases} \quad (3)$$

Из формулы (2) получаем координаты центра масс манипулятора с 3 степенями свободы:

$$\begin{cases} x_{COM} = (\sum_{l=1}^i {}^0T_l^{COM}(1,4)m_l) / (\sum_{l=1}^i m_l) \\ y_{COM} = (\sum_{l=1}^i {}^0T_l^{COM}(2,4)m_l) / (\sum_{l=1}^i m_l) \end{cases} \quad (4)$$

Координаты звена i ($x_i; y_i$) относительно исходных координат определяются через прямую кинематику:

$${}^0T_i = \prod_{l=1}^i {}^{l-1}T_l = \begin{bmatrix} c_{1..i} & -s_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^i l_k c_{1..k} \\ s_{1..i} & c_{1..i} & 0 & \sum_{k=1}^i l_k s_{1..k} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $c_{1..i} = \cos(\theta_1 + \dots + \theta_i)$, $s_{1..i} = \sin(\theta_1 + \dots + \theta_i)$.

Отношения между центром масс двух последовательных звеньев:

$${}^{i-1}T_i^{COM} = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & (l_i c_i) / 2 \\ s_i & c_i & 0 & (l_i s_i) / 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где COM – центр масс.

Матрица центра масс координат звена i имеет вид:

На основе найденных значений положения рабочего органа (3) и положения центра масс (4) трёхзвенного манипулятора решим обратную задачу кинематики (ОЗК) для данного манипулятора с 3 степенями свободы.

Решение ОЗК для манипулятора заключается в нахождении значений положений шарниров с учетом положения и ориентации рабочего органа относительно основания и значений всех геометрических параметров звеньев. Па-

параметры рабочего положения и угла сочленения манипулятора, рассматриваемого в данном исследовании, показаны на рис. 2.

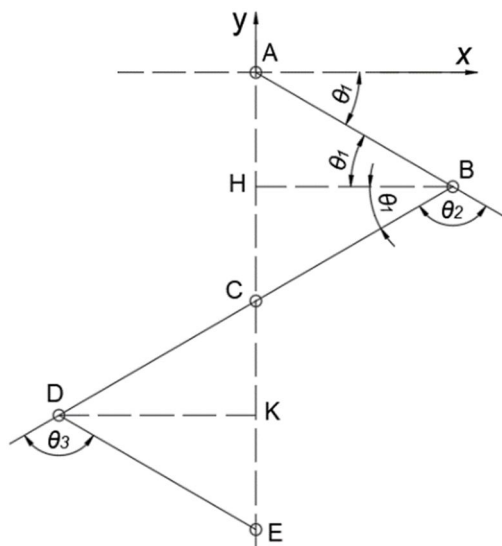


Рис. 2. Параметры угла сочленения манипулятора

Fig. 2. Parameters of the manipulator joint angle

На рис. 2 первое звено обозначено как AB, второе – BD, третье – DE. Данные звенья имеют следующее отношение: $AB = DE = BD/2$. Углы θ_1 , θ_2 и θ_3 – это углы отклонения последовательных звеньев. Рабочий механизм манипулятора E всегда перемещается по вертикальной оси y. Центром масс манипулятора является средняя точка C звена BD. Поэтому решение ОЗК в данном исследовании выполняется с помощью геометрического метода. Согласно вышеописанному решению прямой задачи кинематики рабочее положение манипулятора, θ_1 и θ_2 всегда меньше 0, а θ_3 всегда больше 0. Координаты рабочего органа – $(0, P_y)$. Из рис. 2 можно определить, что сочлененное положение

первого звена $\theta_1 = A \tan 2(\cos \theta_1, \sin \theta_1)$, второго $\theta_2 = -\pi - 2\theta_1$, третьего – $\theta_3 = \pi + 2\theta_1$. Углы θ_1 , θ_2 и θ_3 являются входными данными регулятора.

Далее рассмотрим динамическую модель манипулятора с 3 степенями свободы. Динамические уравнения движения рассматриваемой конструкции могут быть получены с использованием уравнения Лагранжа для каждой обобщенной координаты:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i, \quad (5)$$

где $L = T - U$ – функция Лагранжа, а T и U – суммарная кинетическая энергия и суммарная потенциальная энергия, соответственно, $q_i = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_i]^T$ – параметры угла сочленения манипулятора. Кинетическая энергия задается по формуле:

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M \dot{\theta}, \quad (6)$$

где $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dots \ \dot{\theta}_i]^T$; M – обобщенные массовые матрицы для манипулятора.

Потенциальная энергия

$$U = \sum_i [0 \ m_i g \ 0] r_{0_{T_i}^{COM}}, \quad (7)$$

где $r_{0_{T_i}^{COM}}$ определяется как:

$$r_{0_{T_i}^{COM}} = \begin{bmatrix} {}^0 T_i^{COM}(1,4) \\ {}^0 T_i^{COM}(2,4) \\ {}^0 T_i^{COM}(3,4) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Через формулу (8) получаем матрицу переходов Якобиана:

$$J_{T_i} = \begin{bmatrix} \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(1,1)(\theta_1) & \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(1,1)(\theta_2) & \dots & \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(1,1)(\theta_i) \\ \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(2,1)(\theta_1) & \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(2,1)(\theta_2) & \dots & \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(2,1)(\theta_i) \\ \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(3,1)(\theta_1) & \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(3,1)(\theta_2) & \dots & \dot{r}_{0_{T_i}^{COM}}(3,1)(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Матрица направляющих косинусов:

$$A_i = \begin{bmatrix} c_{1..i} & -s_{1..i} & 0 \\ s_{1..i} & c_{1..i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Из (10) имеем производную матрицы направляющих косинусов:

$$dA_i = \begin{bmatrix} \sum_1^j \dot{A}_i(1,1)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(1,2)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(1,3)(\theta_j)\dot{\theta}_j \\ \sum_1^j \dot{A}_i(2,1)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(2,2)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(2,3)(\theta_j)\dot{\theta}_j \\ \sum_1^j \dot{A}_i(3,1)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(3,2)(\theta_j)\dot{\theta}_j & \sum_1^j \dot{A}_i(3,3)(\theta_j)\dot{\theta}_j \end{bmatrix} (j = i = 1 \div 5).$$

Матрица угловой скорости каждого звена выглядит как:

$$\omega_i = \begin{bmatrix} S_{\omega_i}(3,2) \\ S_{\omega_i}(1,3) \\ S_{\omega_i}(2,1) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $S_{\omega_i} = dA_i A_i^T$. Из матрицы (11) мы имеем вращательную матрицу Якобиана:

$$J_R = \begin{bmatrix} \dot{S}_{\omega_i}(1,1)(\dot{\theta}_1) & \dot{S}_{\omega_i}(1,1)(\dot{\theta}_2) & \dots & \dot{S}_{\omega_i}(1,1)(\dot{\theta}_i) \\ \dot{S}_{\omega_i}(2,1)(\dot{\theta}_1) & \dot{S}_{\omega_i}(2,1)(\dot{\theta}_2) & \dots & \dot{S}_{\omega_i}(2,1)(\dot{\theta}_i) \\ \dot{S}_{\omega_i}(3,1)(\dot{\theta}_1) & \dot{S}_{\omega_i}(3,1)(\dot{\theta}_2) & \dots & \dot{S}_{\omega_i}(3,1)(\dot{\theta}_i) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

Из матриц (9), (10) и (12) можно найти матрицу масс манипулятора:

$$M = \sum_1^i (m_i (J_{T_i}^T J_{T_i}) + J_{R_i}^T (A_i I_i A_i^T) J_{R_i}), \quad (13)$$

$$\text{где } I_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_i l_i^2 / 3 \end{bmatrix}.$$

В результате из формул (8)–(10) и (13) определяются $\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 & \ddot{\theta}_2 & \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 & \tau_3 \end{bmatrix}$.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим планирование траектории движения для манипулятора с 3 степенями свободы. Под траекторией в данном исследовании понимается последовательность движений звена относительно времени [19]. Траектория движения робота зависит как от динамики, так и от кинематики робота [20]. Введем ограничение: планирование траекторий движения звеньев манипулятора с 3 степенями свободы, перемещающегося из положения с углами сочленений q_i в положение с углами сочленений q_f должно происходить не более, чем за 5 секунд. Для того чтобы добиться плавного и непрерывного движения, разработана полиномиальная траектория высокой степени [21]:

$$\theta_k^n(t) = a_n^k t^n + a_{n-1}^k t^{n-1} + \dots + a_2^k t^2 + a_1^k t + a_0^k,$$

где n – степень полинома, k – звено манипулятора, (k и n – натуральное чис-

ло), t – время. Диапазон движений звеньев приведен в табл. 2.

Условия уравнения траектории описаны ниже:

$$\theta_k^j(0) = q_i, \quad (14)$$

$$\theta_k^j(5) = q_f, \quad (15)$$

$$\dot{\theta}_k^j(0) = 0, \quad (16)$$

$$\dot{\theta}_k^j(5) = 0, \quad (17)$$

$$\ddot{\theta}_k^j(0) = 0, \quad (18)$$

$$\ddot{\theta}_k^j(5) = 0, \quad (19)$$

где $q_i = (\theta_{1i}; \theta_{2i}; \theta_{3i}) = (-1,5708; 0; 0)$, (20)

$q_f = (\theta_{1f}; \theta_{2f}; \theta_{3f}) = (-0,5236; -2,0944; 2,0944)$. (21)

Из условий (14)–(17), (20) и (21) получены траектории третьего порядка манипулятора:

$$\theta_1^3 = -0,0168t^3 + 0,1257t^2 - 1,5708,$$

$$\theta_2^3 = 0,0335t^3 - 0,2513t^2,$$

$$\theta_3^3 = -0,0335t^3 + 0,2513t^2.$$

Из условий (14)–(17) и (19)–(21) получены траектории четвертого порядка манипулятора:

$$\theta_1^4 = 0,0050t^4 - 0,0670t^3 + 0,2513t^2 - 1,5708,$$

$$\theta_2^4 = -0,0101t^4 + 0,1340t^3 - 0,5027t^2,$$

$$\theta_3^4 = 0,0101t^4 - 0,1340t^3 + 0,5027t^2.$$

Из условий (17)–(24) получены траектории пятого порядка манипулятора:

$$\theta_1^5 = 0,0020t^5 - 0,0251t^4 + 0,0838t^3 - 1,5708,$$

$$\theta_2^5 = -0,0040t^5 + 0,0503t^4 - 0,1676t^3,$$

$$\theta_3^5 = -0,0040t^5 + 0,0503t^4 - 0,1676t^3.$$

Таблица 2. Параметры начального и конечного положения звеньев

Table 2. Parameters of the initial and final joint positions

Номер звена / Number of link	Переменные сочленения / Variable articulations	Начальная позиция, рад / Starting position, rad	Конечная позиция, рад / Final position, rad	Диапазон углов, рад / Range of angles, rad
1	θ_1	-1,5708	-0,5236	-1,0472
2	θ_2	0	-2,0944	2,0944
3	θ_3	0	2,0944	2,0944

Приведенные выше уравнения траекторий являются входными данными для разрабатываемого в данной статье регулятора.

Для управления манипулятором с 3 степенями свободы был разработан самонастраивающийся нечеткий ПИД-регулятор. Схема системы управления для каждого звена манипулятора (рис. 3) со-

стоит из двух частей: ПИД-регулятора и нечеткого ПИД-вывода с использованием метода Мамдани. Структура нечеткого ПИД-вывода включает два входа и три выхода. Входными сигналами являются сигнал ошибки $e(t)$ и интегрирование ошибки $\Delta e(t)$. K'_p , K'_i и K'_d являются тремя выходными сигналами.

Пусть диапазонами переменных параметров ПИД-регулятора являются $[K_{Pmin}, K_{Pmax}]$, $[K_{Imin}, K_{Imax}]$ и $[K_{Dmin}, K_{Dmax}]$. Диапазон каждого параметра был опре-

делен на основе экспериментальных ПИД-регуляторов, таких как: $K_P \in [0, 15]$, $K_I \in [0,001, 0,005]$ и $K_D \in [0,1, 0,2]$.

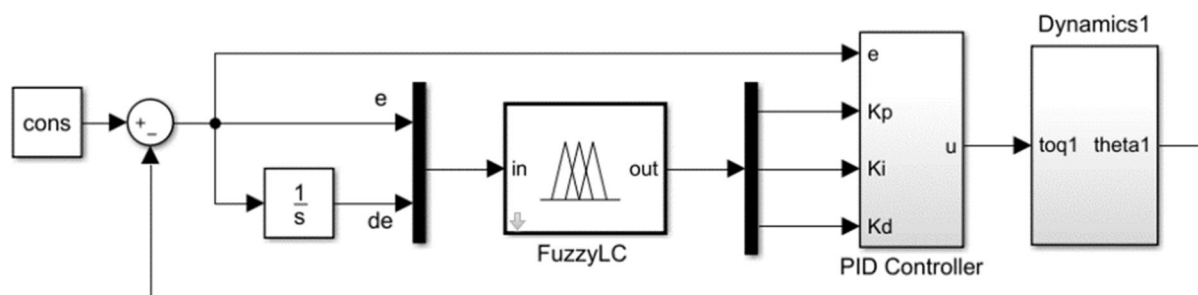


Рис. 3. Структурная схема нечеткого самонастраивающегося ПИД-регулятора

Fig. 3. Structural diagram of a fuzzy self-adjusting PID-controller

Выходы K'_P , K'_I и K'_D описываются следующим образом:

$$K'_P = \frac{K_P - K_{Pmin}}{K_{Pmax} - K_{Pmin}};$$

$$K'_I = \frac{K_I - K_{Imin}}{K_{Imax} - K_{Imin}};$$

$$K'_D = \frac{K_D - K_{Dmin}}{K_{Dmax} - K_{Dmin}}.$$

Каждая переменная входов нечеткого регулятора имеет семь нечетких наборов в диапазоне: отрицательный-большой (NB), отрицательный-средний (NM), отрицательный-маленький (NS), нулевой (ZE), положительный-маленький (PS), положительный-средний (PM), положительный-большой (PB). Функция принадлежности двух входов показана на рис. 4.

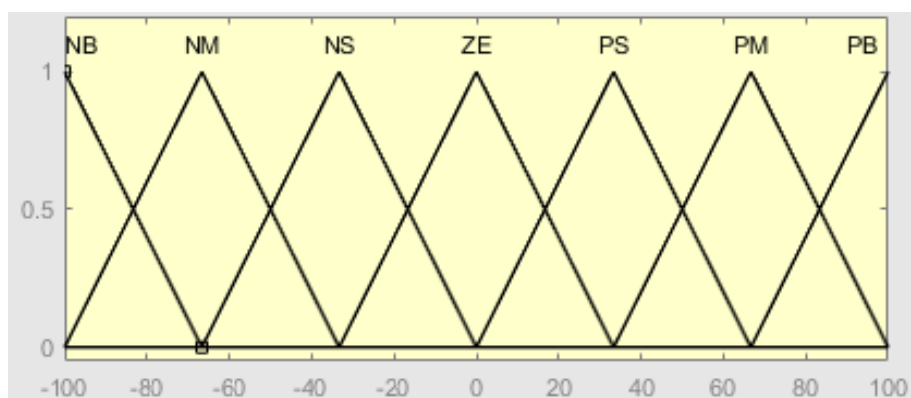


Рис. 4. Функции принадлежности $e(t)$ и $de(t)$

Fig. 4. Membership functions $e(t)$ and $de(t)$

Три треугольные функции принадлежности, используемые для K'_I с тремя переменными нечеткого множества,

имеют лингвистические значения: S (малый), M (средний) и B (большой). K'_P и K'_D имеют два нечетких множе-

ства: S-образная и Z-образная функции принадлежности.

Нечеткое правило записывается в соответствии с ответом шага, который делится на 4 области, обозначенные на рис. 5: а) время запаздывания; б) время нарастания; в) перерегулирование; д) время установления.

Для достижения быстрого времени нарастания в области 1 необходим большой управляющий сигнал.

Чтобы устранить возникающую ошибку, необходимо выделить интегральный коэффициент усиления, а для ускорения отклика необходимо наличие производного усиления. Чтобы обеспечить высокую степень контроля, сигнал ПИД-регулятора должен иметь большое пропорциональное усиление. База правил, представляющая область 1, записывается следующим образом: если e – это РВ, а Δe – это ZE, то K'_p – это В, K'_i – S, а K'_d – S.

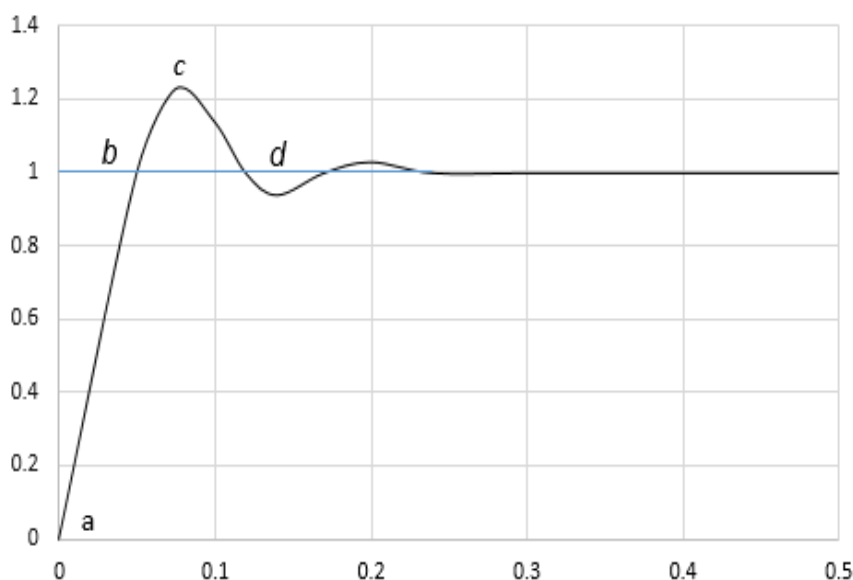


Рис. 5. Шаговый ответ для системы управления

Fig. 5. Step response for a control system

Когда в области 2 ошибка становится отрицательной, для уменьшения возникающего перерегулирования система должна замедлиться. Это достигается путем уменьшения пропорционального усиления, малого интегрального усиления и большого производного усиления. Таким образом, база правил, которая представляет данный случай, выглядит следующим образом: если e – это ZE, а Δe – это NB, то K'_p – это S,

K'_i – S, а K'_d – В. Остальные случаи настраиваются аналогичным образом.

Затем в первую очередь были проведены испытания разработанной системы управления манипулятором при отсутствии внешних возмущений для трех различных ситуаций. Первая ситуация – рабочий механизм $(0; P_y)$ перемещается из координаты $(0; -0,60)$ в координату $(0; -0,55)$ без полезной

нагрузки; вторая – манипулятор перемещается по тем же координатам, неся 0,1 кг полезной нагрузки и, наконец, третья – манипулятор повторяет этот же путь неся 0,15 кг полезной нагрузки. Как можно заметить из табл. 3, в проведенных экспериментах погрешность результатов была относительно небольшой. Во всех случаях наибольшее значение погрешности 2,942% было между

желаемым и фактическим углом звена 2 в случаях, когда манипулятор нес 0,15 кг полезной нагрузки, 2,544% с 0,1 кг полезной нагрузки и 1,732% без полезной нагрузки. В случае, когда манипулятор нес 0,10 кг и 0,15 кг полезной нагрузки, отклонение центра масс по горизонтали составило менее 1 мм, что приемлемо на практике.

Таблица 3. Погрешность между желаемым и фактическим углом

Table 3. Margin of error between desired and actual angle values

Полезная нагрузка, кг / Payload, kg	Без полезной нагрузки / Without payload			0,10 (кг)			0,15 (кг)		
Угол θ	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
Желаемый угол, рад	-1,160	-0,822	0,822	-1,160	-0,822	0,822	-1,160	-0,822	0,822
Фактический угол, рад	-1,161	-0,808	0,819	-1,160	-0,801	0,817	-1,159	-0,798	0,816
Погрешность (%)	0,086	1,732	0,305	0,000	2,544	0,599	0,086	2,942	0,772

Прежде чем система достигла стабилизированного состояния, максимальный горизонтальный сдвиг центра масс составил 12,5 мм. Стабилизация системы произошла через 3 секунды с небольшим перерегулированием.

В экспериментах с полезной нагрузкой после взятия объекта манипулятор переходит в позицию для транспортировки. Рабочий механизм ($0; P_y$) перемещается из координаты $P_1(0; -0,60)$ в координату $P_2(0; -0,30)$. Для управления манипулятором в данном случае

используется метод перемещения рабочего концевой механизма из координаты P_1 в P_2 по заданным точкам.

Для тестирования работы данного метода были рассмотрены 3 случая перемещения рабочего органа по 12, 25 и 50 заданным точкам. Экспериментальные результаты, полученные во всех трех случаях, довольно сильно отличаются. В случае 12 заданных точек горизонтальный сдвиг центра масс составил около 12,5 мм, а рабочего органа – около 27,5 мм, в случае 25 точек около

6 мм и 14 мм, соответственно, и в случае 50 точек около 4,3 мм и 10,2 мм, соответственно.

Для подтверждения гипотезы о том, что траектории движения возможно совершать с непрерывной скоростью и плавным ускорением, сформулированы три траекторные задачи с использованием полиномов 3-й, 4-й и 5-й степеней. Данные полиномы гарантируют, что во время генерируемых траекторий робот движется в соответствии с ограничением ускорения, чтобы обеспечить безопасную навигацию БЛА. В полиномах также учитываются скоростные условия – скорости каждого звена в начале и в конце движения равны нулю. В ходе проведения экспериментов было получено, что при управлении манипулятором по 5-ой степени полинома достигается наибольший горизонтальный сдвиг: 8 мм для центра масс и 17,5 мм для рабочего органа, а также скорость и ускорение в начале и конце движения не равны 0. Такая большая погрешность связана с тем, что скорость и ускорение манипулятора не формируются по запросу.

При управлении манипулятором по 3-й и 4-й степени полинома центр масс и рабочий орган перемещаются непрерывно и плавно по заданной траектории. Максимальные горизонтальные сдвиги центра масс и рабочего органа по полиному 3-й степени составляют 2,8 мм и 7,8 мм, соответственно. Траектории движения центра масс и рабочего органа всегда находятся справа от вертикальной оси; причина в том, что тра-

ектория движения второго звена имеет некоторые погрешности. Экспериментальный угол сочленения всегда меньше желаемого значения. Однако погрешность настолько мала, что вполне подходит для реального применения. Примечательным моментом в 3-м полиноме является то, что скорость всегда отвечает значениям в соответствии с условиями построения уравнения траектории. Скорость в начальный и конечный моменты времени достигает нулевого значения, а ускорение подчиняется закону движения.

Наилучшие результаты управления манипулятором достигаются при использовании полинома 4-й степени. Максимальный горизонтальный сдвиг центра масс и рабочего органа манипулятора составляют 2,8 мм и 7,5 мм, соответственно. В конце движения горизонтальный сдвиг центра масс составляет всего 1,25 мм. Граничные условия скорости в начальный и конечный моменты времени отвечают заданным ограничениям и равняются 0 и 5 секундам, соответственно.

Выводы

В данной работе исследованы кинематическая и динамическая модель манипулятора с тремя степенями свободы, уставленного на беспилотном летательном аппарате мультироторного типа. Для стабилизации управления беспилотным летательным манипулятором был разработан нечеткий ПИД-регулятор. Динамический отклик каждого звена соответствуют выдвинутым

к системе требованиям и не превышает 3 секунд с небольшим перерегулированием. Проведенное моделирование разработанной системы управления манипулятором при отсутствии возмущений показало, что предложенная система управления удовлетворяет заданным

требованиям и обеспечивает непрерывное и плавное перемещение звеньев манипулятора по рассчитанной траектории. Дальнейшие исследования будут направлены на моделирование разработанной системы при воздействии возмущений.

Список литературы

1. Luo C., Yu L., Ren P. A. Vision-Aided Approach to Perching a Bioinspired Unmanned Aerial Vehicle // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. № 65(5). P. 3976-3984. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2764849>
2. Korpela C.M., Danko T.W., Oh P. Y. MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. № 65(1-4). <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9591-3> 93-101.
3. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Солёная О. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // *Труды МАИ*. 2018. № 98. P. 28-28. URL: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/3ee/Ronzhin_Nguen_Solenaya_rus.pdf?lang=en&issue=98
4. Cardona G.A., Tellez-Castro D., Mojica-Nava E. Cooperative Transportation of a Cable-Suspended Load by Multiple Quadrotors // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. № 52(20). P. 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.149>
5. Khalifa A. Novel quadrotor manipulation system // arXiv:1904.05090v1 [cs.RO]. – 2019. URL: <https://arxiv.org/pdf/1904.05090.pdf>
6. Ermolov I. Industrial Robotics Review. In: Studies in Systems // *Decision and Control*. 2020. № 272. P. 195-204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_16
7. Patil A., Kulkarni M., Aswale A. Analysis of the inverse kinematics for 5 DOF robot arm using D-H parameters // *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*. 2017. P. 688-693. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311944>
8. Vu Q., Ronzhin A. A Model of Four-Finger Gripper with a Built-in Vacuum Suction Nozzle for Harvesting Tomatoes // *Proceedings of 14th International Conference on Electro-mechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020. P. 149-160. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_13
9. Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in Use of Seabed with Autonomous Underwater Vehicles // *SPIIRAS Proceedings*. 2018. № 3. P. 203-226. <https://doi.org/10.15622/sp.58.9>

10. Medvedev M.Y., Kostjukov V.A., Pshikhov V.K. Optimization of mobile robot movement on a plane with finite number of repeller sources // *SPIIRAS Proceedings*. 2020. № 19. P. 43-78. <https://doi.org/10.15622/10.15622/sp.2020.19.1.2>.
11. Khalifa A., Fanni M., Ramadan A., Abo-Ismael A. New quadrotor manipulation system: Inverse kinematics, identification and ric-based control // *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*. 2015. № 4(3). P. 39-58. <https://doi.org/10.14810/ijmech.2015.4304>
12. Kabir U., Hamza M.F., Haruna A., Shehu G.S. Performance analysis of PID, PD and fuzzy controllers for position control of 3-DOF robot manipulator // *Zaria Journal of Electrical Engineering Technology, Department of Electrical Engineering*. 2019. № 8(1). P. 18-25. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1910/1910.12076.pdf>
13. Nyein T.H.I.D.A., Z.M. Oo, Hlaing H.T. Fuzzy Based Control of Two Links Robotic Manipulator // *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*. 2019. № 8. P. 1-7. URL: <http://ijsetr.com/uploads/465213IJSETR17300-01.pdf>
14. Sarkhel P., Banerjee N., Hui N.B. Fuzzy logic-based tuning of PID controller to control flexible manipulators // *SN Applied Sciences*. 2020. № 2. P. 11 – 24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2877-y>
15. Saxena A., Kumar J., Deolia V.K. Design a Robust Intelligent Controller for Rigid Robotic Manipulator System having Two Links and Payloads // *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*. 2020. P. 159-163.
16. Aliabadi M., Mashayekhifard J., Mohaḥzabi B. Intelligent and classic control of rehabilitation robot with robust pid and fuzzy methods // *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*. 2020. № 9 (1). P. 31-36. <http://journals.iaumajlesi.ac.ir/ms/index/index.php/ms/article/view/435>
17. Nguyen V., Saveliev A., Ronzhin A. Mathematical Modelling of Control and Simultaneous Stabilization of 3-DOF Aerial Manipulation System // *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. 2020. P. 253-264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_25
18. Flying robots / S. Leutenegger, C. Hürzeler, A.K. Stowers, K. Alexis, M.W. Achtelik, D. Lentink, P.Y. Oh, R. Siegwart // *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Cham. 2016. P. 623-670. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
19. Bharadwaj D., Prateek M. Kinematics and dynamics of lower body of autonomous humanoid biped robot // *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019. № 8(4). P. 141-146. URL: https://www.researchgate.net/publication/331062407_Kinematics_and_dynamics_of_lower_body_of_autonomous_humanoid_Biped_Robot

20. Gupta A., Mondal A.K., Gupta M.K. Kinematic, Dynamic analysis and control of 3 DOF upper-limb robotic exoskeleton // *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. – 2019. № 52(3). P. 515-520. <https://doi.org/10.18280/jesa.520311>

21. Barghi Jond H., V Nabiyev V., Benveniste R. Trajectory Planning Using High Order Polynomials under Acceleration Constraint // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2016. № 10(21). P. 1-6. URL: http://qjie.ir/article_255_37.html

References

1. Luo C., Yu L., Ren P. A Vision-Aided Approach to Perching a Bioinspired Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, no. 65(5), pp. 3976-3984. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2764849>.

2. Korpela C.M., Danko T.W., Oh P. Y. MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, no.65(1-4). <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9591-3> 93-101.

3. Ronzhin A.L., Nguyen V.V., Solyonaya O. Analiz problem razrabotki bespilotnykh letatel'nykh manipulyatorov i fizicheskogo vzaimodeistviya BLA s nazemnymi ob"ektami [Analysis of the problems of the development of unmanned aerial manipulators and the physical interaction of UAVs with ground objects]. *Trudy MAI = Trudy MAI*, 2018, no. 98, pp. 28-28. Available at: http://www.trudymai.ru/upload/iblock/3ee/Ronzhin_Nguen_Solenaya_rus.pdf?lang=en&issue=98 (In Russ.).

4. Cardona G.A., Tellez-Castro D., Mojica-Nava E. Cooperative Transportation of a Cable-Suspended Load by Multiple Quadrotors. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, no. 52(20), pp. 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.149>

5. Khalifa A. Novel quadrotor manipulation system // arXiv:1904.05090v1 [cs.RO]. – 2019. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1904.05090.pdf>

6. Ermolov I. Industrial Robotics Review. In: Studies in Systems. *Decision and Control*, 2020, no. 272, pp. 195-204. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37841-7_16

7. Patil A., Kulkarni M., Aswale A. Analysis of the inverse kinematics for 5 DOF robot arm using D-H parameters. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*, 2017, pp. 688-693. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311944>

8. Vu Q., Ronzhin A. A Model of Four-Finger Gripper with a Built-in Vacuum Suction Nozzle for Harvesting Tomatoes. *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. 2020, pp. 149-160. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9267-2_13

9. Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in Use of Seabed with Autonomous Underwater Vehicles. *SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 3, pp. 203-226. <https://doi.org/10.15622/sp.58.9>

10. Medvedev M.Y., Kostjukov V.A., Pshikhov V.K. Optimization of mobile robot movement on a plane with finite number of repeller sources. *SPIIRAS Proceedings*, 2020, no. 19, pp. 43-78. <https://doi.org/10.15622/10.15622/sp.2020.19.1.2>.
11. Khalifa A., Fanni M., Ramadan A., Abo-Ismael A. New quadrotor manipulation system: Inverse kinematics, identification and ric-based control. *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*, 2015, no. 4(3), pp. 39-58. <https://doi.org/10.14810/ijmech.2015.4304>
12. Kabir U., Hamza M.F., Haruna A., Shehu G.S. Performance analysis of PID, PD and fuzzy controllers for position control of 3-DOF robot manipulator. *Zaria Journal of Electrical Engineering Technology, Department of Electrical Engineering*, 2019, no. 8(1), pp. 18-25. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1910/1910.12076.pdf>
13. Nyein T.H.I.D.A., Z.M. Oo, Hlaing H.T. Fuzzy Based Control of Two Links Robotic Manipulator. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 2019, no. 8, pp. 1-7. Available at: <http://ijsetr.com/uploads/465213IJSETR17300-01.pdf>
14. Sarkhel P., Banerjee N., Hui N.B. Fuzzy logic-based tuning of PID controller to control flexible manipulators. *SN Applied Sciences*, 2020, no.2, pp. 11-24. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2877-y>
15. Saxena A., Kumar J., Deolia V.K. Design a Robust Intelligent Controller for Rigid Robotic Manipulator System having Two Links and Payloads. *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)*, 2020, pp. 159-163.
16. Aliabadi M., Mashayekhifard J., Mohazabi B. Intelligent and classic control of rehabilitation robot with robust pid and fuzzy methods. *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, 2020, no. 9 (1), pp. 31-36. Available at: <http://journals.iaumajlesi.ac.ir/ms/index/index.php/ms/article/view/435>
17. Nguyen V., Saveliev A., Ronzhin A. Mathematical Modelling of Control and Simultaneous Stabilization of 3-DOF Aerial Manipulation System. *In International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2020, pp. 253-264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60337-3_25
18. Leutenegger S., Hürzeler C., Stowers A.K., Alexis K., Achtelik M.W., Lentink D., Oh P.Y., Siegwart R. Flying robots. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, Cham. 2016, pp. 623-670. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
19. Bharadwaj D., Prateek M. Kinematics and dynamics of lower body of autonomous humanoid biped robot. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, no. 8(4), pp. 141-146. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331062407_Kinematics_and_dynamics_of_lower_body_of_autonomous_humanoid_Biped_Robot

20. Gupta A., Mondal A.K., Gupta M.K. Kinematic, Dynamic analysis and control of 3 DOF upper-limb robotic exoskeleton. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2019, no. 52(3), pp. 515-520. <https://doi.org/10.18280/jesa.520311>

21. Barghi Jond H., V Nabiyev V., Benveniste R. Trajectory Planning Using High Order Polynomials under Acceleration Constraint. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 2016, no. 10(21), pp. 1-6. Available at: http://qjie.ir/article_255_37.html

Информация об авторах / Information about the Authors

Нгуен Ван Винь, аспирант кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vinhnguyen.tccnqp@gmail.com

Vinh V. Nguyen, Post-Graduate Student, Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vinhnguyen.tccnqp@gmail.com

Усина Елизавета Евгеньевна, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: lizzzi96@mail.ru

Elizaveta E. Usina, Junior Researcher of Laboratory of Big Data in Socio-Cyberphysical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: lizzzi96@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-217-229>

Автоматизированное проектирование системы управления роботизированной платформы с применением Adams и Matlab

В.А. Порхало¹, В.Г. Рубанов¹✉, А.Г. Бажанов¹, О.В. Луценко¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова
ул Костюкова 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данного исследования является оценка возможности разработки и моделирования оптимальной системы управления продольным перемещением робота по критерию максимального быстродействия путем применения системы виртуального моделирования MSC.Adams и пакета математического моделирования MATLAB.

Методы. Одним из подходов исследования является моделирование систем, при этом в качестве программного средства синтеза виртуальной физической модели робота используется система виртуального моделирования, а для моделирования системы управления применяется пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MATLAB и графическая среда имитационного моделирования Simulink. В качестве метода синтеза системы управления продольным перемещением применяется принцип максимум Понтрягина, а в качестве критерия оптимальности выступает максимальное быстродействие.

Результаты. Представлена структура системы управления роботизированной платформой, разработан оптимальный алгоритм управления и реализован в среде Simulink. Разработана структура системы управления физической моделью с передачей данных в Adams. Приведены и проанализированы кривые разгона и фазовый портрет системы управления моделью при продольном перемещении роботизированной платформы.

Заключение. Как видно из приведенных результатов моделирования, оптимальный позиционный закон управления, реализующий принцип максимума, отрабатывает задание с требуемыми показателями качества. В связи с этим, предложенный алгоритм можно использовать при разработке систем управления продольным перемещением мобильных роботов. Совместное моделирование функционирования виртуального прототипа и системы управления объектом в среде Matlab и Adams позволяет избежать изготовления натурной модели и дает возможность принять во внимание физические свойства объекта без создания аналитической модели.

Ключевые слова: моделирование; мобильный робот; позиционное управление; оптимальные системы; система автоматизированного проектирования.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6.

© В.А. Порхало, В.Г. Рубанов, А.Г. Бажанов, О.В. Луценко, 2020

Для цитирования: Автоматизированное проектирование системы управления роботизированной платформы с применением Adams и Matlab / В.А. Порхало, В.Г. Рубанов, А.Г. Бажанов, О.В. Луценко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 217-229. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-217-229>.

Поступила в редакцию 06.10.2020

Подписана в печать 29.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Computer-Aided Design of the Robotic Platform Control System Using Adams and Matlab

Vasily A. Porkhalo ¹, Vasily G. Rubanov ¹ ✉, Alexander G. Bazhanov ¹,
Oksana V. Lutcenko ¹

¹ Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this study is to assess the possibility of developing and simulating an optimal control system for the longitudinal movement of a robocars according to the criterion of maximum speed by using the MSC.Adams virtual modeling system and the MATLAB mathematical modeling package

Methods. One of the research approaches is system modeling, while a virtual modeling system is used as a software tool for synthesizing a virtual physical model of a robot, and a package of application programs for solving technical computing problems MATLAB and a graphical environment for simulation Simulink are used to model a control system. The Pontryagin maximum principle is used as a synthesis method for the longitudinal displacement control system, and the maximum speed is used as an optimality criterion.

Results: The structure of the control system for a robotic platform is presented; an optimal control algorithm is developed and implemented in the Simulink environment. The structure of the physical model management system with data transfer to Adams has been developed. The acceleration curves and the phase portrait of the model control system during the longitudinal movement of the robotic platform are presented and analyzed.

Conclusion. As can be seen from the above simulation results, the optimal positional control law, which implements the maximum principle, fulfills the task with the required quality indicators. In this regard, the proposed algorithm can be used in the development of control systems for the longitudinal movement of mobile robots. Joint modeling of the virtual prototype and the object control system in the Matlab and Adams environment avoids the production of a full-scale model and makes it possible to take into account the physical properties of the object without creating an analytical model.

Keywords: modeling; mobile robot; positional control; optimal systems; computer-aided design system.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the project State Assignment No. 2.1396.2017 / 4.6.

For citation: Rubanov V. G., Porkhalo V. A., Bazhanov A. G., Lutcenko O.V. Computer-Aided Design of the Robotic Platform Control System Using Adams and Matlab. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 217-229 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-217-229>.

Received 06.10.2020

Accepted 29.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

Классический подход к разработке технических объектов основывается на проектировании и последующем построении дорогостоящих и трудоемких физических прототипов [1]. При этом довольно часто ставится задача цифрового моделирования, а также виртуального прототипирования. Однако при построении аналитической математической модели принятые допущения зачастую ухудшают степень ее адекватности, что приводит к необходимости проведения экспериментов и физического моделирования динамики системы, при этом производится сравнение с результатами математического моделирования.

Натурное физическое моделирование применяется как в ходе проверки алгоритмов перемещения мобильных роботов, так и для получения экспериментальных данных о параметрах элементов для построения математических моделей. Такое физическое моделирование мобильных роботов приведено, например, в [2–4].

В связи с тем, что математическим моделям присущи недостатки, заключающиеся в меньшей адекватности модели из-за трудности осуществить учет всех особенностей физического объекта, а также тем, что натурное физическое моделирование требует построения физического объекта, что ведет к дополнительным материальным затра-

там, может быть использован гибридный подход к моделированию робототехнической платформы, который сочетает в себе достоинства физического и математического моделирования [5–6].

Одним из примеров современного программного обеспечения, которое помогает проводить эксперименты на качественных виртуальных моделях, учитывающих физические взаимодействия объекта с внешней средой, является Adams MSC Software. При симуляции перемещения объектов в Adams, преимуществом программного обеспечения является отсутствие детализации на статическом уровне конструктивного взаимодействия элементов, при этом достаточно реализовать кинематическую схему и указать свойства материалов, из которого состоят элементы модели мобильной платформы. Имеется возможность автоматически рассчитать моменты инерции, массу и другие параметры, которые используются при расчете модели. Также Adams позволяет экспортировать полученную модель в MATLAB. Такая модель, построенная в Adams, позволяет исключить расчет аналитической модели и учесть все внешние воздействия на объект.

При исследовании работ по разработке и оптимизации систем управления роботами можно видеть широкий круг подходов к решению проблем стабилизации курса, контроля движения, обхода препятствий [7] перемещения по траектории [8–10] и др., от примитив-

ных систем с сенсорами расстояния до устройств на базе машинного зрения, глубокого обучения [11] и распознавания объектов [12, 13]. В настоящей работе представлена физическая модель мобильного робота, разработанная в среде Adams, и система управления для нее, реализованная в MATLAB Simulink. Процесс моделирования динамики робокара состоит из следующих этапов: создание виртуальной модели робокара в Adams, реализация системы управления в MATLAB Simulink (структура системы управления и расчет регуляторов), подключение созданной системы управления к виртуальной модели, совместное моделирование.

Специфика объекта исследования.

Материалы и методы

Робокар представляет собой платформу с ромбовидной схемой шасси (рис.1), где есть два ведущих колеса, расположенные на поперечной оси и

два вспомогательных колеса, расположенные на продольной оси. В робокаре используется привод с электродвигателем СЛ-621М, передача усилия от двигателей на колеса осуществляется с помощью планетарных редукторов с передаточным числом 4,7.

Рассмотрим структуру системы управления роботизированной платформы (рис. 2). В нее входят следующие элементы: оптимальный регулятор перемещения ОРП, электродвигатели ЭД, редукторы Р, исполнительные устройства ИУ (колеса), объект управления ОУ, который имеет два канала регулирования – по отклонению и продольному перемещению.

Задача управления продольным движением заключается в своевременном торможении платформы с целью предотвращения столкновений, а также точное позиционирование относительно причалов.

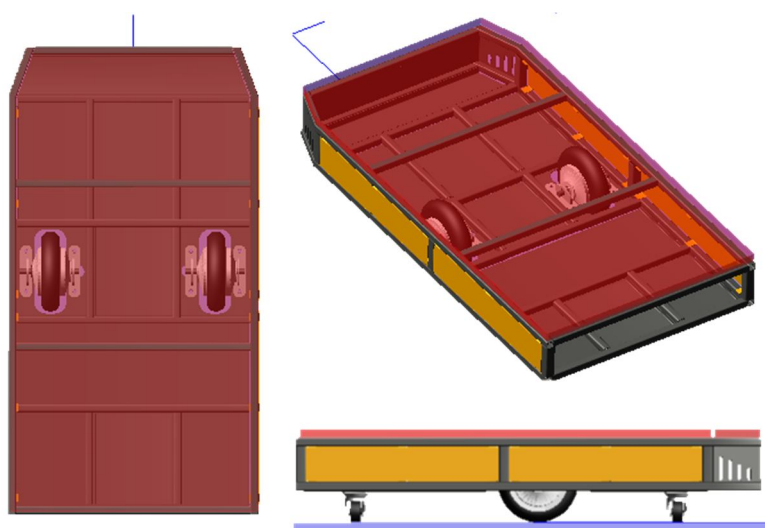


Рис. 1. Внешний вид модели роботизированной платформы в Adams

Fig. 1. Appearance of the robotic platform model in Adams

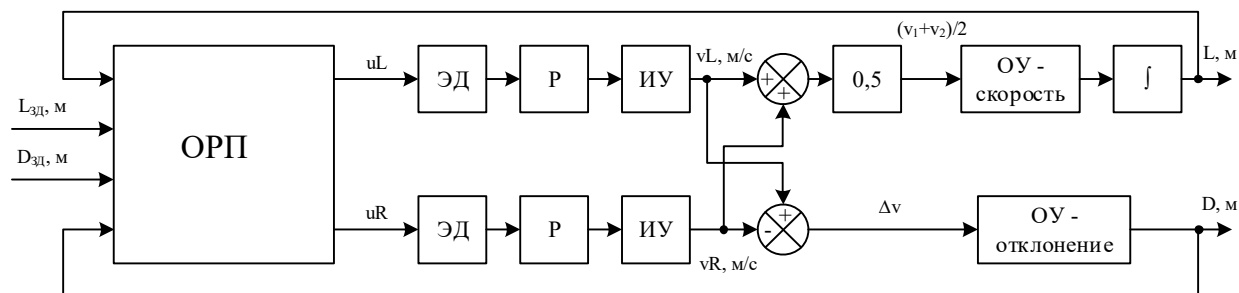


Рис. 2. Структура системы управления

Fig. 2. Structure of the control system

Эта задача решается путем применения принципа максимума Понтрягина [14]. При исследовании динамики продольного движения роботизированной транспортной тележки используется математическая модель ромбовидной схемы шасси, представленная в [15, 16]. Оптимальный алгоритм управления продольным движением робокара синтезирован с использованием принципа максимума Понтрягина и имеет вид [17]:

$$u = -\text{sign}\left(x_1 - (\text{sign } x_2)(|x_2| + (1 - e^{|x_2|}))\right), \quad (1)$$

где x_1 – разность между заданным перемещением и его текущим значением, x_2 – скорость изменения этого отклонения.

Надо отметить, что при проведении комплексного моделирования необходимо также настроить контур управления по отклонению. Для этих целей достаточно синтезировать модель системы управления, в которой объект управления описывается передаточными функциями по каждому из каналов [18, 19]. Рассмотрим канал контроля поперечного отклонения тележки от заданной траектории. Так как управляющим воздействием в этом случае является разность скоростей вращения колес, а выходной координатой отклоне-

ние от трассы, то передаточная функция будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{V_T(1 + Ts)}{s^2},$$

где $T = \frac{d}{V_T}$; d – расстояние от центра масс тележки до датчика отклонения центра масс от кинематической траектории; V_T – продольная скорость.

Результаты и их обсуждение

Подставляя значения параметров (продольная скорость $V_T = 1,5$ м/с, $d = 0,49$ м, $T = 0,327$ с), входящих в передаточную функцию, получим:

$$W(s) = \frac{1,5(1 + 0,327s)}{s^2}.$$

Передаточная функция двигателя, получаемая из модели двигателя постоянного тока, имеет вид:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K_{\text{ов}}}{T_m s + 1} = \frac{2,438}{0,499s + 1},$$

где $K_{\text{ов}} = \frac{1}{K_{\text{эм}}}$ – коэффициент передачи

двигателя; $T_m = \frac{JR}{K_{\text{эм}}^2}$ – электромехани-

ческая постоянная времени.

В работе [17] представлен вывод передаточной функции объекта управления (тележки) по скорости при продольном движении, которая для рассматриваемой модели ($m = 63,7$ кг) имеет вид:

$$W(s) = \frac{K_n}{Ts + 1} = \frac{3,897}{0,036s + 1}.$$

В случае, если требуется передаточная функция этого канала по перемещению, необходимо добавить последовательно включенное интегрирующее звено.

Располагая передаточными функциями элементов системы управления, можно составить модель в Simulink, соответствующую схеме, представленной

на рис. 2, с помощью которой, сняв необходимые характеристики, настроить регуляторы по каждому из каналов управления, воспользовавшись одной из методик выбора оптимальных параметров. Введя настроенный регулятор отклонения и оптимальный позиционный регулятор перемещения, реализующий функцию регулирования (1) в структуру системы управления виртуальной моделью (рис. 3) и осуществив совместную симуляцию, получим следующие переходные процессы продольного перемещения робокара и управляющего сигнала, подаваемого на исполнительные механизмы (рис. 4).

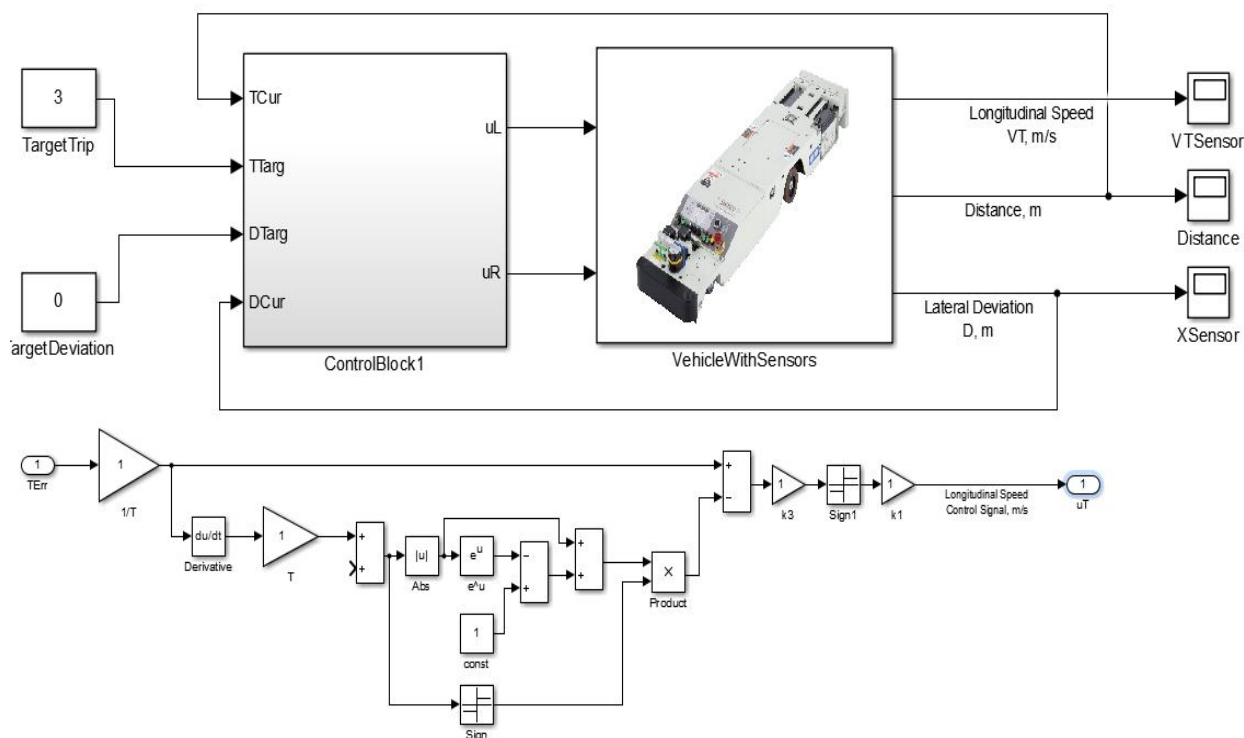


Рис. 3. Структура системы управления физической моделью в MATLAB Simulink с передачей данных в Adsms: общий вид и структура оптимального регулятора перемещения

Fig. 3. The structure of the control system for a physical model in MATLAB Simulink with data transfer to Adsms: general view and structure of the optimal motion controller

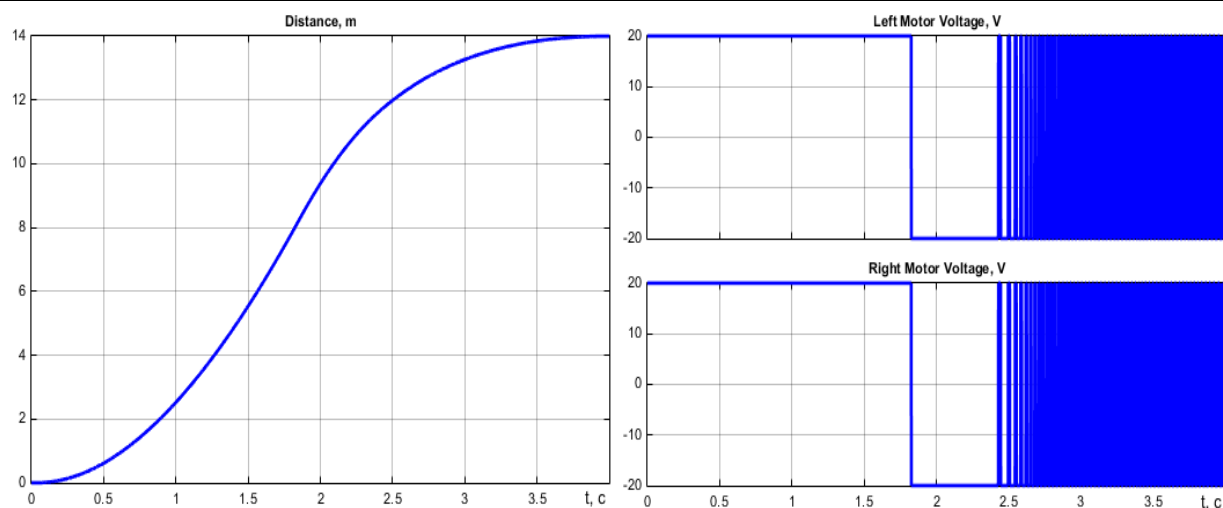


Рис. 4. Результат моделирования работы системы управления с оптимальным позиционным регулятором по перемещению

Fig. 4. The result of modeling the operation of a control system with an optimal positional controller for displacement

Как видно из приведенных результатов моделирования (см. рис.4), оптимальный позиционный закон управления, реализующий принцип максимума, отрабатывает задание с требуемыми показателями качества. В связи с этим, предложенный алгоритм можно использовать при технической реализации системы управления продольным перемещением мобильных роботов. При этом потребуются программно-аппаратная реализация алгоритмов управления, что может быть сделано на базе современных технических средств [20]. Описанный оптимальный регулятор продольного перемещения может быть также использован в целях предотвращения столкновений при движении нескольких роботизированных платформ.

На рис. 5 представлены фазовые портреты модели роботизированной платформы, где по осям откладывается разность между заданным перемещением и его текущим значением (x_1) и ско-

рость изменения этого отклонения (x_2). На фазовом портрете наблюдается так называемый скользящий режим работы системы [14], возникающий в нелинейной системе из-за наличия релейных элементов. Ступенька на начальном этапе фазовой траектории объясняется эффектом проскальзывания ведущих колес робота по поверхности. Статический коэффициент сцепления задан 0,6, динамический 0,55 (кривые с учетом проскальзывания обозначены цифрой 2, красный график). В связи с этим наблюдаются колебания в скользящем режиме.

Для фазового портрета при идеальных условиях (кривые 1, синий график), то есть когда проскальзывание отсутствует, наблюдается более плавный набор скорости, а также меньшая амплитуда колебаний в скользящем режиме. Однако в реальных условиях поведение системы будет более соответствовать кривым 2.

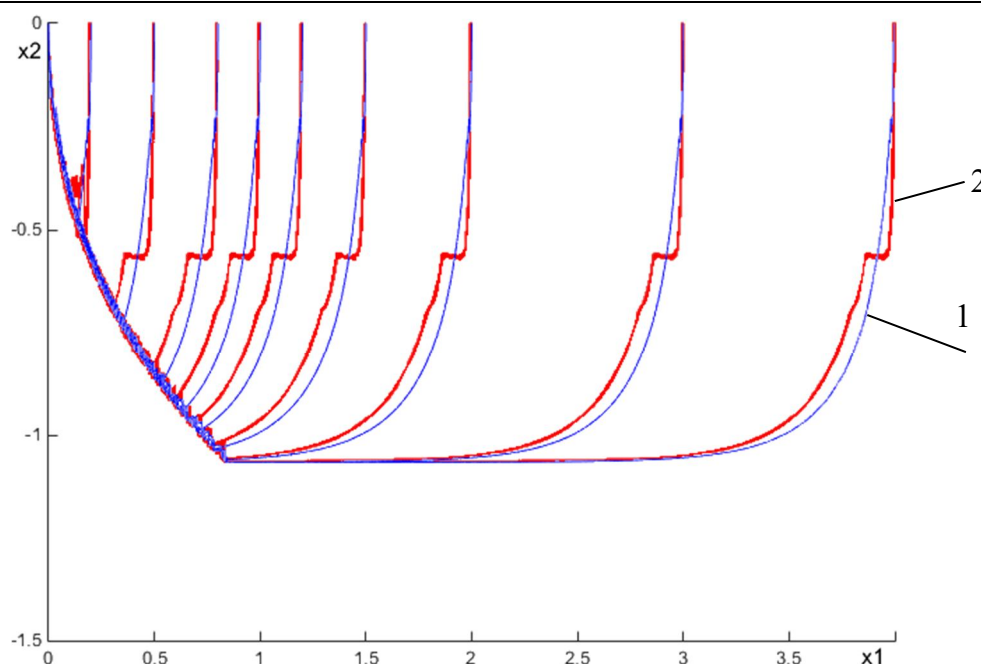


Рис. 5. Фазовый портрет системы управления при продольном перемещении:
кривые 1 – при отсутствии проскальзывания; **кривые 2** – в реальных условиях,
 μ (стат) = 0.6, μ (дин) = 0.55

Fig. 5. Phase portrait of the control system during longitudinal movement: **curves 1** – in the absence of slippage; **curves 2** – in real conditions, μ (stat) = 0.6, μ (dyn) = 0.55

Выводы

Оптимальный позиционный закон управления, реализующий принцип максимума, отрабатывает задание с требуемыми показателями качества. В связи с этим, предложенный алгоритм можно использовать при разработке систем управления продольным перемещением мобильных роботов. Совместное моделирование системы управления в среде Matlab и Adams является удобным ин-

струментом изучения динамики сложного объекта, поскольку отпадает необходимость в изготовлении физической модели, а также появляется возможность принять во внимание физические эффекты без разработки сложной аналитической модели. Такой способ моделирования динамических объектов можно рекомендовать для проектирования систем управления в научных, учебных и промышленных целях.

Список литературы

1. Viger I. Features of virtual prototyping technology at all stages of the product lifecycle //CAD/CAM/CAE Observer. 2016. № 8 (108). P. 48–53.

2. AGV Trajectory Control Based on Laser Sensor Navigation / T. L. Bui , Doan P.T., S.S. Park, H. K. Kim, S. B. Kim // International Journal of Science and Engineering. 2013. Vol. 4(1): 16-20. P. 39–43.

3. Ivanjko E., Petrinić T., Petrović I. Modelling of Mobile Robot Dynamics // EUROSIM 2010, 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Prague, Czech Republic, 06-10.09.2010. Prague, 2010. Vol. 2. 9 p. URL: http://www.google.ru/url?sa=t&rect=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F228561343_Modeling_of_Mobile_Robot_Dynamics%2Ffile%2F504635256b78692e72.pdf&ei=V7lbU7HuAuGfyQPI8YG4DA&usg=AFQjCNHkX15eujeaVwSrM8F1ueQByAgHJQ&sig2=mx3Ba0ecN3b-6WsJqVJWbQ&bvm=bv.65397613,d.bGE.

4. Dynamic Models of an AGV Based on Experimental Results / J. I. Suárez , B.M. Vinagre, F. Gutierrez, J. E. Naranjo, Y. Q. Chen // 5th Symposium Intelligent autonomous vehicles. Oxford, 2005. Vol. 1. P. 275-280.

5. Рыбин И. А., Рубанов В. Г., Апаршев С. А. Гибридная модель динамики мобильного робота // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф.: в 10 т. / под общ. ред. А. А. Большакова. Волгоград; Харьков, 2012. Т. 10. С. 6–8.

6. Шеховцов Ю. А., Рыбин И. А., Рубанов В. Г. Гибридное моделирование транспортно-складских процессов при использовании роботов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23: сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под общ. ред. В. С. Балакирева. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. Т. 5. С. 238–248.

7. Герасимов В.Н., Михайлов Б.Б. Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск "Робототехнические системы". 2012. № 6. С.83 – 92.

8. Рыбин И.А., Рубанов В.Г., Дююн Т.А. Способ исследования движения мобильного робота на стационарной установке удаленного доступа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 11. 2014. С.14-21.

9. Зенкевич С.Л., Назарова А.В. Система управления мобильного колесного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2006. № 3. С.31 – 51.

10. Laumond J.-P., ed. Robot motion planning and control (Lectures Notes in Control and Information Sciences, vol. 229). Berlin, Springer, 1998. 343 p.

11. Human-friendly interaction for learning and cooperation / S. Kristensen, S. Horstmann, J. Klandt, F. Lohner, A. Stopp // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea, 2001. P.2590 - 2595.

12. Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2013. Vol. 71 (1). P. 85 – 108.
13. Бобырь М.В., Титов В.С. Мягкий нейронечеткий алгоритм управления мобильным роботом // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. №10 (171). С.144 – 157.
14. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиздат, 1969. 384 с.
15. Sethi S.P., Thompson G.L. Optimal control theory: applications to management science and economics. Berlin, Springer, 2005. 521 p.
16. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений // сб. трудов. науч. конф. ВСПУ-2014 / Инст. пробл. управ. им. В.А. Трапезникова РАН. Москва, 2014. С. 67–78.
17. Порхало В.А., Рубанов В.Г., Костин С.В. Повышение живучести роботизированных транспортных средств на автоматизированном складе // *Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. / под общ. ред. А.А. Большакова*. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2017. Т.4. 140 с.
18. Рубанов В.Г., Луакурва Дж.П., Порхало В.А. Моделирование динамики движения мобильного робота в среде Matlab // *Известия ТулГУ*. 2006. № 1. С. 126–134.
19. Bushuev D.A., Kiseleva T. Y., Rubanov V.G. Virtual prototype for co-simulation of hub-motor dynamics with brushless DC motor and elements of fault-tolerant control // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems MEACS 2018)*. 560. 012103. 2019: 7 p.
20. Порхало В.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З. Информационные представления адаптивного трехпозиционного алгоритма для его аппаратных и программных реализаций // *Научные ведомости БГУ*. 2011. № 1(96). Вып. 17/1. С. 161–168.

References

1. Viger I. Features of virtual prototyping technology at all stages of the product lifecycle // *CAD/CAM/CAE Observer*, 2016, no. 8 (108), pp. 48–53.
2. Bui, T. L., Doan P.T., Park S.S., Kim H. K., Kim S. B. AGV Trajectory Control Based on Laser Sensor Navigation. *International Journal of Science and Engineering*, 2013, vol. 4(1), 16-20, pp. 39–43.
3. Ivanjko E., Petrinić T., Petrović I. Modelling of Mobile Robot Dynamics. *EUROSIM 2010, 7th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, Prague, Czech Republic, 06-10.09.2010. Prague, 2010, vol. 2, 9 p. Available at: <http://www.google.ru/url?sa=t&rc=t=j>

& q= & esrc=s & source=web & cd=1 & cad=rja & uact=8 & ved=0CCcQFjAA & url=http %3A %2F %2F www.researchgate.net %2F publication%2F 228561343_Modelling_of_Mobile_Robot_Dynamics %2F file%2F 504635256b78692e72.pdf & ei=V7lbU7HuAuGfyQPI8YG4DA & usg=AFQjCNHkX15eujeaVwSrM8F1ueQByAgHJQ & sig2=mx3Ba0ecN3b-6WsJqVJWbQ & bvm=bv.65397613,d.bGE.

4. Suárez J. I., Vinagre B.M., Gutierrez F., Naranjo J. E., Chen Y. Q. Dynamic Models of an AGV Based on Experimental Results. *5th Symposium Intelligent autonomous vehicles*. Oxford, 2005, vol. 1, pp. 275-280.

5. Rybin I. A., Rubanov V. G., Aparshev S. A. [Hybrid model of the dynamics of a mobile robot]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT 25 sb. trudov XXV Mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT-25. coll. of proceedings of the XXV Intern. scientific Conf.]. Vol. 10. Section 12. Kharkov; 2012, pp. 6–8 (In Russ.).

6. Shekhovtsov Y. A., Rybin I. A., Rubanov V. G. [Hybrid modeling of transport and storage processes using robokars]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT 23* [Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT-23: coll. of proceedings of the XXIII International scientific conf.]. Saratov, 2010, vol. 5, section 5, pp. 238–248 (In Russ.).

7. Gerasimov V.N., Mikhailov B.B. Reshenie zadachi upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota pri nalichii dinamicheskikh prepyatstviy [Solving the problem of controlling the movement of a mobile robot in the presence of dynamic obstacles]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Priborostroenie. Spetsvypusk "Robototekhnicheskie sistemy" = Vestnik BMSTU. Instrumentation. Special issue "Robotic Systems"*, 2012, no. 6, pp. 83 – 92 (In Russ.).

8. Rybin I. A., Rubanov V. G., Duun T. A. Sposob issledovaniya dvizheniya mobil'nogo robota na statsionarnoi ustanovke udalennogo dostupa [Method for studying the movement of a mobile robot on a stationary remote access installation]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics*, 2014, no.11, pp. 14–21 (In Russ.).

9. Zenkevich S. L., Nazarova A.V. Sistema upravleniya mobil'nogo kolesnogo robota [Mobile wheeled robot control system]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. "Priporostroenie" = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. "Instrument making"*, 2006, no. 3, pp. 31 – 51 (In Russ.).

10. Laumond J.-P., ed. Robot motion planning and control (Lectures Notes in Control and Information Sciences, vol. 229). Berlin, Springer, 1998, 343 p.

11. Kristensen S., Horstmann S., Klandt J., Lohner F., Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea, 2001, pp.2590 - 2595.
12. Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, vol. 71 (1), pp. 85 – 108.
13. Bobyr M. V., Titov V. S. Myagkii neironechetkii algoritm upravleniya mobil'nyim robotom [Soft neuro-fuzzy control algorithm for mobile robot]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya YUFU. Technical Science*, 2015, no. 10 (171), pp. 144-157 (In Russ.).
14. Pontryagin L.S., Boltyanskiy V.G. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [The mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Fizmatizdat Publ., 1969. pp. 338.
15. Sethi S.P., Thompson G.L. *Optimal control theory: applications to management science and economics*. Berlin, Springer, 2005. 521 p. (In Russ.).
16. Chernousko F.L., Bolotnik N.N., Gradetsky V.G. [Mobile robots: problems of control and optimization of movements]. *Sb. trudov. nauch. konf. VSPU-2014* [Sat works. scientific conf. VSPU-2014]. 2014, pp. 67–78 (In Russ.).
17. Porkhalo V.A., Rubanov V.G., Kostin S.V. [Improving the survivability of robotic vehicles in an automated warehouse]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh. Sb. tr. mezhdunar. nauch. konf.* [Mathematical methods in engineering and technology. Proceedings of the international. scientific Conf.]. Saint-Petersburg, 2017, Vol. 4 pp. 100–104 (In Russ.).
18. Rubanov V. G., J. Lyakurwa.P., Porkhalo V. A. Modelirovanie dinamiki dvizheniya mobil'nogo robota v srede Matlab [Modeling of dynamics of movement of a mobile robot in the Matlab environment]. *Izvestiya TulGU = Izvestiya TulGU*, 2006, no. 1, pp. 126–134 (In Russ.).
19. Bushuev D.A., Kiseleva T. Y., Rubanov V.G. Virtual prototype for co-simulation of hub-motor dynamics with brushless DC motor and elements of fault-tolerant control. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems MEACS 2018)*, 2019, 7 p.
20. Porkhalo V. A., Bazhanov A. G., Magergut V. Z. Informatsionnye predstavleniya adaptivnogo trekhpozitsionnogo algoritma dlya ego apparatnykh i programmnykh realizatsii [Information representations of an adaptive three-position algorithm for its hardware and software implementations]. *Nauchnye vedomosti BGU = Scientific statements of Belgorod State University*, 2011, no1(96), is.17/1, pp. 161–168 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Порхало Василий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: porhalo@mail.ru

Рубанов Василий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Бажанов Александр Геральдович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: all_exe@mail.ru

Луценко Оксана Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: lutsenko.ov@bstu.ru

Vasily A. Porkhalo, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Engineering Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: porhalo@mail.ru

Vasily G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Engineering Cybernetics, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Alexander G. Bazhanov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Engineering Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: all_exe@mail.ru

Oksana V. Lutsenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the of Standardization and Quality Management Department, Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: lutsenko.ov@bstu.ru

Применение адаптивного трёхпозиционного регулирования в системе автоматизированного управления тепловым объектом

В. Г. Рубанов¹ ✉, Д. В. Величко¹, Д. А. Бушуев¹

¹ Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова
ул Костюкова 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Резюме

Цель исследования. В качестве объекта управления рассматривался тепловой агрегат в виде модифицированной двухъярусной туннельной печи, предназначенной для производства пеностекольных блоков. Основной целью данной работы являлось исследование, состоящее в повышении качества выпускаемой продукции, снижении брака и в конечном итоге в повышении производительности за счёт разработки автоматизированной системы управления тепловым полем технологического агрегата по производству пеностекольных блоков с использованием адаптивного трёхпозиционного закона управления с адаптацией под нагрузку средней позиции регулятора.

Методы. На начальном этапе разрабатывалась функциональная схема автоматизации модифицированной двухъярусной туннельной печи. Для моделирования динамических дискретных систем применялся математический аппарат в виде помеченных сетей Петри, в результате чего осуществлялась алгоритмизация технологического процесса производства пеностекольных блоков. Данное решение поставленной задачи целесообразно использовать в виде методики алгоритмизации и программирования логического контроллера, входящего в структуру системы автоматизации. Разработанную функциональную схему автоматизации можно преобразовать в мнемосхему, тем самым реализовав SCADA-систему, предназначенную для управления и визуализации, диагностики и слежения за процессом на централизованном пункте управления, что является частью автоматизированного рабочего места оператора-технолога. Изложенный подход к разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом имеет обобщённое представление. Решение носит методологический характер, демонстрирующий удобство использования модели в форме помеченной сети Петри.

Результаты. В ходе исследований разработан граф операций производственного процесса с дискретным адаптивным трёхпозиционным регулированием средней позиции под нагрузку. Для проверки правильности графа операций выполнено построение дерева достижимых маркировок, и проведен его анализ на соблюдение условий безопасности и живости сети. Разработана блок-схема основного алгоритма и алгоритма адаптации управляющей программы контроллера.

Заключение. Изложенный подход к разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом производства пеностекольных блоков имеет обобщённый характер хотя и проиллюстрирован на применении к конкретному объекту, поскольку допускает изменение как числа переменных x_i , z_i , так и их функционального назначения, то есть вместо датчиков, толкателей, задвижек, значений параметров, например температуры, могут применяться другие элементы автоматики и другие физические переменные и их параметры. Таким образом, представленное решение носит методологический характер, демонстрирующий удобство использования модели в форме сети Петри и дерева достижимых маркировок для алгоритмизации и программирования логического контроллера, входящего в структуру системы автоматизации.

Ключевые слова: адаптивное трёхпозиционное регулирование; помеченные сети Петри; граф операций; программируемый логический контроллер.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2019-070 от 29.11.2019 г.

Для цитирования: Рубанов В. Г., Величко Д. В., Бушуев Д. А. Применение адаптивного трёхпозиционного регулирования в системе автоматизированного управления тепловым объектом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 230-243. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-230-243>.

Поступила в редакцию 18.09.2020

Подписана в печать 23.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Application of Adaptive Three-Position Control in the System of Automated Control of a Thermal Object

Vasiliy G. Rubanov ¹ ✉, Dmitry V. Velichko ¹, Dmitry A. Bushuev ¹

¹ Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

Abstract

Purpose of research. The control object was considered to be a thermal unit in the form of a modified two-tier tunnel furnace designed for the production of foam glass blocks. The main goal of this work was to improve the quality of products, reduce defects, and ultimately increase productivity by developing an automated system for controlling the thermal field of a technological unit for the production of foam glass blocks using an adaptive three-position control law with adaptation to the load of the average position of the regulator.

Methods. At the initial stage, a functional automation scheme for a modified two-tier tunnel furnace was developed. To model dynamic discrete systems, a mathematical apparatus was used in the form of labeled Petri nets, which resulted in algorithmization of the technological process for the production of foam glass blocks. This solution to the problem should be used as a method of algorithmization and programming of the logic controller that is part of the automation system structure. The developed functional automation scheme can be converted into a mnemonic circuit, thereby implementing a SCADA system designed for control and visualization, diagnostics and monitoring of the process at a centralized control point, which is part of the automated workplace of the operator-technologist. The described approach to the development of an automated process control system has a generalized representation. The solution is methodological in nature, demonstrating the usability of the model in the form of a labeled Petri net.

Results. In the course of research, a graph of operations of the production process with discrete adaptive three-position control of the average position under load was developed. To check the correctness of the graph of operations, a tree of achievable markings was built, and its analysis was performed for compliance with security conditions and network liveliness. A block diagram of the main algorithm and the algorithm for adapting the controller's control program is developed.

Conclusion. The described approach to the development of an automated process control system for the production of foam glass blocks has a generalized character, although it is illustrated by applying it to a specific object, since it allows changing both the number of variables x_i , z_i , and their functional purpose, that is, instead of sensors, pushers, valves, parameter values, for example, temperature, other automation elements and other physical variables and their parameters can be used. Thus, the presented solution is methodological in nature, demonstrating the convenience of using the model in the form of a Petri net and a tree of achievable markings for algorithmization and programming of a logic controller that is part of the automation system structure.

Keywords: adaptive three-position control; marked Petri net; graph of operations; programmable logic controller.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: This work was supported by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation under the agreement No. 075-11-2019-070.

For citation: Karlov A. E., Postolny A.A., Fedorov A.V., Jatsun S. F. Application of Adaptive Three-Position Control in the System of Automated Control of a Thermal Object. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 230-243 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-230-243>.

Received 18.09.2020

Accepted 23.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

К группе инновационных материалов, обладающих достаточно широким спектром положительных свойств, относится пеностекло [1-3]. Используется данный материал как в строительстве, так и в энергетике, машиностроении и нефтехимической отрасли.

Наиболее известными производителями пеностеклянной продукции в странах дальнего зарубежья являются «Pittsburgh Corning» (США) и «Lanzhou Pengfei Heat Preservation Co., Ltd.»

(КНР); в России и странах ближнего зарубежья: ОАО «Гомельстекло» (Беларусь), ЗАО «СТЭС-Владимир» (РФ).

Производство (рис. 1) качественного блочного пеностекла отличается высокой трудоемкостью и относительной сложностью автоматизации, что следует из особенностей физико-химических процессов, происходящих на разных стадиях его изготовления (вспенивание шихты, термоудар вязкой массы, отжиг пеностеклянных блоков) [4].

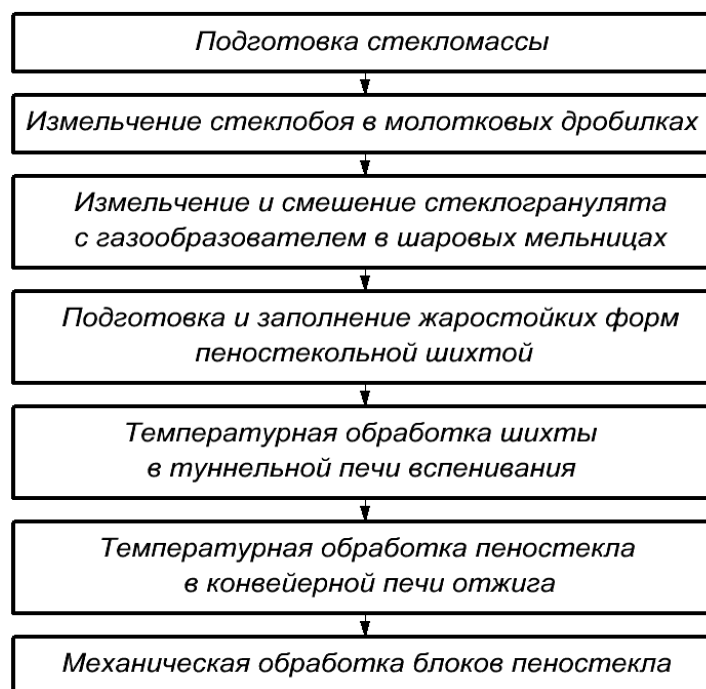


Рис. 1. Технологический процесс производства пеностекла

Fig. 1. Technological process of foam glass production

Оптимизация температурного режима теплового агрегата (рис. 2) представляет собой один из наиболее значимых этапов в технологии производства любого материала, в том числе и пеностеклянных продуктов.

Достижение сформулированной цели предполагает решение следующих задач: во-первых, получение математической модели технологического процесса производства пеностекла и оценка её адекватности [5-9]; во-вторых, разработка эффективного способа экспрес-

анализа пеностеклянной шихты [10-11], позволяющего определить основные её параметры и характеристики, в частности, температуру вспенивания $T_{всп}$ (см. рис. 2); в-третьих, разработка нелинейной системы адаптивного трёхпозиционного управления и исследование её динамики; в-четвёртых, разработка структуры системы управления, алгоритмов управления и их программно-аппаратной реализации [12-19].

В данной работе приведены результаты решения четвёртой задачи.

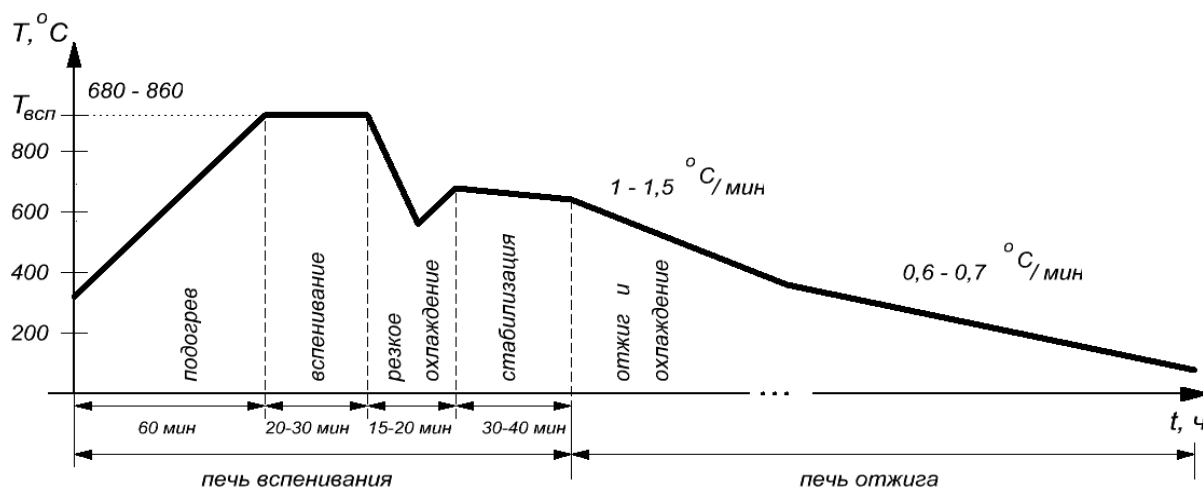


Рис. 2. Температурный режим работы теплового агрегата

Fig. 2. Temperature mode of operation of the heat unit

Материалы и методы

Очевидным является тот факт, что используемый режим позволяет обеспечивать получение пеностекла с широким спектром свойств.

Анализ технологического процесса производства пеностеклянных блоков, уровня автоматизации отдельных технологических переделов и сформулированные требования к системам управления тепловым полем технологическо

го агрегата позволили сформулировать цель научного исследования, состоящую в повышении качества выпускаемой продукции, снижении брака и в конечном итоге к повышению производительности за счёт разработки автоматизированной системы управления тепловым полем технологического агрегата по производству пеностеклянных блоков с использованием адаптивного позиционного закона управления.

В качестве объекта автоматизации рассматривался модифицированный вариант двухъярусной туннельной печи

[20], функциональная схема которой приведена на рис. 3.

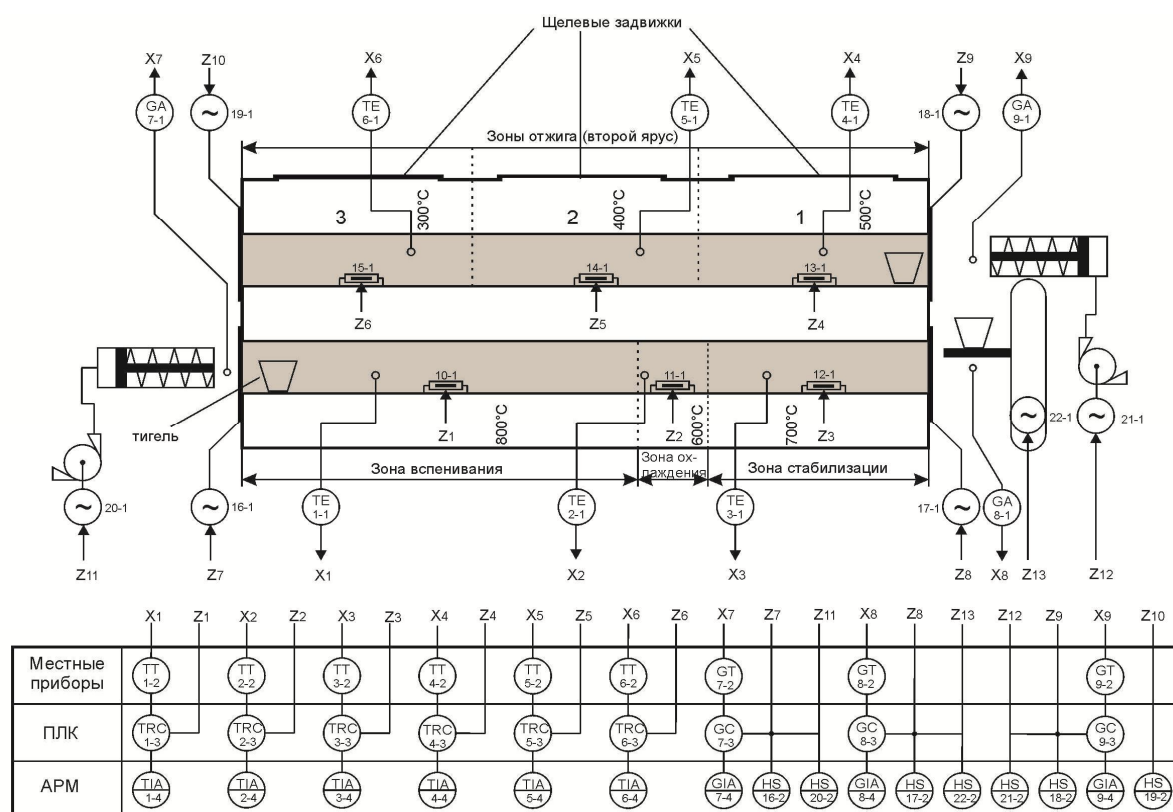


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации двухъярусной туннельной печи

Fig. 3. Functional diagram of automation of a two-tier tunnel furnace

Этот автоматизированный тепловой агрегат выполняет работу следующим образом [13, 14]. На начальной стадии производится настройка температурного режима двухъярусной туннельной печи на параметры пеностеклольной шихты, представляющей собой смесь стеклобоя и газообразователя, взятых в определённых пропорциях. Данная смесь поступает из помольного участка, где с помощью весовых дозаторов ей заполняются специализированные металлические формы, предназначенные для пеностеклольной шихты. Далее поэтапно металлические формы с шихтой проходят секции печи

вспенивания, расположенной на нижнем уровне. Перемещение на верхний уровень осуществляется с помощью подъёмника, где происходит отжиг пеностеклольных блоков.

Для управления подобного рода системами можно использовать программируемые логические контроллеры (ПЛК). Приведенную схему автоматизации можно преобразовать в мнемосхему, тем самым реализовав SCADA-систему, предназначенную для управления и визуализации, диагностики и слежения за процессом на централизованном пункте управления, что является

ся частью автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора-технолога.

Результаты и их обсуждение

Для алгоритмизации процесса, связанного с управлением теплового агре-

гата, в качестве инструментария использовались помеченные сети Петри. Граф операций (рис. 4) должен составляться с учётом конкретно определённых условий срабатывания датчиков.

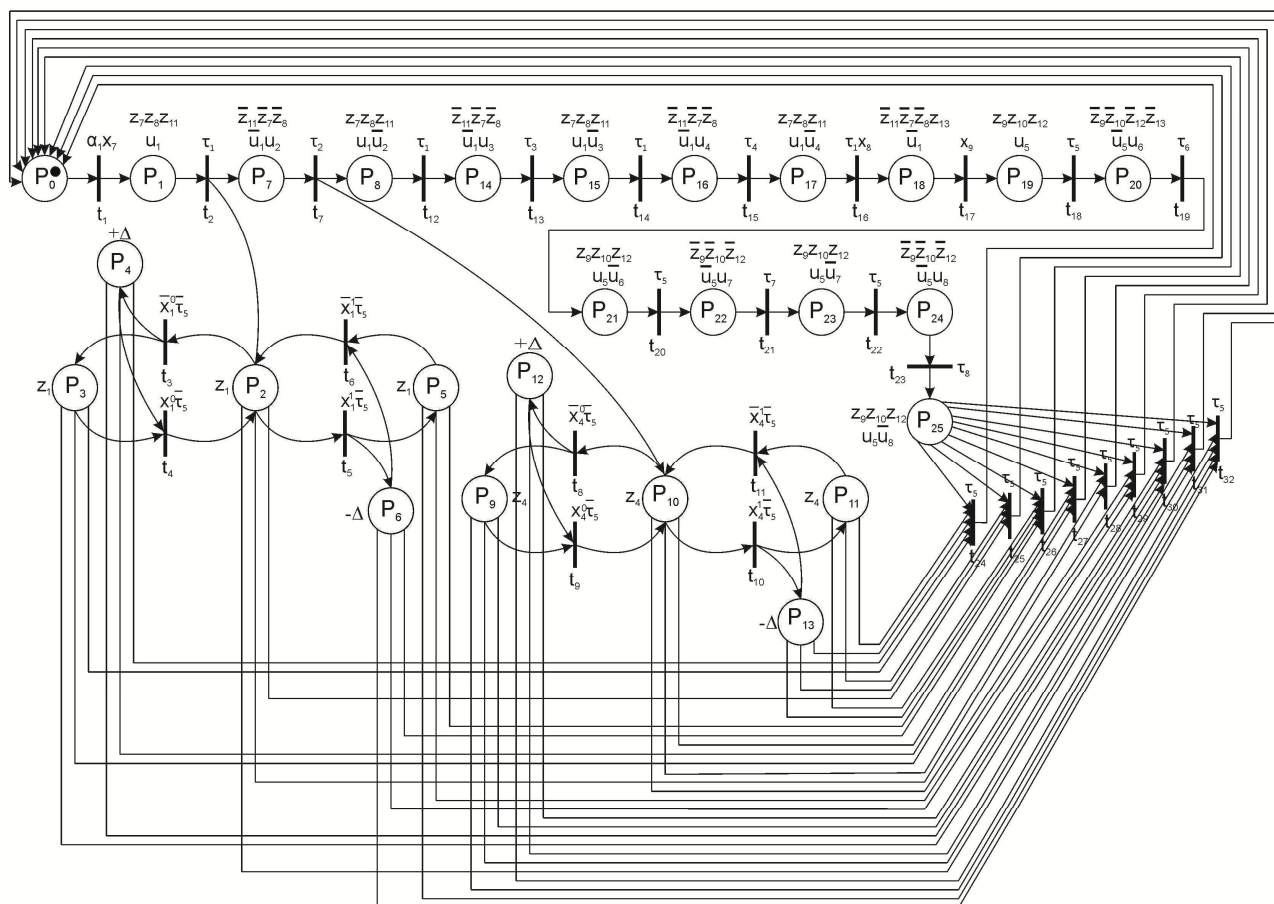


Рис. 4. Граф операций производственного процесса с адаптивным трёхпозиционным регулированием

Fig. 4. Graph of production process operations with adaptive three-position control

Определяются параметры начального состояния объекта: α_1 – сигнал с органа управления; x_i – сигналы с датчиков температуры и датчиков положения; z_i – сигналы управления, подаваемые на ТЭНы, приводы задвижек, двигатели гидравлических толкателей и двигатель подъёмника; u_i – сигналы управления включением таймеров; τ_i – сигналы с таймеров.

В этой сети каждая позиция соответствует определённой операции с начальной маркировкой в P_0 .

В данной работе решалась задача построения адаптивной трёхпозиционной системы регулирования с адаптацией под нагрузку средней позиции при фиксированных крайних позициях статической характеристики. Для обоснования этого вида регулирования осу-

ществлялся анализ динамики нелинейного объекта с помощью метода припасовывания граничных значений и одновременно решалась задача, связанная с модификацией метода. Применение такого подхода для построения переходных характеристик и фазовых портретов является наиболее актуальным при исследовании систем управления с дискретным адаптивным регулированием.

В случае применения дискретной адаптации выбор шага изменения средней позиции статической характеристики регулятора (шага адаптации) целесо-

образно делать, пользуясь следующим соотношением:

$$\Delta \leq (0,1 \div 0,05) (\text{ВП} - \text{НП}), \quad (1)$$

где Δ – шаг адаптации; ВП – верхняя позиция статической позиции регулятора; НП – нижняя позиция статической позиции регулятора.

С помощью дополнительно разработанного дерева достижимых маркировок (рис. 5) осуществлялась проверка правильности построения графа операций, а также выполнялся анализ графа на соблюдение условий безопасности и живости сети.

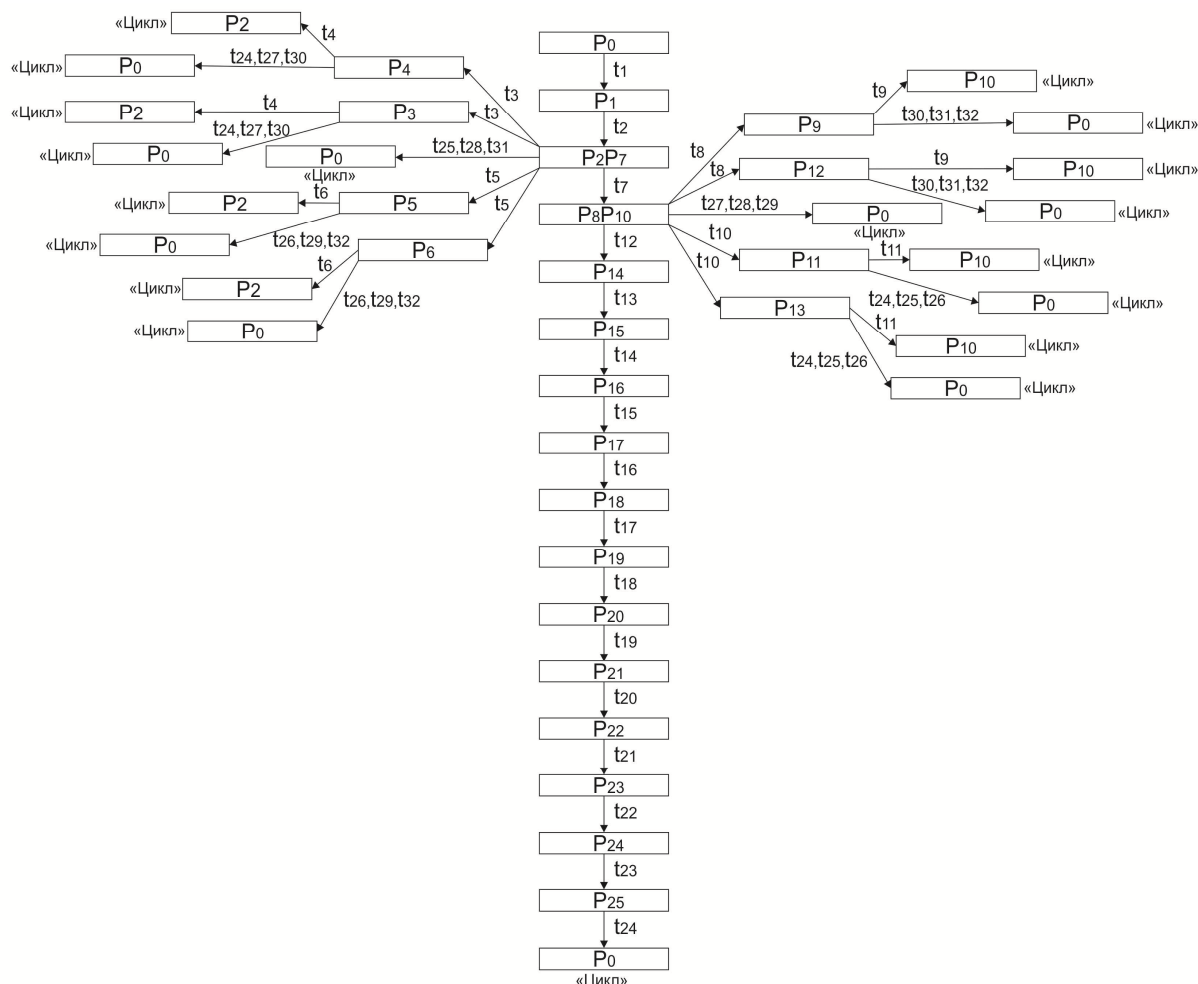


Рис. 5. Дерево достижимых маркировок производственного процесса с адаптивным трёхпозиционным регулированием

Fig. 5. The tree of reachable markings of the production process with an adaptive three-position regulation

На следующей стадии разрабатывается программное обеспечение, реализующее логику функционирования системы управления. Программное обеспечение можно разбить на два уровня. Во-первых, нижний уровень, соответствующий рабочей программе контроллера, которая реализует разработанные алгоритмы, и, во-вторых, верхний уро-

вень, соответствующий человеко-машинному интерфейсу, который в свою очередь будет обеспечивать наглядное протекание производственного процесса для оператора. Мнемосхема двухъярусной туннельной печи представлена на рис. 6, блок-схема основного алгоритма – на рис. 7.

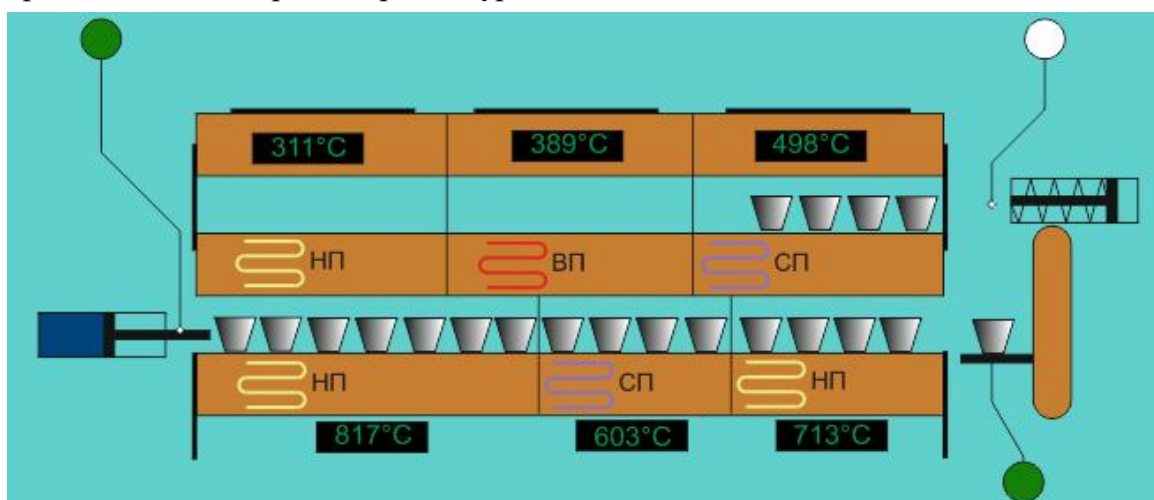


Рис. 6. Мнемосхема двухъярусной туннельной печи

Fig. 6. Mnemonic diagram of a two-tier tunnel furnace

Кроме этого, для определения основных параметров, с целью задания температурного режима работы теплового агрегата, спроектирована и разработана автоматизированная термодинамическая система экспресс-анализа пеностекляной шихты, функционирующая в режиме реального времени.

Выводы

Изложенный подход к разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом производства пеностекляных блоков имеет обобщённый характер хотя и проиллюстрирован на применении к конкретно-

му объекту, поскольку допускает изменение как числа переменных x_i , z_i , так и их функционального назначения, то есть вместо датчиков, толкателей, задвижек, значений параметров, например температуры, могут применяться другие элементы автоматики и другие физические переменные и их параметры. Таким образом, представленное решение носит методологический характер, демонстрирующий удобство использования модели в форме сети Петри и дерева достижимых маркировок для алгоритмизации и программирования логического контроллера, входящего в структуру системы автоматизации.

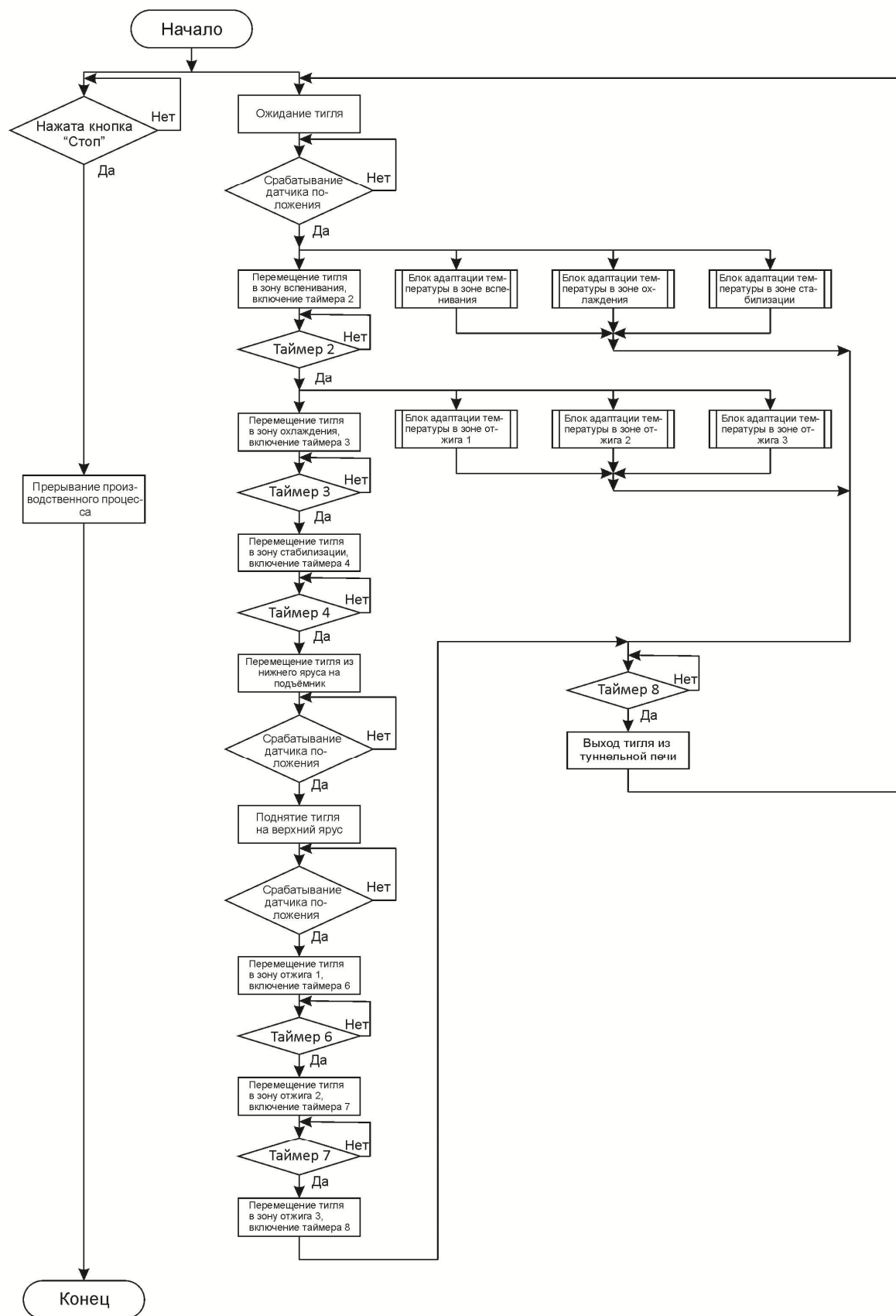


Рис. 7. Блок-схема основного алгоритма

Fig. 7. Block diagram of the main algorithm

Список литературы

1. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.
2. Шилл Ф. Пеностекло. Производство и применение. М.: Стройиздат, 1965. 308 с.
3. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал / Н.И. Минько, О.В. Пучка, Е.И. Евтушенко [и др.] // Фундаментальные исследования. Технические науки. 2013. №6. С.849-854.
4. Севостьянов В.С., Кононыхин В.С., Зубаков А.П. Техника и безотходная технология производства пеностекла // Строительство. 2000. №10. С.74-79.
5. Rubanov V.G., Velichko D.V., Lutsenko O.V. Mathematical model of temperature field dynamics in complex shaped glass articles during firing // Glass and Ceramics. 2018. № 5-6 (75). P.171-176.
6. Рубанов В.Г., Величко Д.В., Луценко О.В. Математическая модель динамики температурного поля стеклоизделий сложной конфигурации при их отжиге // Стекло и керамика. 2018. №5. С.3-8.
7. Величко Д.В., Магергут В.З. Построение детерминированной и стохастической динамических моделей процесса нагрева пеностекольной шихты // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С.90–94.
8. Величко Д.В., Рубанов В.Г. Математическое моделирование процессов тепло- и влагопереноса при нагреве пеностекольной шихты // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. / отв. ред. В.С. Балакирев. Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. Т.3. С.18-21.
9. Величко Д.В., Рубанов В.Г. Математическое моделирование теплотехнологических процессов с межфазным переходом // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. / отв. ред. В.С. Балакирев. Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. Т.3. С.53-55.
10. Городов Р.В. Экспериментальное определение зависимости температуропроводности пеностекольной шихты от температуры // Известия ТПУ. 2009. Т.314, №4. С.33-37.
11. Величко Д.В., Рубанов В.Г. Параметрическая идентификация термодинамической системы экспресс-анализа // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXXI Междунар. науч. конф. / отв. ред. А.А. Большаков. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2018. Т.3. С.22-26.
12. Магергут В.З., Величко Д.В., Костин С.В. Адаптивное трёхпозиционное регулирование в системе управления туннельной печи // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXIX Междунар. науч. конф. / общ. ред. А.А. Большаков. Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. Т.4. С.44-47.

13. Магергут В.З., Величко Д.В., Андреев А.А. Автоматизация двухъярусной туннельной печи с использованием адаптивного трёхпозиционного регулятора // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф. / отв. ред. А.А. Большаков. Саратов: Изд-во СГТУ, 2015. Т.8. С.133-139.

14. Магергут В.З., Величко Д.В., Андреев А.А. Система автоматического перемещения тиглей в двухъярусной туннельной печи для производства пеностеклянных блоков // Вестник ПНИПУ. 2015. №14. С.108-122.

15. Романников Д.О., Марков А.В. Об использовании программного пакета CPN Tools для анализа сетей Петри // Сборник научных трудов НГТУ. 2012. №2 (68). С.105-116.

16. Порхало В.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З. Информационные представления адаптивного трёхпозиционного алгоритма для его аппаратных и программных реализаций // Научные ведомости БГУ. 2011. №1 (96). Вып.17/1. С.161-168.

17. Автоматизированная система управления производством пеностеклянных теплоизолирующих облицовочных блоков / В.Г. Рубанов, А.С. Кижук, О.В. Луценко [и др.] // Строительство. 2000. №10. С.93-97.

18. Ильюшин Ю.В. Проектирование системы управления температурными полями туннельных печей конвейерного типа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникация. Управление. 2011. №3. С.67-72.

19. Юдицкий С.А., Магергут В.З. Логическое управление дискретными процессами. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.

20. Пат. 2146033 Российская Федерация, МПК F27B 9/02, F27B 9/06. Туннельная печь-утилизатор / Волынский В.А., Ивахнюк В.А., Колчунов В.И., Кононыхин В.С., Мальцев А.Н., Новичков С.Г., Титаренко Ю.Д., Уваров В.А.; заявитель и патентообладатель «Белгород. технол. акад. строит. материалов». №99111279/03; заявл. 31.05.1999; опубл. 27.02.2000. 6 с.

References

1. Demidovich B.K. *Penosteklo* [Foam glass]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1975. 248 p. (In Russ.).

2. Shill F. *Penosteklo. Proizvodstvo i primeneniye* [Foam glass. Production and application]. Moscow, Strojizdat Publ., 1965. 308 p. (In Russ.).

3. Min'ko N.I., Puchka O.V., Evtushenko E.I. [et al.]. *Penosteklo – sovremennyy jeffektivnyy neorganicheskij teploizoljacionnyy material* [Foam glass is a modern effective inorganic thermal insulation material]. *Fundamental'nye issledovaniya. Tehnicheskie nauki = Fundamental research. Technical Science*, 2013, no. 6, pp. 849-854 (In Russ.).

4. Sevost'janov V.S., Kononyhin V.S., Zubakov A.P. Tehnika i bezothodnaja tehnologija proizvodstva penostekla [Techniques and waste-free foam glass production technology]. *Stroitel'stvo = Construction*, 2000, no. 10, pp. 74-79 (In Russ.).

5. Rubanov V.G., Velichko D.V., Lutsenko O.V. Mathematical model of temperature field dynamics in complex shaped glass articles during firing. *Glass and Ceramics*, 2018, no. 5-6 (75), pp. 171-176.

6. Rubanov V.G., Velichko D.V., Lutsenko O.V. Matematicheskaja model' temperaturnogo polja stekloizdelij slozhnoj konfiguracii pri ih otzhige [Mathematical model of temperature field dynamics in complex shaped glass articles during firing]. *Steklo i keramika = Glass and Ceramics*, 2018, no. 5, pp. 3-8 (In Russ.).

7. Velichko D.V., Magergut V.Z. Postroenie determinirovannoj i stohasticheskoj dinamicheskikh modelej processa nagreva penostekol'noj shihty [Construction of Deterministic and stochastic dynamic models of the foam glass charge heating process]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2015, no. 2, pp. 90-94 (In Russ.).

8. Velichko D.V., Rubanov V.G. [Mathematical modeling of heat and moisture transfer processes during heating of foam glass charge]. *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saratov, 2010, vol. 3, pp.18-21 (In Russ.).

9. Velichko D.V., Rubanov V.G. [Mathematical modeling of heat-technological processes with interfacial transition]. *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saratov, 2008, vol. 3, pp. 53-55 (In Russ.).

10. Gorodov R.V. Jeksperimental'noe opredelenie zavisimosti temperaturoprovodnosti penostekol'noj shihty ot temperatury [Experimental determination of the temperature dependence of the foam glass charge on the temperature]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnical University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 33-37 (In Russ.).

11. Velichko D.V., Rubanov V.G. [Parametric Identification of a thermodynamic rapid analysis system]. *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saint-Peterburg, 2018, vol. 3, pp. 22-26 (In Russ.).

12. Magergut V.Z., Velichko D.V., Kostin S.V. [Adaptive three-position control in the tunnel furnace control system]. *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saratov, 2016, vol. 4, pp. 44-47 (In Russ.).

13. Magergut V.Z., Velichko D.V., Andreev A.A. [Automation of a two-tier tunnel furnace using an adaptive three-position controller]. *Matematicheskie metody v tehnike i*

14. Magergut V.Z., Velichko D.V., Andreev A.A. Sistema avtomaticheskogo peremeshhenija tiglej v dvuhjarusnoj tunnel'noj pechi dlja proizvodstva penostekol'nyh blokov [Automatic crucible transfer system in a two-tier tunnel furnace for the production of foam glass blocks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia = PNRPU Bulletin. Electrotechnic, Informational Technologies, Control Systems*, 2015, no. 14, pp. 108-122 (In Russ.).

15. Romannikov D.O., Markov A.V. Ob ispol'zovanii programmnoho paketa CPN Tools dlja analiza setej Petri [About using the CPN Tools software package for Petri net analysis]. *Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 2012, no. 2 (68), pp. 105-116 (In Russ.).

16. Porhalo V.A., Bazhanov A.G., Magergut V.Z. Informacionnye predstavlenija adaptivnogo trjohpozicionnogo algoritma dlja ego apparatnyh i programmnyh realizacij [Information representations of an adaptive three position algorithm for its hardware and software implementations]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta = Belgorod State University Scientific Bulletin*, 2011, no. 1 (96), pp. 161-168 (In Russ.).

17. Rubanov, V.G., Kizhuk A.S., Lucenko O.V. [et al.] Avtomatizirovannaja sistema upravlenija proizvodstvom penostekol'nyh teploizolirujushhih oblicovочnyh blokov [Automated production management system for foam glass thermal insulation facing blocks]. *Stroitel'stvo = Construction*, 2000, no. 10, pp. 93-97 (In Russ.).

18. Il'jushin Ju.V. Proektirovanie sistemy upravlenija temperaturnymi poljami tunnel'nyh pechej konvejernogo tipa [Design of the temperature field control System for conveyor type tunnel furnaces]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacija. Upravlenie = St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2011, no. 3, pp. 67-72 (In Russ.).

19. Judickij S.A., Magergut V.Z. *Logicheskoe upravlenie diskretnymi processami* [Logical management of discrete processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 176 p. (In Russ.).

20. Volynskii V.A., Ivakhnyuk V.A., Kolchunov V.I., Kononykhin V.S., Mal'tsev A.N., Novichkov S.G., Titarenko Yu.D., Uvarov V.A. *Tunnel'naya pech'-utilizator* [Tunnel heat recovery furnace]. Patent RF, no. 99111279/03, 27.02.2000. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Рубанов Василий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: vgrubanov@mail.ru

Vasiliy G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: vgrubanov@mail.ru

Величко Дмитрий Валерьевич, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: tk210@mail.ru

Dmitry V. Velichko, Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: tk210@mail.ru

Бушуев Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: dmbushuev@gmail.com

Dmitry A. Bushuev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: dmbushuev@gmail.com

Структурно-параметрическая модель системы проектирования

В. Г. Мешков¹ ✉, Д. Е. Искра¹

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
ГСП-4, Вадковский пер. 1, г. Москва 127994, Российская Федерация

✉ e-mail: 111675@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В процессе проектирования у разработчиков, занимающихся решением профессиональных вопросов, связанных с разработкой новых методов и средств проектирования, неизбежно появляются проблемы, связанные с моделированием автоматизируемых и проектируемых объектов. Проведенный анализ проблем проектирования сложных систем показал, что недостатки процесса проектирования появляются, в частности, из-за неполной генерации возможных вариантов проектов, а также их частичного упорядочения. При этом имеется определенная несбалансированность свойств систем проектирования и возникает проблема отсутствия адекватных методов описания процессов проектирования.

Методы. В процессе частичного упорядочения допустимых вариантов проектов при определении структуры системы проектирования на этапе генерации используется структура некоторой порождающей грамматики, которая должна обладать, в первую очередь, управляющими свойствами, обеспечивающими частичное упорядочение вариантов уже в процессе генерации. Кроме этого, для учета изменений состава и параметров проектных решений порождающая грамматика должна обладать адаптивными свойствами, что определяет необходимость в выборе соответствующего способа адаптивного управления процессом порождения, учитывающего, например, частую повторяемость процесса проектирования.

Результаты. Определена модель формализованной распознающей системы при выборе варианта проекта, представленного в классе распознающих грамматик. Приведены правила формирования элементов распознающих грамматик, а алфавит может быть представлен многоальтернативной вероятностной сетью проектных вариантов. Рассмотрен выбор типа эталона объекта проектирования, определены элементы структуры системы проектирования.

Заключение. Структура системы проектирования может быть параметрически доопределена на основании правил формирования элементов распознающих грамматик, а возможности порождения вариантов могут быть согласованы с ее распознающими возможностями, при этом выбор структуры и прогнозирование параметров проектов производится с учетом количества и свойств ресурсов проектирования. Необходимо отметить, что обеспечение только свойств системы проектирования, сокращающих описание процесса, может привести к трудностям распознавания вариантов. В то же время выбор адаптивной структуры системы проектирования позволяет построить языковую систему с изменяемыми свойствами, обеспечивающими требуемое сокращение или расширение описания проекта.

Ключевые слова: система проектирования; порождающая грамматика; распознающие грамматики; эталон объекта проектирования; классы алфавита.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Мешков В. Г., Искра Д. Е. Структурно-параметрическая модель системы проектирования // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 244-255. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-244-255>.

Поступила в редакцию 30.09.2020

Подписана в печать 19.10.2020

Опубликована 30.12.2020

Structural-Parametric Model of the Design System

Valeriy G. Meshkov¹ ✉, Dmitriy E. Iskra¹

¹ Moscow State University of Technology «STANKIN»

GSP-4., 1 Vadkovkiy ave., Moscow 127994, Russian Federation

✉ e-mail: 111675@mail.ru

Abstract

Purpose of research. In the design process developers dealing with professional issues related to the development of new design methods and tools inevitably face problems associated with the modeling of automated and designed objects. The analysis of the problems of designing complex systems have shown that the disadvantages of the design process appear, in particular, due to the incomplete generation of possible project options, as well as their partial ordering. At the same time, there is a certain imbalance in the properties of design systems and the problem of the lack of adequate methods for describing design processes arises.

Methods. In the process of partial ordering of acceptable project options, when determining the structure of the design system at the generation stage, the structure of some generative grammar is used, which should have, first of all, control properties that provide a partial ordering of options already in the generation process. In addition, to take into account changes in the composition and parameters of design solutions, the generative grammar must have adaptive properties, which determines the need to choose an appropriate method for adaptive control of the generation process, taking into account, for example, the frequent repetition of the design process.

Results. A model of a formalized recognition system is determined when choosing a project variant presented in the class of recognizing grammars. Rules for the formation of elements of recognizing grammars are given, and the alphabet can be represented by a multi-alternative probabilistic network of design options. The choice of the design object type is considered, the elements of the design system structure are determined.

Conclusion. The structure of the design system can be parametrically determined based on the rules for generating elements of recognizing grammars, and the possibilities for generating variants can be coordinated with its recognizing capabilities, while the choice of the structure and forecasting of project parameters is made taking into account the number and properties of design resources. It should be noted that providing only the properties of the design system that reduce the description of the process can lead to difficulties in recognizing variants. At the same time, the choice of an adaptive design system structure allows you to build a language system with variable properties that provide the required reduction or expansion of the project description.

Keywords: design system; generative grammar; recognizing grammar; standard of design object; alphabet classes.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Meshkov V. G., Iskra D. E. Structural-Parametric Model of the Design System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 244-255 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-244-255>.

Received 30.09.2020

Accepted 19.10.2020

Published 30.12.2020

Введение

При исследовании проблем проектирования сложных систем, к которым, в частности, относятся автоматизированные системы информатизации и управления, выявляются определенные недостатки процесса проектирования. Проведенный анализ проблем показал, что эти недостатки появляются вследствие неполной генерации возможных вариантов проектов, определенной несбалансированности свойств систем проектирования, их неэффективной организации, а также отсутствия адекватных методов описания процессов проектирования.

Сложность проектирования таких систем не позволяет в необходимой степени проводить натурные эксперименты, что предопределяет важную роль моделей построения и организации функционирования систем проектирования.

На ранних этапах развития систем автоматизированного проектирования было невозможно реализовать идею параметрического проектирования по естественной на то время причине – недостаточной компьютерной производительности. Естественным, что в современных условиях возможности, предоставляемые системами в области параметризации, несоизмеримо выше.

Материалы и методы

Структуру системы проектирования на этапе генерации – частичного упоря-

дочения допустимых вариантов проектов – определяет структура некоторой порождающей грамматики (ПГ). Такая ПГ должна обладать, прежде всего, управляющими свойствами, обеспечивающими частичное упорядочение вариантов уже в процессе генерации [1].

Для учета изменений состава и параметров проектных решений ПГ должна обладать адаптивными свойствами, что определяет необходимость в выборе соответствующего способа адаптивного управления процессом порождения, учитывающего, например, частую повторяемость процесса проектирования.

Такие требования могут быть удовлетворены путем разработки соответствующих методов классификации алфавита ПГ, выбора начального символа ПГ в процессе порождения вариантов, а также правил порождения [2].

Включаемые в алфавит ПГ модели должны обеспечивать полноту отображения объекта проектирования, эффективность, адекватность, агрегируемость и последовательное уточнение параметров проектов. Эти требования позволяют установить основания для классификации алфавита ПГ. Одним из оснований для классификации являются типы моделей производственных функций объектов автоматизации. В алфавите ПГ выделяется класс моделей существования проектных решений, если объект проектирования задан производственной функцией вида

$$Y_c = \Phi(\alpha_k, X_k), k=1, 2, \dots$$

при ограничении вида $Y_c > B_c$, $\sum_k X_k \geq P_c$, где α , B и P – константы; Y – параметры целей; X – параметры ресурсов.

Класс моделей-генераторов (настраиваемых проектных решений) отображает производственную функцию вида

$$Y_r = A_c X_1^{\alpha_1} X_1^{\alpha_2},$$

которая существует при $B_r \leq Y_r \leq B_{r_2}$;

$$P_{k_1} \leq X_k \leq P_{k_2}; \alpha_k = \Phi(X_k).$$

Модели-реализации (отдельные проектные решения) отображают производственные функции вида $Y_p = \alpha_0 X_1^{\alpha_1} X_1^{\alpha_2}$, которые существуют лишь при фиксированных значениях x и α .

Основаниями для классификации элементов библиотеки являются классы проектных решений по различным видам обеспечения, по области применения (типовые проектные решения, пакеты прикладных программ) и т.д.

Для массовых объектов проектирования начальный символ ПГ должен быть представлен как эталон объекта проектирования, под которым понимается такой реализуемый вариант проекта, «подражание» которому гарантирует достижение за минимальное время заданных проектных параметров по множеству разрабатываемых проектов.

Оценка и выбор эталона объекта проектирования могут быть выполнены на основе анализа асимптотических рядов функций, отображающих изменение проектных параметров на заданных временных интервалах или этапах проектирования.

На этой основе построена методика определения научно-технического уров-

ня проектов АСУП. При этом процедура формирования асимптотических рядов выполнялась с применением экспертных оценок.

Заданные таким образом алфавит (библиотека), классы алфавита и начальные символы (эталон) существенно неоднородны. Это приводит к необходимости разработки специальных правил подстановки для различных подмножеств алфавита ПГ и эталонных элементов объекта проектирования (инструктивная часть системы проектирования), закрепленных за различными проектировщиками, специализирующимися на выполнении отдельных проектных операций (организационная часть системы проектирования) [3, 4].

Развитие инструктивной части определяется, таким образом, необходимостью введения новых правил подстановки при появлении новых классов проектных решений, а развитие организационной части – числом реализаций проектных решений различных классов.

Установленные таким образом элементы порождающей грамматики определяют структуру системы проектирования (табл. 1).

Классификация способов представления множества вариантов проектов определяется двумя факторами: характером отношения между эталоном и элементом библиотеки, которое устанавливает проектировщик на основе локальных правил порождения, и характером связывания одних фрагментов сети вариантов с другими фрагментами [5].

Таблица 1. Структура системы проектирования**Table 1.** Structure of the design system

Элемент системы проектирования / Element of the design system	Характеристика / Characteristics
Библиотека (алфавит ПГ и классы алфавита)	Множество проектных решений, описанных на семантическом языке и распределенных по классам
Эталон (начальный символ ПГ)	Вариант проекта, который задает состав классов элементов проекта, определяет топологию многоальтернативной сети вариантов, обеспечивает требуемые временные параметры процесса достижения проектных параметров
Организационная часть (виды правил порождения частичного упорядочения вариантов)	Определяет специализацию экспертов-проектировщиков на множестве классов проектных решений
Инструктивная часть	Процедуры генерации вариантов, осуществляемые экспертами

Для того чтобы в полной мере использовать возможности генерации вариантов проектов, осуществляемой в системе проектирования на основе правил порождающих грамматик (ПГ), необходимо обеспечить также соответствующие распознающие возможности для выбора максимального варианта проекта за минимальное время при ограниченных ресурсах проектирования. Формализованная распознающая система, обеспечивающая согласованную работу проектировщиков при выборе варианта проекта, может быть представлена в классе распознающих грамматик (РГ). РГ состоит из таких элементов, как классы алфавита, начальный символ (распознаваемый класс проектов), правила распознавания, обеспечивающие в совокупности заданные свойства РГ.

Алфавит РГ образуется в результате работы ПГ и может быть представлен многоальтернативной вероятностной сетью проектных вариантов (МВС) [6].

Классификация алфавита должна учитывать необходимость представления РГ как управляющей системы, обеспечивающей направленный характер процесса выбора максимального варианта проекта. Выбор управлений определяют методы оценки отдельных свойств отношений между вариантами проектов (транзитивность, рефлексивность, симметричность и т. д.). В качестве управляемого параметра целесообразно применение некоторой интегральной оценки отношений между вариантами, объединенными в МВС. Значения этой оценки, ограниченные так, что они соответствуют условиям перехода к но-

вому типу отношений (толерантность – эквивалентность, эквивалентность – частичный порядок и т. д.), могут быть выбраны как основания для классификации алфавита РГ.

Основанием для классификации алфавита РГ, заданного МВС, может быть величина энтропии H [7].

Выбор начального символа РГ должен определяться оценками отношений на множестве вариантов проекта, величиной и свойствами ресурсов, расходуемых на упорядочение и выбор вариантов. Это требует получения единых оценок различных видов ресурсов, затрачиваемых на натурный эксперимент, организацию деятельности проектировщика (экспертный эксперимент), построение характеристик отношений при выборе максимального варианта проекта [8, 9].

Выбор начального символа РГ может быть основан на анализе соотношения, связывающего оценки отношений на множестве вариантов проектов H с расходом ресурсов проектирования R , в виде

$$H = H_{\max} \Phi(R),$$

где $H_{\max}$ – исходная энтропия МВС; $\Phi(R)$ – функция, отображающая влияние расхода ресурса R на изменение H .

Свойства $\Phi(R)$ позволяют представить ее в классе экспонент, поскольку при $R \rightarrow \infty \quad H \rightarrow 0$,

$$\text{при } R \rightarrow 0 \quad H \rightarrow H_{\max}, \quad \frac{\partial H}{\partial R} < 0, \quad \frac{\partial^2 H}{\partial R^2} > 0.$$

Полученное соотношение позволяет выбрать класс распознаваемых проектов при заданных ресурсах. Однако

при этом эквивалентность используемых ресурсов существенно зависит от возможности различать проектные варианты экспертом-проектировщиком при различных видах отношения между ними. Это обстоятельство обосновывает необходимость установления связи между информационными оценками отношений и ресурсами проектирования в виде последовательности функций, отображающих особенности каждого этапа выбора [10-12].

Характеристику моделей, входящих в состав системы проектирования (библиотека, инструктивная часть), целесообразно находить как функцию, зависящую от величины ресурсов, затрачиваемых на натурный эксперимент при решении некоторой проектной проблемы с учетом максимально возможной скорости их расхода, а также от затрат ресурсов на построение моделей, проверку их адекватности и затрат времени на моделирование. Такая оценка моделей системы проектирования в конкретных условиях характеризует ее информационный ресурс при выборе из множества вариантов, отображаемых некоторой МВС.

Эти результаты обеспечивают возможность выбора начального символа РГ, отображающего класс распознаваемых проектов с учетом свойств ресурсов проектирования, их количества, особенностей деятельности эксперта-проектировщика, и позволяют выбрать структуру проекта. Эффективность применения многоступенчатой функции

соответствия $H = \Phi(R)$ определяется целесообразностью представления проекта сложного объекта в виде нескольких частей проекта с различными свойствами, например, части проекта с ненулевым риском (Д-проект) и части проекта, определяющей компенсацию риска при внедрении (С-проект). Проект такой структуры определяет начальный символ РГ, отображающий процедуры выбора варианта в системе проектирования [13].

При ограничении на ресурсы и время выбор такого начального символа позволяет оптимизировать соотношение между ресурсами, которые могут быть эффективно использованы при проектировании и внедрении, повышает готовность к компенсации риска на стадии внедрения проектов.

Правила подстановки при описании процесса распознавания максимального варианта проекта выбираются на основе оптимизации затрат ресурсов при достижении заданного значения H при ограничении на ресурсы и время упорядочения с учетом свойств различных ресурсов [7]. Изменение ценности $\Phi_c(R)$ различных ресурсов в процессе упорядочения множества вариантов проектов можно представить как монотонную дифференцируемую функцию, которая может быть представлена в виде

$$\Phi_c(R) = a^{-\gamma R} R^k = e^{-\delta R} R^k,$$

где γ, k – некоторые положительные константы; $\delta = \gamma \ln a$.

Переменные функции $\Phi_c(R)$ имеют определенный физический смысл.

Величина a характеризует среднее число альтернатив, приходящихся на один узел МВС:

$$a = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r m_i,$$

где m_i – мощность подмножества библиотеки системы проектирования, соответствующего i -му элементу эталона объекта проектирования. Величина u характеризует число узлов МВС. Величина k интерпретируется как модуль разности энтропий – исходной и упорядоченной с помощью данного ресурса МВС [14, 15].

Оптимальные значения

$$R_{\text{опт}} = k/\delta \quad [\text{при } \Phi_c(R) \rightarrow \max] \text{ и}$$

$$H_{\text{опт}} = \exp\left(-k/\delta\right) \text{ следуют из соотношения } \frac{\partial \Phi_c(R)}{\partial R} = 0.$$

Анализ $\Phi_c(R)$ позволяет оптимизировать допустимый риск $H_{\text{доп}}$, выбрать число ступеней функций соответствия, однако для этого требуется оценить величину R для каждого из видов ресурсов проектирования, в том числе ресурсов натурального эксперимента, а также моделей системы проектирования.

Результаты и их обсуждение

Оценки моделей как информационных ресурсов определяются свойствами конкретной многоальтернативной вероятностной сетью. Важнейшее свойство моделей как информационных ресурсов заключается в существенно более высокой скорости получения информации

по сравнению с другим заменяющим ее ресурсом. Для оценки величины информационных ресурсов некоторой модели может быть использовано следующее соотношение:

$$R_M = R_{н.э.}(T_{н.э.}) - Z_{м.р.}\Gamma(n) - \\ - R_{н.э.}^a(T_{н.э.}^a, X_{н.э.}^a) - Z_{м.п.}(T_M; X_M),$$

где $R_{н.э.}(T_{н.э.})$ – ресурсы, требуемые для проведения натурного эксперимента по упорядочению множества проектных вариантов за время $T_{н.э.}$; $Z_{м.р.}$ – затраты на разработку модели; $\Gamma(n)$ – функция, зависящая от числа случаев n применения модели [$\Gamma(1)=1$ в случае однократного использования модели]; $Z_{м.п.}(T_M; X_M)$, – затраты на упорядочение множества вариантов проектов в зависимости от времени моделирования и точности воспроизведения моделируемого процесса X_M), $R_{н.э.}^a(T_{н.э.}^a, X_{н.э.}^a)$ – затраты на оценку адекватности применяемой модели средствами натурного эксперимента за время $T_{н.э.}^a$ и с точностью $X_{н.э.}^a$.

Выводы

Структура системы проектирования может быть параметрически доопределена на основании правил формирования элементов распознающих грамматик, а возможности порождения вариантов могут быть согласованы с ее распознающими возможностями, при этом выбор структуры и прогнозирование параметров проектов производится с учетом количества и свойств ресурсов проектирования.

При этом полученные результаты дают возможность определения перечня проектных работ, который необходимо провести с применением автоматизированных методов проектирования. Кроме того, будут оптимизированы ресурсы проектирования, а также появится возможность сокращения затрат на проведение эксперимента и уменьшение срока процесса проектирования.

При рассмотренном подходе к формализации объектами автоматизации процесса проектирования могут быть:

- операции классификации алфавита семантического языка, используемого для порождения допустимых вариантов проектов в соответствии с составом структурных компонентов адаптивной системы управления процессом проектирования;
- операции выбора начального символа ПГ в виде эталона объекта проектирования при генерации вариантов;
- операции генерации вариантов, завершающиеся синтезом многоальтернативных вероятностных графов, отображающих варианты проектов и отношения между ними;
- операции классификации множества допустимых проектов на основе информационных оценок отношений между ними;
- операции выбора распознаваемого класса проектов на основе оценок типа отношений между вариантами, достигаемого с учетом ограничений на величину и вид ресурсов проектирования;

– операции распознавания максимального варианта проекта, основанные на процедурах оптимизации соотношения между экспертным, натурным и модельным экспериментами. Автоматизация этих операций определяется ис-

пользованием языковых средств рассмотренной структуры и может обеспечить согласованную работу проектировщиков на различных этапах процесса проектирования.

Список литературы

1. Мешков В.Г., Искра Д.Е. Структурная модель системы проектирования // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2020. № 4 (55). С. 88-90.
2. Velykodniy S. Analysis and synthesis of the results of complex experimental research on reengineering of open cad systems // Applied Aspects of Information Technology. 2019. Vol. 2. № 3. P. 186-205.
3. Капитанов А.В., Попов А.П., Феофанов А.Н. Интегрированные производственные системы // Сварочное производство. 2019. № 7. С. 53-56.
4. Баранов Н.Е., Феофанов А.Н. Управление изменениями в АСУ производством: проблематика исследований // Технология машиностроения. 2019. № 2. С. 65-71.
5. Феофанов А.Н., Баранов Н.Е. Обзор развития АСУ производством и типовые риски внедрения системы // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 3. С. 116-119.
6. Kapitanov A., Kozlova A., Tyasto S. The information model of the modern digital production // MATEC Web of Conferences. 2018. С. 20–25.
7. Дьяченко А.Г., Савостина Т.П. Методологические особенности использования параметризации при проектировании // Инновации в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции / под ред. А.М. Маркова, А.В. Балашова, М.В. Доц. Барнаул, 2018. С. 513-517.
8. Соломенцев Ю.М., Фролов Е.Б., Феофанов А.Н. Эффективное управление производством – основа потенциала технологической системы // Вестник машиностроения. 2017. №5. С. 84-86.
9. Использование моделирования для решения задач проектирования технологической оснастки в компьютерной среде / А.В. Рыбаков, С.А. Евдокимов, А.А. Краснов, С.А. Шептунов, А.Н. Шурпо // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2019. Т. 1, №3(39). С. 68-74.
10. Личаргин Д.В., Усова А.А., Ладе А.В. Генерация подмножеств естественного языка на основе гибридизации порождающих грамматик и многомерных баз данных // Современные наукоемкие технологии. 2017. №1. С. 46-50.
11. Рязанов Ю.Д., Назина С.В. Минимизация контекстно-свободных грамматик // Прикладная дискретная математика. 2019. №45. С. 90-96.

12. Митрофанов В.Г., Капитанов А.В., Попов А.П. Проектирование автоматизированных машиностроительных производств: монография // Сер. Управление качеством технологических процессов в машиностроении / ЗАО «ОНИКС». Тольятти, 2013.

13. Ivashkin Y.A., Blagoveschensky I.G., Nikitina M.A. Neural network and agent technologies in the structural-parametric modeling of technological systems // CEUR Workshop Proceedings. «OPTA-SCL 2018 - Proceedings of the School-Seminar on Optimization Problems and their Applications» 2018. P. 169-180.

14. Колыбенко Е.Н. Разграничение понятий «структурно-функционально-параметрическая модель» и «параметрическая модель» информационных объектов знаний // Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 106-111.

15. Gabriele Pasetti Monizza, Cristina Bendetti, Dominik T.Matt. Parametric and generative design techniques in mass-production environments as effective enablers of Industry 4.0 approaches in the Building Industry // Automation in Construction. 2018. Vol. 92. P. 270-285.

References

1. Meshkov V. G., Iskra D. E. Strukturnaya model' sistemy proektirovaniya [Structural model of the design system]. *Vestnik MGTU «STANKIN» = Bulletin MSTU «STANKIN»*, 2020, no. 4 (55), pp. 88-90 (In Russ.).

2. Velykodniy S. Analysis and synthesis of the results of complex experimental research on reengineering of open cad systems. *Applied Aspects of Information Technology*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 186-205.

3. Kapitanov A.V., Popov A.P., Feofanov A.N. Integrirovannye proizvodstvennye sistemy [Integrated production systems]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2019, no. 7, pp. 53-56 (In Russ.).

4. Baranov N.E., Feofanov A.N. Upravlenie izmeneniyami v ASU proizvodstvom: problematika issledovaniy [Management of changes in automated control systems by production: problems of research]. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Mechanical Engineering Technology*, 2019, no. 2, pp. 65-71 (In Russ.).

5. Feofanov A. N., Baranov N. E. Obzor razvitiya ASU proizvodstvom i tipovye riski vnedreniya sistemy [Review of the development of automated control systems by production and typical risks of system implementation]. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*, 2019, no. 3, pp. 116-119 (In Russ.).

6. Kapitanov A., Kozlova A., Tyasto S. The information model of the modern digital production. *MATEC Web of Conferences*, 2018, pp. 20–25.

7. D'yachenko A.G., Savostina T.P. [Methodological features of using parameterization in design]. *Innovacii v mashinostroenii. Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Innovations in mechanical engineering. In the collection Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference]. Barnaul, 2018, pp. 513-517 (In Russ.).

8. Solomentsev Yu. M., Frolov E. B., Feofanov A. N. Effektivnoe upravlenie proizvodstvom – osnova potenciala tekhnologicheskoy sistemy [Effective production management – the basis of the potential of the technological system]. *Vestnik mashinostroeniya. = Bulletin of Mechanical Engineering*, 2017, no.5, pp. 84-86 (In Russ.).

9. Rybakov A.V., Evdokimov S. A., Krasnov A. A., Sheptunov S. A., Shurpo A. N. Ispol'zovanie modelirovaniya dlya resheniya zadach proektirovaniya tekhnologicheskoy osnastki v komp'yuternoy srede [Use of modeling for solving problems of designing technological equipment in a computer environment]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University*, 2019, vol. 1, no.3(39), pp. 68-74 (In Russ.).

10. Lichargin D. V., Usova A.A, Lade A.V. Generaciya podmnnozhestv estestvennogo yazyka na osnove gibridizacii porozhdayushchih grammatik i mnogomernyh baz dannyh [Generation of natural language subsets based on hybridization of generative grammars and multidimensional databases]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern Science-Intensive Technologies*, 2017, no.1, pp. 46-50 (In Russ.).

11. Ryazanov Yu. D., Nazina S. V. Minimizaciya kontekstno-svobodnyh grammatik [Minimization of context-free grammars]. *Prikladnaya diskretnaya matematika = Applied Discrete Mathematics*, 2019, no.45, pp. 90-96 (In Russ.).

12. Mitrofanov V. G., Kapitanov A.V., Popov A. P. *Proektirovanie avtomatizirovannyh mashinostroitel'nyh proizvodstv* [Design of automated machine-building productions: monograph.]. Togliatti, 2013 (In Russ.).

13. Ivashkin Y.A., Blagoveschensky I.G., Nikitina M.A. Neural network and agent technologies in the structural-parametric modeling of technological systems. CEUR Workshop Proceedings. «OPTA-SCL 2018 - Proceedings of the School-Seminar on Optimization Problems and their Applications», 2018, pp. 169-180.

14. Kolybenko E.N. Razgranichenie ponyatij «strukturno-funkcional'no-parametricheskaya model'» i «parametricheskaya model'» informacionnyh ob'ektov znaniy [Delineation of concepts «structural-functional-parametric model» and «parametric model» of information objects of knowledge]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Don State Technical University*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 106-111 (In Russ.).

15. Gabriele Pasetti Monizza, Cristina Bendetti, Dominik T.Matt. Parametric and generative design techniques in mass-production environments as effective enablers of Industry 4.0 approaches in the Building Industry. *Automation in Construction*, 2018, vol. 92, pp. 270-285.

Информация об авторах / Information about the Authors

Мешков Валерий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: 111675@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5749-3457>,

Искра Дмитрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: mkt3@mail.ru

Valeriy G Meshkov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of «Automated information processing and management systems», Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: 111675@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5749-3457>,

Dmitriy E. Iskra, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, department «Automated information processing and management systems», Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russian Federation, e-mail: mkt3@mail.ru