

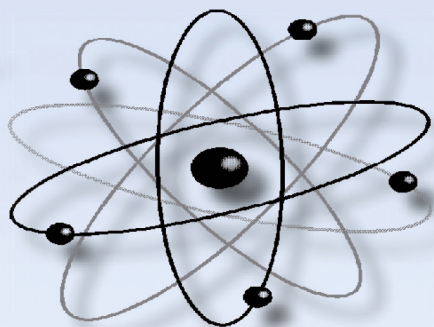
ISSN 2076-4359

Учёные записки

№ VII (87)

2025

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

Отделы журнала «Управление в технических системах», «Вычислительная техника и информатика», «Машиностроение», «Культурология и искусствоведение» включены в перечень изданий ВАК РФ.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер ФС77-38212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Učēnye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КНАГУ», находящейся на сайте <https://uzknastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27
Телефон для справок: +7 (4217) 528-548

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27

Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.
Цена свободная.

© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КНАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:	Сергей Петрович Черный , доктор технических наук, доцент. E-mail: kepapu@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	Евгения Павловна Иванова , кандидат технических наук. E-mail: journal@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Ответственный секретарь:	Алина Валерьевна Бузикаева , кандидат технических наук. E-mail: kepapu@knastu.ru
Литературный редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова . E-mail: karpovat@list.ru
Перевод на английский язык:	Галина Алексеевна Шушарина , кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Дизайн и верстка:	Оксана Вадимовна Приходченко , кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru
Менеджер информационных ресурсов:	Татьяна Владимировна Степанова . E-mail: osnid@knastu.ru
Администратор сайта:	Никита Станиславович Шушарин . E-mail: web_dev@knastu.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

Отделы:	
1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов)	Сергей Иванович Феоктистов , доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru Сергей Борисович Марьин , доктор технических наук, доцент. E-mail: maryinsb@mail.ru
2. Электротехнические комплексы и системы (2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы)	Константин Константинович Ким , доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru Александр Владимирович Сериков , доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru Сергей Николаевич Иванов , доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
3. Управление в технических системах (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев , доктор технических наук, профессор. E-mail: kepapu@knastu.ru Сергей Петрович Черный , доктор технических наук, доцент. E-mail: kepapu@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов , доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacc.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)	Валерий Иванович Одинокоев , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: osnid@knastu.ru Александр Витальевич Космынин , доктор технических наук, профессор. E-mail.ru: avkosm@knastu.ru Константин Сергеевич Бормотин , доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	Борис Яковлевич Мокрицкий , доктор технических наук, профессор. E-mail: boris@knastu.ru Владимир Сергеевич Щетинин , доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru
6. Материаловедение и химические технологии (2.6.17 - Материаловедение)	Эдуард Анатольевич Дмитриев , доктор технических наук, профессор. E-mail: 013696@togudv.ru Олег Викторович Башков , доктор технических наук, профессор. E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твердого тела)	Анатолий Александрович Буренин , доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacc.dvo.ru Олег Евгеньевич Сысоев , доктор технических наук, профессор. E-mail: sia@knastu.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Отделы:	
1. Культурология и искусствоведение (1.10.1 - Теория и история культуры, искусства)	Яна Станиславовна Крыжановская , доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowsckaia.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова , доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. E-mail: savelova_ev@hgiik.ru Виктория Юрьевна Прокофьева , доктор филологических наук, профессор. E-mail: nikars1999@mail.ru Илья Игоревич Докучаев , доктор философских наук, профессор. E-mail: i.dokuchaev@spbu.ru
2. Психология и педагогика (5.8.1 - Общая педагогика, история педагогики и образования)	Татьяна Евгеньевна Наливайко , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru Екатерина Иосифовна Артамонова , доктор педагогических наук, профессор. E-mail: manpo@yandex.ru
3. История (5.6.1 - Отечественная история)	Жанна Валерьяновна Петрунина , доктор исторических наук, профессор. E-mail: petrunina71@bk.ru Федирко Оксана Петровна , доктор исторических наук, профессор. E-mail: fedenka.67@mail.ru

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

Содержание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесник М. Б., Полонский В. А.

СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ	4
---	---

Фролов А. В., Пукас А. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ЦИФРОВОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SIMINTESCH	15
---	----

Ким К. К., Карпова И. М., Иванкова Е. П., Королева Е. Б., Михайлов М. В., Ткачук А. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЛЕТАЮЩЕГО МУЛЬТИКОПТЕРА ЭНЕРГИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЯГОВОГО ТОКА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	23
--	----

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Кучерова А. И., Иванкова Е. П., Горькавый М. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОКРАСКИ ДЕТАЛЕЙ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	35
--	----

Черный С. П.

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР УПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ	43
---	----

Кувшинов В. В., Муровский С. П., Абдали Л. М. А., Исса Х. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХОСНЫМ СОЛНЕЧНЫМ ТРЕКЕРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FORID-РЕГУЛЯТОРА	49
--	----

Горькавый М. А.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫМ РОБОТОМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ	58
--	----

Савельев Д. О.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ПОДВОДНОГО МОДУЛЯ	66
---	----

Емельянов К. А.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ	76
---	----

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Фролов Д. О., Петрова А. Н.

ЭФФЕКТИВНЫЙ СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ТЕКСТОВЫХ ЭМБЕДДИНГОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ	87
--	----

Носков С. И., Бутин А. А.

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ С ЗАДАННОЙ НА ПОДВЫБОРКАХ ДАННЫХ ТОЧНОСТЬЮ	93
---	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Мокрицкий Б. Я., Скрипилёв А. А.

О ПРЕВОСХОДСТВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НАД ИНОСТРАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ	99
--	----

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ И ЕЁ АРХИТЕКТУРА В ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ ПЛАНКОВСКИХ ЧИСЕЛ.....	104
--	-----

УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ: НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2025.....	112
--	-----

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесник М. Б., Полонский В. А.
K. K. Kim, S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, V. A. Polonsky

СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

STATE AND DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF ELECTROMECHANICAL LINEAR MOVEMENT ACTUATORS

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Sergey N. Ivanov – Dr. Sc., Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Колесник Максим Борисович – аспирант кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Maxim B. Kolesnik – Postgraduate Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

Полонский Вячеслав Андреевич – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@knastu.ru.

Vyacheslav A. Polonsky – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается современное состояние существующих приводных устройств для промышленных объектов, использующих линейное перемещение силовых элементов. Приведены классификационные характеристики. Определены особенности, достоинства и недостатки применяемых технических решений. Показана зависимость параметров привода от режима технологических процессов. Обоснованы перспективные направления исследования и повышения эффективности при модернизации и создании новых типов электромеханических приводов, учитывающих особенности электротехнических комплексов.

Summary. The article discusses the current state of existing drive devices for industrial facilities that use linear movement of power elements. Classification characteristics are provided. The features, advantages, and disadvantages of the applied technical solutions are identified. The dependence of drive parameters on the mode of technological processes is shown. Promising research areas and ways to improve efficiency in the modernization and development of new types of electromechanical drives that take into account the specific features of electrical systems are substantiated.

Ключевые слова: непосредственный электропривод, нагрузочная характеристика, эффективность.

Key words: direct electric drive, load characteristic, efficiency.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00089, <https://rscf.ru/project/24-29-00089/>.

УДК 621.31:621.25

Введение. Непосредственный привод с электромеханическим преобразователем представляет электротехническое устройство, использующее в качестве конструкционной основы промышленный трёхфазный асинхронный электродвигатель, в который в качестве равновесной части интегрирована передача «винт-гайка». Исторически появление первых электроприводов можно отнести к 1838 г., когда Б. С. Якоби продемонстрировал небольшой судовой электродвигатель постоянного тока. Существенно повлияла на развитие и повышение энергоэффективности электроприводных двигателей предложенная в 1890 г. М. О. Доливо-Добровольским система трёхфазного тока. Уже в 1901 г. в Лейпциге было представлено промышленное электрооборудование для привода локомотивов и станков. В России первый обобщающий труд об электроприводах, написанный В. В. Дмитриевым и П. Д. Войнаровским, вышел в 1903 г.

Одной из ведущих компаний на сегодняшний день является Siemens (Германия), владеющая более 150 патентами, связанными с рассматриваемой тематикой. Другими представителями этой страны совместно с департаментом биологической кибернетики института Макса Планка являются Fraunhofer IPA, SEW-Eurodrive и Lenze. Наиболее значимые работы представлены в работах Т. Bruckmann, А. Pott, Izard J.-B., Dubor A., Hervé P.-E., Cabay E., Culla D., Rodriguez M., Barrado M. Крупнейшие научные центры, связанные с созданием современных электроприводов: ABB (Швеция, Швейцария), Danfoss (Дания), Vacon (Финляндия), Schneider Electric (Франция), Bernecker&Rainer (Австрия). В США основные исследования проводят GE, Lockheed-Martin, SEW-Eurodrive, Intel, Apple, TI, Harris и др. Известны результаты исследований китайских учёных (Sen Qian, Bin Zi, Wei-Wei Shang, Qing-Song Xu и др.), связанные с развитием теоретических методов проектирования электроприводов. В Южной Корее разработки ведутся в Korean Society of Mechanical Engineer, LS (LG) и Hyundai. Среди японских проектировщиков и изготовителей электротехнического оборудования с мировым именем следует отметить научно-технические решения Toshiba и Mitsubishi Electric. Имеется ряд публикаций в области прикладных исследований технических характеристик электроприводов, связанных с научной группой университета Иннополис (Татарстан) сотрудничающей с компанией ARCODIM и японскими фирмами Hitachi, Komatsu, Sumimoto.

В настоящее время научные исследования в области, связанной с направлением данного проекта, ведутся во всех промышленно развитых странах. Важными работами в данной области являются публикации А. Г. Гарганеева, Г. В. Кулинченко, А. М. Масленникова, В. А. Бахуты, В. Д. Червякова, М. Я. Хитерера, И. Е. Овчинникова, В. И. Луковникова, А. С. Каракулова, С. В. Ланграф, А. В. Удовиченко, Д. Л. Калужского, Н. А. Уварова, А. Д. Мехтиева, В. П. Гринченкова, И. А. Павленко, Н. П. Ряшенцева, Е. В. Сергеевкова, Д. В. Свечарника, К. К. Кима, Д. А. Брыксина, В. С. Ежова, Е. В. Ахrameева, Т. Р. Кузнецова, Я. Л. Либерман, Б. Д. Нигматуллина, О. А. Князева, С. А. Вялова, В. П. Гринченкова, Р. Р. Гибадуллина, С. А. Васина, Е. В. Плахотниковой, Д. И. Семина, J. Baker, J. Vining, I. Boldea, M. Leijon, M. A. Mueller, L. Castellini, M. D'Andrea, N. Borgarelli, P. Eyabi, G. Jia-Yue, C. Hui-Ying, E. Agamloh, Z. Paszota, D. Vanhooydonck, W. Symens, W. Deprez, J. Lemmens, K. Stockman, S. Dereyne, C. Hansen, J. Kotlarski, T. Ortmaier, J. Gieras, I. Gieras, V. Sarac, G. Cvetkovski, O. Albarbarawi, A. Al-Rawashdeh, Gh. Qaryouti, D. Krušelj, D. Sumina, JN. Nash, D. Casadei, F. Profumo, G. Serra, M. Depenbrock, I. Takahashi, T. Noguchi, T. Sutikno, NRN. Idris, P. Tiitinen, P. Pohjalainen, J. Lalu, E. Agamloh, Z. Paszota, V. Krishna, E. Prasad, C. Ungureanu, M. Rata, A. Graur и других учёных [1–8].

В последние десятилетия наблюдается значительный рост интереса к применению электроприводов в объектах, к которым предъявляются повышенные требования эффективности. Для раз-



работки новых систем стали приоритетными области, где применяются технологии, использующие управляемые вибрационные воздействия. Актуальность данной технологии во многом определяется необходимостью оптимизации производственных процессов, увеличением производительности и снижением энергоёмкости. Для этого необходима интеграция современных систем управления, таких как адаптивные алгоритмы, которые могут эффективно реагировать на изменения внешней среды и заданных условий эксплуатации (параметры нагрузки).

Другим перспективным направлением развития современного электропривода является его использование как неотъемлемой части автоматизированных роботизированных промышленных систем.

Обеспечение эффективности электромеханических приводов. Вопросы повышения эффективности электромеханических приводов связаны со следующими направлениями:

- интеграцией электродвигателей, механических, информационных компонентов и дальнейшим совершенствованием и развитием мехатронных технологий, соответствующих интерфейсов;
- модернизацией традиционных и созданием новых передаточных устройств;
- повышением требований к надёжности, экономичности, модульности, управляемости передаточных и согласующих устройств;
- автоматизацией проектирования, конструирования, моделирования и испытаний на основе современных информационных технологий;
- созданием верифицированной информационной базы, содержащей параметры механической части (размерные соотношения, моменты инерции, прочностные и триботехнические характеристики) на всех этапах жизненного цикла привода.

Особое значение имеет исследование физических процессов в механической части приводной системы, начиная от ротора электродвигателя до исполнительного элемента.

Современное проектирование приводов основывается на традиционных моделях электромеханических преобразователей, в которых используются нормативные или расчётные параметры и характеристики, как правило, для номинальных нагрузок. В процессе эксплуатации характеристики изменяются из-за влияния функциональных нагрузок, внешних воздействий, износа, старения, что вызывает необходимость постоянного информационного сопровождения, коррекции расчётного ресурса, диагностики состояния системы с целью поддержания её работоспособности. То есть практическая потребность в совершенствовании методов проектирования, в том числе на основе развития комплексных методов исследования, требует научных и инженерных решений в этой системе по крайней мере двух задач:

1. выделение информативных и интегральных параметров, характеристик с возможностью их достоверного определения и уточнения на этой основе математических моделей;
2. оценка и контроль функционирования непосредственно в рабочем режиме.

Повышение технического уровня электропривода и его поддержание в процессе исследования, проектирования, испытаний, эксплуатации предполагают наличие физических и математических моделей, полученных с использованием новых методов и технических средств идентификации характеристик механической части привода и её элементов.

С учётом Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» в большинстве промышленных отраслей на смену групповому электроприводу приходит более экономичный одно- или многодвигательный индивидуальный, обеспечивающий движение одного исполнительного элемента. В таком электроприводе распределение электрической энергии происходит непосредственно до исполнительного элемента, что даёт возможность прямого управления механической энергией электрическим способом. Кроме этого, индивидуальный привод позволяет упростить конструкцию, т. к. электродвигатель может быть конструктивно объединён с исполнительным элементом, что часто используется в бытовых приборах и устройствах (вентиляторы, электродрели, заточные машины и т. п.). Это позволяет повысить эффективность системы, которая кроме других факторов определяется степенью приближения электромеханического преобразова-

теля к «последнему» валу привода и в данной работе выбрана в качестве определяющего конструктивного критерия.

С позиции энергосбережения актуальна тенденция реализации электропривода, рассматривающая электромеханическую систему как совокупность механических и электромеханических устройств, объединённых общими силовыми электрическими цепями и цепями управления, предназначенную для осуществления механического движения объекта, что даёт возможность рассматривать электропривод как интегрированное объединение механической части, электрического двигателя и системы управления.

На сегодняшний день принципиально в качестве приводного механизма могут использоваться грузовые, пружинные, тепловые, пневматические, гидравлические, электромагнитные, электромеханические устройства, а также их различные комбинации. Несмотря на большое разнообразие приводов, по технико-экономическим показателям наиболее востребованными являются гидравлический, пневматический и электрический приводы.

Объектом исследования данной статьи является электромагнитный привод – электромеханическая система, обеспечивающая движение приводов рабочих машин для реализации технологических процессов за счёт электромагнитного преобразования электрической энергии в механическую. Вопросы проектирования и эксплуатации электромагнитных приводов рассмотрены в [9].

Основные параметры электромагнитных приводов: напряжение питания; режим работы; род тока; сопротивление обмоток и изоляции (плюс к этому электрическая прочность изоляции); потребляемая мощность; электромагнитная совместимость.

При поставке электромагнитного привода как комплектующего изделия для него указываются тяговое усилие и (или) усилие толкания, усилие удержания, номинальный ход якоря.

Электромагнитные приводы можно классифицировать по следующим признакам:

- по роду тока: постоянного и переменного тока;
- по характеру действия: прямого, с использованием соединительных элементов и устройств для изменения вида движения;
- по количеству положений: двух-, трёх- и многопозиционные;
- по количеству приводимых в движение механизмов: индивидуальные и групповые;
- по назначению: силовые, управляющие, импульсные, шаговые, встраиваемые и блочные;
- по характеру перемещения силового элемента: поступательные, толкающие, вращательные, возвратно-поступательные, тянущие, поворотные, колебательные, со сложным движением;
- по величине перемещения силового элемента: с неограниченными, большими, средними, малыми, микроперемещениями;
- по виду герметизации: сальниковые и бессальниковые;
- по способу возврата в первоначальное положение: ручные, грузовые, пружинные, электромагнитные, электромеханические.

Среди достоинств электромагнитных приводов выделяют низкое потребление электроэнергии, точность позиционирования, надёжность и большой срок службы, быстроедействие и функциональность, возможность автоматизации, технологичность и встраиваемость, небольшие габаритные размеры и массу.

В последние годы всё более широко применяется линейный электромагнитный привод. Сердечник и выходной силовой элемент могут быть разными деталями, но иногда на сердечник возлагают выполнение функции выходного силового элемента. Сердечники могут быть втягивающимися, внешними притягивающимися, поперечно движущимися.

Наибольшее распространение получила электромагнитная арматура, запирающий элемент которой перемещается возвратно-поступательно, т. е. это электромагнитный клапан или вентиль с электромагнитным приводом.

Отмеченные достоинства позволяют рассматривать электромагнитные приводы в качестве приводов для открытия и закрытия проходного сечения трубопроводной арматуры (клапанов, кранов, задвижек). Трубопроводная арматура с электромагнитным приводом широко применяется во



многих отраслях народного хозяйства в качестве запорной, распределительно-смесительной, отсечной, регулирующей.

У электромагнитного привода в ряде устройств практически нет альтернативы при управлении бессальниковой арматурой, используемой в трубопроводных системах, транспортирующих радиоактивные, взрывоопасные, токсичные и агрессивные жидкости и которая в силу этого должна отвечать самым жёстким требованиям в части герметичности. Области применения арматуры: ядерная энергетика, химическая промышленность, нефтегазовая отрасль, криогенная техника. Оснащённая электромагнитным приводом трубопроводная арматура монтируется в технологических установках с применением газовых лазеров при изготовлении полупроводниковых приборов.

Электромагнитный привод (в том числе в комбинации с другими приводами) часто применяется в трубопроводной арматуре, входящей в состав автоматизированных систем управления технологическими процессами, позволяя обеспечивать эффективное дистанционное и местное управление потоками рабочей среды.

Расширение использования электромагнитного привода в трубопроводной арматуре диктуется развитием современных промышленных технологий, сопровождающимся усложнением условий эксплуатации оборудования.

Однако усилия, создаваемые электромагнитными приводами, относительно невелики, что ограничивает их применение только трубопроводной арматурой небольших диаметров. В соответствии с [10] электромагнитные приводы устанавливают на арматуру диаметром до 200 мм. На практике приводы электромагнитного типа чаще используют для управления главной арматурой небольшого диаметра, а также импульсной арматурой, а основные усилия создаются с помощью пневматических и гидравлических приводов.

Поэтому наиболее часто для привода арматуры используются электромеханические приводы. Это связано с такими характерными особенностями, как высокая совместимость с системами автоматического управления и системами искусственного интеллекта, большое количество коммутационных циклов, высокие динамические силовые и регулировочные характеристики, технологичность, удобство обслуживания и управления, высокое удельное использование.

С точки зрения энергоэффективности электромеханические приводы наиболее перспективны, поскольку близкие по силовым характеристикам пневматические и гидравлические установки, как правило, используют электрическую энергию для питания электродвигателей промежуточных насосов или компрессоров, что, естественно, снижает коэффициент полезного действия всей системы.

Структура электромеханического привода. Независимо от назначения неотъемлемыми частями электромеханического привода являются приводное, передаточное и информационно-управляющее устройства, а также связанная в виде всех движущихся масс привода и параметров нагрузка реализуемого технологического процесса. Основой электрического привода, который, как правило, включает в себя электроэнергетические, электромеханические и механические преобразователи, а также информационные и управляющие устройства [11], является электромеханическая система. Она предназначена для управления движением исполнительных элементов рабочей машины и обеспечения технологического процесса.

Приводные системы, являясь неотъемлемой частью многих механизмов, машин, устройств, сложных объектов, составляют основу всех современных отраслей машиностроения, приборостроения, испытательной и измерительной техники. Требуемое функционирование всего разнообразия этих технических средств связано с обеспечением необходимой точности отработки управляющих ими сигналов, быстросдействия в переходных процессах, хороших энергетических показателей, зависящих от структуры, характера нагрузки и динамики системы, достаточной надёжности. Это достигается проведением большого объёма теоретических и экспериментальных работ. Но любым исследованиям при разработке привода предшествует выбор исполнительного двигателя и передаточного числа редуктора, обеспечивающих необходимые законы движения и минимального энергопотребления. Если двигатель выбран неправильно, то привод не будет обеспечи-

вать требуемые скорости, ускорения, моменты и в отработке задания появится дополнительная не устраняемая коррекцией погрешность.

Несоответствие системе редуктора приводит к нарушению необходимого согласования располагаемых и потребных силовых и кинематических величин, что, как и в первом случае, приведёт к дополнительной ошибке рассогласования и ухудшению энергетических характеристик. Результатом могут стать выбор необоснованно более мощного двигателя и увеличение потерь энергии. Разработчики постоянно ищут рациональные подходы к выбору соотношения между двигателем и редуктором для оптимизации массы и размеров электроприводов. Однако выбор редуктора существенно влияет на эффективность работы всего исполнительного механизма. Необходимо учитывать не только передаточные числа, но и материалы, из которых изготовлены редукторы, а также их конструктивные особенности. Применение современных композитных материалов и развитие технологий производства позволили создать редукторы меньших размеров и веса, что позволяет применять электроприводы в ограниченных пространствах.

Для эффективного согласования динамических и энергетических характеристик требуется соблюдение принципа оптимального взаимодействия основных компонентов привода, позволяющего обеспечить рациональное энергопотребление, динамику и интерфейс, а также необходимую наработку на отказ. Суть принципа в том, что одними алгоритмами управления невозможно создать требуемое движение машины (объекта), если оно энергетически не обеспечено силовой частью системы, и, наоборот, энергетически возможное движение не будет осуществлено, если управляющая часть не вырабатывает соответствующих сигналов. Поскольку целью проектирования эффективного привода является получение эмерджентного результата, качественно или количественно лучшего суммы результатов работы отдельных её составляющих, то привод должен быть технически синергически оптимальным. Данное свойство определяется не наличием тех или иных элементов системы, а результатом их взаимодействия, осуществлению которого способствуют максимально точные исследования различных параметров, характеристик элементов и привода в целом. Оценка степени и результата взаимодействия элементов привода с точки зрения локальных критериев эффективности (требуемых динамических или энергетических показателей) может быть сделана только при известных определяющих параметрах системы, что, в свою очередь, требует точного исследования взаимодействия элементов системы по энергетическим и динамическим характеристикам.

Разработка эффективного привода связана с необходимостью учёта особенностей диссипативных свойств системы, поскольку основой исследования являются математическое описание и реализация мультифизических моделей объекта. Функционально определяющей частью привода является электромеханическая часть, для описания которой необходимо адекватно учесть реальные физические процессы, обусловленные механической частью системы с учётом изменяющейся нагрузки. Это касается интегральной характеристики процесса трения применительно к исполнительному элементу, учитывающей особенности необратимого процесса поглощения энергии и заключающейся в том, что момент сопротивления может иметь резко изменяющийся характер даже без учёта изменения состояния материала на рабочих поверхностях. Нахождение зависимости диссипативных характеристик, например силы трения от скорости перемещения исполнительного элемента, заложено в синергетическом подходе, использующем механические, химические, электромагнитные, гидравлические, тепловые, акустические, структурные и другие модели. Убедительность и достоверность получаемых при этом данных зависят от конкретных значений закладываемых теоретических положений и уточняемых измерениями параметров и характеристик элементов и нагрузки на этапах проектирования, изготовления, испытаний, эксплуатации.

Тип электродвигательного устройства (электромеханического преобразователя), предназначенного для преобразования электрической энергии в механическую, в первую очередь определяется мощностью нагрузки, но на практике зависит от класса напряжения, величины тока, частоты, коэффициента мощности, коэффициента полезного действия, режима нагрузки, другими словами, от степени использования преобразователя по электромагнитным, тепловым, механическим и экономическим показателям.



При этом выбор в качестве приводного двигателя асинхронной машины определяется её простотой, надёжностью, высокими динамическими характеристиками, возможностью осуществления связи между ротором и изменяющейся нагрузкой через «электрическую пружину», подобную механической в виде отрицательной обратной связи по положению актуатора (ротора), что позволяет регулировать собственную частоту двигателя.

Управляющее информационное устройство предназначено для обработки и формирования управляющих воздействий в электроприводе и реализуется в виде совокупности функционально связанных между собой электромагнитных, электромеханических, полупроводниковых элементов. Являясь формально «избыточным» элементом в структурной схеме, устройство управления обеспечивает возможность энергоэффективной эксплуатации технического объекта и осуществления заданного технологического процесса с субоптимальными характеристиками.

Передающее устройство обычно состоит из механического преобразователя для транзита механической энергии от электродвигателя к исполнительному элементу и согласования вида и скоростей их движения. Обоснование типа передаточного механизма связано с особенностями его применения и эксплуатации.

Исполнительный орган (рабочая машина) – устройство, непосредственно воспринимающее нагрузку, определяемую функциональными особенностями технологического процесса, реализуемого с использованием электропривода.

Механическая часть привода, выполняющая основную функцию электропривода – приведение в движение исполнительного элемента в соответствии с требованиями технологического режима, – включает все движущиеся элементы двигателя, передаточного и исполнительного механизмов.

Особенности механической части определяют номенклатуру выходных параметров привода: статический или динамический момент, угловую частоту вращения, усилие, линейную скорость. В качестве дополнительных параметров принимаются моменты, создаваемые силами трения, сжатия, растяжения, кручения неупругих тел (реактивные моменты, изменяющие своё направление при изменении направления движения), моменты сил тяжести, сжатия, растяжения, кручения упругих тел (активные, потенциальные). Активные моменты возникают в нагруженных элементах (валы, зубчатые зацепления и т. п.) при их деформации вследствие не абсолютной жёсткости механических связей.

Применительно к непосредственным электромеханическим приводам возвратно-поступательного движения допустимо принять, что вся энергия передаётся от двигателя к нагрузке напрямую, а потери в передаточном механизме включены в механические потери самого электромеханического преобразователя.

Существует несколько классификационных схем действующих на исполнительный механизм нагрузок [12].

К типовым нагрузкам относятся:

- статические нагрузки – постоянные силы или моменты, действующие на систему в состоянии покоя или с постоянной скоростью. Они могут быть вызваны силой тяжести, трением или жёсткостью механических элементов;
- динамические нагрузки – переменные силы или моменты, которые изменяются во времени в результате ускорения или замедления движения. Они могут быть вызваны внешними воздействиями (вибрации, удары) или внутренними процессами (управляемое изменение направления движения);
- внешние нагрузки – сторонние силы или моменты, действующие на систему, например, от рабочих инструментов или связанных с ними механизмов;
- внутренние нагрузки – собственные силы или моменты, возникающие внутри системы, например, от сил упругости или инерции элементов конструкции;
- инерционная нагрузка – нагрузка, связанная с массой и ускорением движущихся частей механизма или рабочей машины;

- ударная нагрузка – внезапное приложение усилия, вызывающее ударные знакопеременные нагрузки на исполнительный механизм;

- вязкостное трение – нагрузка, связанная с вязким трением между подвижными частями механизма.

Математическое описание нагрузок в непосредственных приводах предполагает разработку уравнений, описывающих связь между силами и моментами, действующими на систему. Точное описание представляет сложную научную задачу, которая может быть решена с использованием законов Ньютона, уравнений Лагранжа или других апробированных методов анализа.

Искомым уравнением для механических характеристик приводов линейных перемещений является зависимость силы тяги от линейной скорости или перемещения. Вращающий момент, который должен развивать двигатель для обеспечения заданного движения или усилия в статическом режиме, называется статическим моментом или моментом нагрузки. Иногда вместо момента нагрузки или силы задаются соответствующие зависимости мощности.

Для обеспечения возможности обобщённого анализа электроприводов выделяют ограниченное число типовых нагрузок. Это допустимо, поскольку, несмотря на большое количество технологических процессов и операций, их целесообразно классифицировать по виду зависимости момента сопротивления (нагрузки) от связанных выходных параметров.

Статические нагрузки по характеру изменения статического момента могут быть классифицированы по классам, предложенным в [13].

Первый класс включает механизмы, у которых статический момент остаётся практически постоянным. По взаимодействию с электроприводом выделяют активные, или потенциальные, и реактивные силы и моменты. Активные создаются внешними по отношению к приводу источниками энергии и не зависят от режимов его работы. Нагрузочный момент может создаваться силой тяжести груза, например в подъёмном механизме, он не зависит от направления и скорости перемещения. Реактивные силы и моменты возникают как реакция на активные воздействия. Эти нагрузки всегда действуют в направлении, противоположном перемещению электропривода, они изменяются при изменении направления перемещения и скорости.

При наличии сухого трения силы и моменты не зависят от величины скорости, но резко изменяются от её направленности. В реальных устройствах коэффициент трения покоя больше коэффициента трения движения. Поэтому при трогании момент сопротивления больше и механическая характеристика вблизи нулевой скорости имеет импульсное значение. Реактивная нагрузка может быть несимметричной, т. е. момент нагрузки может быть разным при движении в различных направлениях.

К наиболее простым с точки зрения математического описания относятся технологические процессы, для которых момент нагрузки не зависит от угловой (линейной) скорости вращения или перемещения. Механическая характеристика, т. е. зависимость статического момента от частоты вращения или тягового усилия от перемещения, – прямая линия. Примерами таких установок являются транспортёры с равномерной по рабочей длине нагрузкой, позиционные установки перемещения однотипных объектов на заданную величину без ограничительных элементов, подъёмно-разгрузочные агрегаты.

Ко второму классу отнесены рабочие машины, статический момент которых зависит от скорости перемещения или вращения. Независимо от степени изменения момента методика анализа процессов для них одинакова.

В качестве примера можно привести электропривод с нагрузкой вязкого трения в виде линейной составляющей нагрузки сухого трения или внутреннего вязкого трения, связанного с деформацией упругих элементов.

Это достаточно распространённая группа механизмов, для которых зависимость момента нагрузки от скорости вращения описывается уравнением

$$M_c(\omega) = M_{c0} + M_{c,ном} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^\alpha,$$



где M_{co} – момент механических потерь на трение; $M_{с.ном}$ – момент нагрузки при номинальной скорости вращения $\omega_{ном}$; ω – действительная скорость вращения; α – безразмерный коэффициент. При $\alpha = 0$ получается механическая характеристика механизмов первой группы.

Строго говоря, механических характеристик механизмов, проходящих через начало координат, не существует, т. к. во всех устройствах кроме моментов, зависящих от скорости вращения, действуют силы и моменты трения.

Для механизмов третьего класса статический момент зависит от пути, т. е. от угла поворота ротора электродвигателя. К этому типу относятся прежде всего рычажные, кулисные и кулачковые механизмы, к примеру, различные поршневые машины, ножницы для резки металла, прессы, кантователи, неуравновешенные подъёмники.

Четвёртый класс включает в себя механизмы, статический момент которых зависит одновременно от скорости и перемещения. Например, электротранспорт, нагрузка которого в статическом режиме кроме сухого трения в опорах и о рельсы, а также сопротивления воздуха, изменяющегося с изменением скорости движения, зависит от топологии пути.

Пятый класс охватывает приводы, статический момент которых является функцией времени. К нему относятся механизмы, работающие под воздействием изменяющейся во времени по периодическому закону силы, механизмы, в которых нагрузка имеет случайный характер (камнедробилки, шаровые мельницы и др.).

Точное описание физических процессов усложняется тем, что сила трения зависит от скорости движения, коэффициентов трения покоя и скольжения, внешней силы (например, силы прижатия шибера клиновой задвижки). Наиболее сложно, а часто с требуемой точностью и невозможно математически представить выражение момента нагрузки, которая изменяется случайным образом во времени. Это могут быть буровые станции, крупные дробилки, установки для удаления наледи и другие подобные механизмы.

Рассмотренные примеры можно классифицировать как типовые по механическим (тяговым) характеристикам, но они не полностью определяют практическую область применения особой группы электроприводов – непосредственного электропривода возвратно-поступательного движения.

Для непосредственного электропривода возвратно-поступательного движения наиболее характерны нагрузочные характеристики, имеющие место в технологических процессах, связанных с перемещением без изменения формы и параметров некоторой сосредоточенной массы, к которой приложены изменяющиеся при смещении на заданное расстояние усилия, в процессах, связанных с формообразованием и изменением параметров объекта (геометрических размеров, весовых удельных показателей) в пределах детерминированных размерных соотношений или со случайным и/или резко переменным характером нагрузки.

Современные электротехнические комплексы широко используют механизмы, служащие для линейного и/или возвратно-поступательного движения рабочей машины. К ним относятся вибраторы, грохоты, питатели, молотки, используемые для механизации трудоёмких процессов в строительной промышленности, в горном деле, на транспорте, в установках перемещения различных объектов, в медицинском оборудовании в системах искусственного кровообращения, в системах жизнеобеспечения человека. В машиностроении такие устройства применяются для рубки и обработки ударами, виброгалтовки, виброобкатки, перемешивания металлических расплавов, виброшлифования; в пищевой промышленности – для упаковки и сушки, расфасовки; в оптической механике и радиолокации – для создания различных траекторий сканирования; в сельском хозяйстве – для вибротранспортирования, встряхивания, вибросортировки и вибровспашки; в текстильной промышленности – для раскладки нити при намотке и прокидки челноков. При выполнении строительно-дорожных работ регулируемый электропривод линейного перемещения применяется в машинах ударного действия. В составе сервоприводов рассматриваемые устройства позволяют обеспечить точность частотного регулирования и повысить эффективность прецизионных систем стабилизации скорости и позиционирования промышленных роботов и высокоточных станков с ЧПУ.

Определить точный диапазон применения приводов линейного перемещения достаточно сложно, их использование действительно широко. Например, только на железнодорожном транспорте на их основе могут быть реализованы стрелочные переводы, электромеханические домкраты для подъёма вагонов при замене колёсных пар, автоматические установки открытия/закрытия дверей, платформы для доступа маломобильных групп населения, измерительные устройства, подъёмные модули пантографов и т. д. Проведённый анализ показывает, что практически в половине существующих электротехнических комплексов и систем находят применение приводы, обеспечивающие линейное перемещение исполнительного элемента [14].

В то же время не все приводы удовлетворяют таким показателям, как габариты, масса, надёжность, тяговое усилие, быстродействие, точность позиционирования и т. д., поэтому повышение эффективности приводных механизмов линейного перемещения является одним из приоритетных направлений разработки и модернизации механизмов в области промышленности, транспорта, связи, топливно-энергетического комплекса.

Актуальность исследования подтверждается анализом информации о существующих системах электропривода возвратно-поступательного движения на базе электромеханических преобразователей, показывающим заинтересованность производителей и потребителей энергетического оборудования в его дальнейшей модернизации и совершенствовании с целью улучшения технико-экономических характеристик.

Решение задачи создания безредукторного электропривода с высоким использованием рабочего объёма и приемлемыми характеристиками при малых скоростях движения выходной координаты привода привело к созданию нового типа электромеханического преобразователя – машины двойного движения с движущимся в разных плоскостях ротором и статором (при этом сохранилось за медленно движущимся элементом машины уже не соответствующее ему в строгом смысле слова прежнее название «статор»).

Совмещение функций приводного и исполнительного механизмов в одном узле, а именно в электродвигателе, являющемся обязательным элементом электрозадвижки, приводит к повышению эффективности устройства в целом за счёт не только существенного снижения стоимости задвижки (до 90 %), но и одновременного повышения системной надёжности.

Выводы. Анализ существующего оборудования, использующего известные электроприводы задвижек, показывает, что практически во всех конструктивных исполнениях можно выделить два основных узла, определяющих технико-экономические параметры привода: непосредственно приводной электродвигатель и механизм перемещения шпинделя задвижки.

Общим недостатком существующих устройств является высокая сложность и, как следствие, низкая технологичность. Применение в качестве привода типовых электродвигателей для изменения вращательного движения вала в поступательное движение исполнительного элемента предполагает наличие специального механизма, например редуктора на основе зубчатой или червячной передачи, что снижает технико-экономические показатели и надёжность привода.

Основными направлениями дальнейшего исследования являются установление основных критериев функциональной эффективности электропривода, проведение структурного анализа рассматриваемого привода с целью выделения стандартных элементов для выбора адаптированных методик их последующего использования при проектировании, разработка новых принципов конструирования, аддитивных подходов, методов, алгоритмов в исследуемой области, моделирование и макетирование технических решений и изготовление моделей, макетов, экспериментальных образцов, прототипов привода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка эффективности электропривода запорной арматуры / Г. В. Кулинченко, А. М. Масленников, В. А. Бахута, В. Д. Червяков // Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий. – 2019. – № 4 (8). – С. 36-44.
2. Гарганеев, А. Г. Электропривод запорной арматуры как мехатронная система / А. Г. Гарганеев, А. С. Каракулов, С. В. Ланграф // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 180-187.



3. Электродвигатели для регулируемого привода запорной арматуры / А. В. Удовиченко, Д. Л. Калужский, Н. А. Уваров, А. Д. Мехтиев // *Электроника*. – 2021. – Т. 21. – № 10. – С. 1-14.
4. Гринченков, В. П. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов / В. П. Гринченков, И. А. Павленко // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2009. – № 4. – С. 51-57.
5. Оптимизация геометрии зубцовой зоны гистерезисной муфты запорной арматуры нефтепровода / А. Г. Гарганеев, К. К. Динь, Н. Ю. Сипайлова, Е. И. Кашин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 155-164.
6. Ганнелъ, Л. В. Оптимизация профиля скорости позиционных линейных электроприводов / Л. В. Ганнелъ // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 50-55.
7. Матросов, А. В. Анализ режимов многомашинного электрогидравлического привода затвора гидротурбины / А. В. Матросов // *НТВ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. – 2016. – № 1 (238). – С. 19-27.
8. Ахrameева, Е. В. Модель преобразователя углового перемещения в линейное на базе передачи «винт-гайка» / Е. В. Ахrameева, Т. Р. Кузнецова // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2022. – Вып. 9. – С. 24-28.
9. Камалетдинов, Р. С. Механизированная добыча нефти: новые вызовы – новые решения / Р. С. Камалетдинов // *Деловой журнал. Neftegaz.RU*. – 2023. – № 4 (136). – С. 42-47.
10. ГОСТ 22413-89. Арматура трубопроводная с электромагнитным приводом. Основные параметры: издание официальное: утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15 июня 1989 г. № 1610: дата введения 1991-01-01 / разработан Министерством химического и нефтяного машиностроения СССР. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 4 с.
11. ГОСТ Р 50369-92. Электроприводы. Термины и определения: нац. стандарт Российской Федерации: изд. официальное: утв. и введён в действие Постановлением Госстандарта России от 21 октября 1992 г. № 1430: введён впервые: дата введения 1993-07-01 / разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 39 «НИЗКОВОЛЬТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ». – М.: ФГУП Стандартиформ, 1993. – 212 с.
12. Усольцев, А. А. Электрический привод / А. А. Усольцев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 238 с.
13. Косматов, В. И. Электрический привод / В. И. Косматов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. – 243 с.
14. Линенко, А. В. Принципы построения и расчёт линейных асинхронных электроприводов сложного колебательного движения для технологических машин АПК / А. В. Линенко, М. Ф. Туктаров, Т. И. Камалов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2015. – № 11 (3). – С. 44-49.

Фролов А. В., Пукас А. Ю.
A. V. Frolov, A. Y. Pukas

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ЦИФРОВОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SIMINTECH

RESEARCH OF A DIGITAL PULSE POTENTIOMETER USING THE SIMINTECH PROGRAM

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Aleksei V. Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Afrolov.kms@mail.ru.

Пукас Александр Юрьевич – студент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: peit@knastu.ru.

Alexander Y. Pukas – Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: peit@knastu.ru.

Аннотация. Приводятся результаты разработки электрической схемы импульсного цифрового потенциометра и исследования его работы в симуляторе SimInTech. Экспериментально определены: статическая передаточная характеристика, зависимость коэффициента пульсаций от параметров элементов схемы, а также переходная характеристика и зависимость длительности переходных процессов от значения параметров сигнала управления. Полученные зависимости могут быть использованы для практических расчётов предложенной схемы импульсного цифрового потенциометра.

Summary. The results of the development of an electrical circuit of a pulse digital potentiometer and the study of its operation in the SimInTech simulator are presented. The following were experimentally determined: the static transfer characteristic, the dependence of the ripple coefficient on the parameters of the circuit elements, as well as the transient characteristic and the dependence of the duration of transient processes on the value of the control signal parameters. The obtained dependencies can be used for practical calculations of the proposed pulse digital potentiometer circuit.

Ключевые слова: потенциометр, цифровой, импульсный, расчёт, моделирование, SimInTech, характеристика преобразования, переходный процесс, коэффициент пульсаций.

Key words: potentiometer, digital, pulse, calculation, modeling, SimInTech, conversion characteristic, transient response, ripple factor.

Статья подготовлена при поддержке ФГБОУ ВО «КНАГУ» (грант № ВН001/2023).

УДК 621.314.6

Введение. Цифровые потенциометры нашли широкое применение в системах автоматизации различного назначения. Замена обычного аналогового потенциометра на цифровой позволяет управляющей системе самостоятельно изменять различные параметры функциональных блоков: коэффициент усиления усилителя; коэффициент ослабления аттенюатора; частоту среза, добротность аналоговых фильтров и т. д. В системах автоматики всё ещё широко используются аналоговые сигналы управления электроприводами, сварочными источниками тока и другими исполнительными механизмами [8], для получения которых используются цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), которые фактически содержат в себе цифровые потенциометры.



На разработку схемы цифрового потенциометра и исследования её характеристик авторов натолкнула следующая практическая задача. Необходимо разработать имитатор сигнала датчика температуры потенциометрического типа (типа «РТ100», «РТ1000» и им подобных) для проведения входного контроля и отработки режимов работы систем управления приточно-вытяжной вентиляцией, блочными индивидуальными тепловыми пунктами и т. п. При этом к имитатору сигнала датчика температуры предъявляются следующие требования: имитатор должен иметь только две клеммы для подключения к тестируемой системе (аналогично резистору); схема обработки сигнала датчика в тестируемой системе не известна (может использоваться делитель напряжения, мостовая схема измерения, схема измерения на операционном усилителе с датчиком в цепи обратной связи и др.); имитатор должен быть гальванически изолирован от схемы управления им; напряжение, подаваемое на имитатор, может достигать +24 В; схема имитатора должна быть максимально простой и дешёвой; имитатор должен обеспечивать имитацию сопротивления в пределах 1...2 кОм с шагом не более 5 Ом (0,5 % от диапазона изменения сопротивления); требований к быстродействию нет.

Так как цифровой потенциометр фактически является ЦАП с делителем Кельвина, также иногда называемым «ЦАП с суммированием напряжений», то классическое решение поставленной задачи – использовать одну из серийно выпускаемых интегральных схем цифрового потенциометра [2; 3; 6; 12].

Но цифровые потенциометры нуждаются в электропитании, для обеспечения которого необходимо дополнительное применение гальванически изолированного источника электропитания. Для обеспечения гальванической развязки указанного существующего потенциометра необходимо применение оптопар, количество которых определяется используемой шиной для управления потенциометром (от двух – для шины I²C или UART, четырёх – для SPI, более четырёх – для параллельных шин). Как правило, количество ступеней регулирования сопротивления этих потенциометров составляет 64...256, реже – 1024, что хоть и обеспечивает требуемую дискретность изменения сопротивления 0,5 %, но для более точной регулировки сопротивления уже будет недостаточно. Номенклатура сопротивлений цифровых потенциометров достаточно узкая – в продаже главным образом присутствуют потенциометры с сопротивлениями 10, 50, 100 кОм. Можно встретить сопротивления 1, 2,1, 2,5, 5, 20 кОм. Максимально допустимое напряжение серийных потенциометров, как правило, не превышает напряжения питания – до 5 В, реже до 16,5 В. Цена колеблется в широких пределах и может достигать 6000 р. Таким образом, существующие цифровые потенциометры не соответствуют вышеописанным техническим требованиям.

Электронный цифровой потенциометр можно спроектировать на переключаемых резисторах, последовательно или параллельно соединённых между собой. Но эта схема унаследует все вышеперечисленные недостатки выпускаемых интегральных цифровых потенциометров. В качестве резистора с переменным сопротивлением можно использовать полевой транзистор с управляющим PN-переходом, но его активная область ограничивается напряжением «сток-исток» не более нескольких вольт [5]; кроме того, для управления транзистором потребуется соответствующая схема управления, которая должна иметь гальваническую развязку.

Отдельного внимания заслуживают схемы на переключаемых конденсаторах [7; 9], в которых резистор заменяется на двунаправленный ключ и конденсатор. Эти схемы управляются с помощью одного сигнала с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), что обеспечивает высокую разрядность преобразования. Но эти схемы используют «общую точку» схемы, что не позволяет их применить для решения поставленной задачи.

Для решения задачи проектирования цифрового потенциометра были использованы принципы работы ЦАП последовательного типа, а также схемы на переключаемых конденсаторах. Разработанная схема (см. рис. 1) содержит: два резистора $R1$ и $R2$, которые задают порог регулирования эквивалентного сопротивления имитатора; один электронный ключ $S1$, работающий под управлением ШИМ-сигнала U_y (при этом чем больше коэффициент заполнения (чем дольше ключ находится в закрытом состоянии), тем меньше эквивалентное сопротивление схемы); конденсатор

$C1$, сглаживающий пульсации тока и напряжения схемы во время переходных процессов после коммутации ключа.

Описанная схема подключается к внешней цепи с помощью двух клемм $X1$ и $X2$, не требует собственного источника электропитания. Гальваническая развязка осуществляется в цифровой однопроводной цепи управления ключом. В качестве ключа может быть использована транзисторная оптопара или иная схема твёрдотельного реле.

Как было указано выше, сопротивление резистора $R2$ соответствует необходимому минимальному эквивалентному сопротивлению схемы, а суммарное сопротивление $R1 + R2$ соответствует необходимому максимальному эквивалентному сопротивлению схемы. Следовательно, резистор $R1$ задаёт диапазон регулирования эквивалентного сопротивления. При коммутациях ключа эквивалентное сопротивление схемы импульсно меняется от минимального до максимального (см. рис. 2). Для сглаживания пульсаций применяется конденсатор $C1$, ёмкость которого определяется частотой ШИМ-сигнала управления, а также допустимым коэффициентом пульсаций.

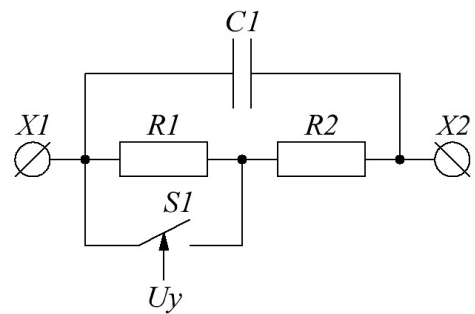


Рис. 1. Схема разработанного импульсного цифрового потенциометра

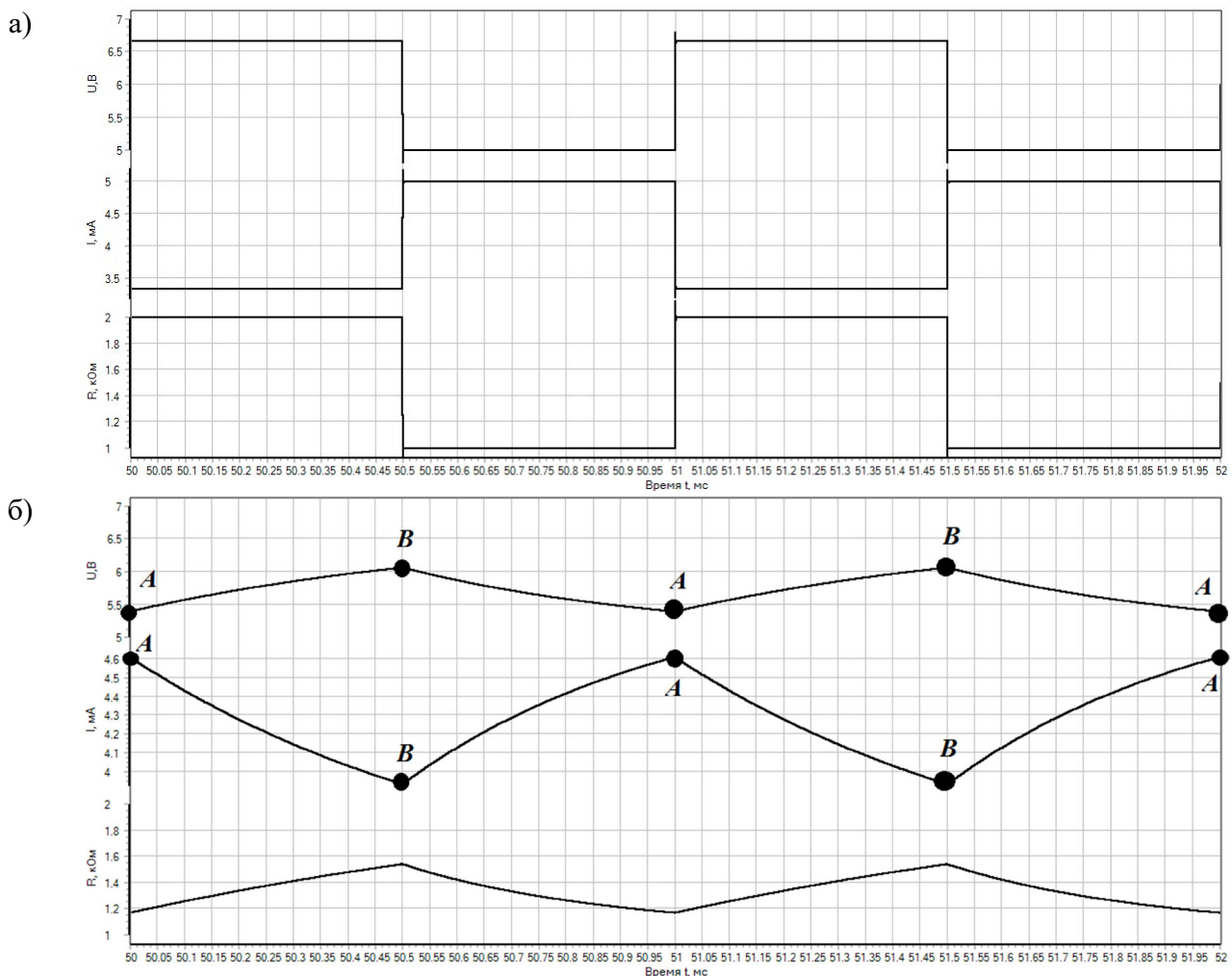


Рис. 2. Осциллограммы напряжения, тока и эквивалентного сопротивления схемы:
а – без фильтрующего конденсатора; б – с фильтрующим конденсатором

Аналитический расчёт работы схемы сводится к определению токов напряжений в точках коммутации ключа A и B (см. рис. 2, б) и законов изменения токов и напряжения между этими точками, после чего из полученных выражений необходимо найти эквивалентное сопротивление по закону Ома и для него определить среднее значение эквивалентного сопротивления и коэффициент его пульсаций. Данная задача получения математической модели разработанной схемы достаточно трудоёмка для получения аналитических зависимостей, поэтому в работе были проведены исследования работы схемы в симуляторе SimInTech.

Методика и результаты исследований. Исследования проводились в программе SimInTech [1; 4; 11]. Исследуемая схема представлена на рис. 3.

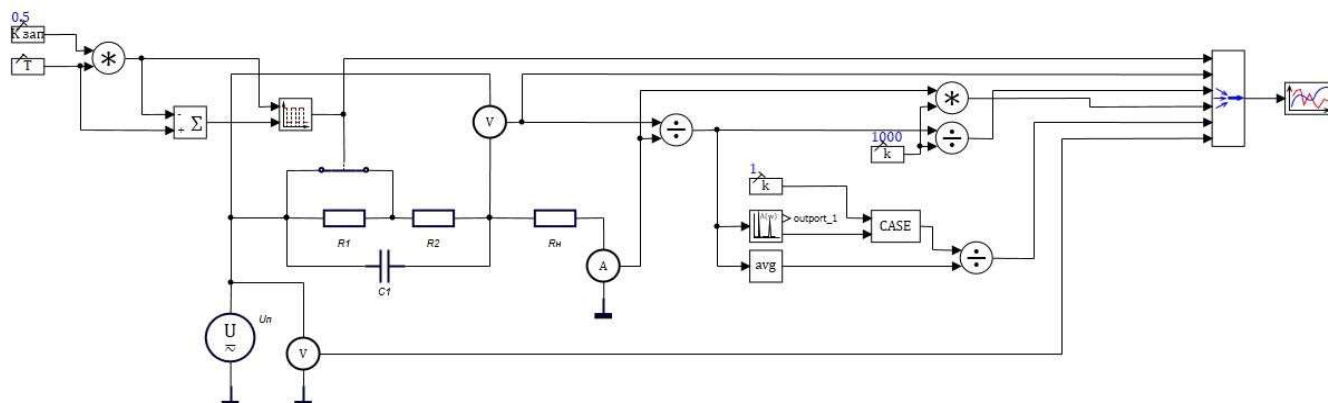


Рис. 3. Модель для исследования схемы цифрового импульсного потенциометра в программе SimInTech

Параметры элементов схемы: $R1 = 1 \text{ кОм}$, $R2 = 1 \text{ кОм}$, $Rн = 1 \text{ кОм}$, $C1 = 10 \text{ мкФ}$, $Uп = 10 \text{ В}$, $f = 1 \text{ кГц}$.

Модель обеспечивает измерение падения напряжения на схеме, тока схемы, расчёт эквивалентного сопротивления схемы (по закону Ома), расчёт коэффициента пульсаций эквивалентного сопротивления.

Для исследования характеристики преобразования (зависимости эквивалентного сопротивления схемы от величины коэффициента заполнения управляющего ШИМ-сигнала) коэффициент заполнения динамически изменялся в диапазоне $0 \dots 1$ с шагом $0,1$ (см. рис. 4).

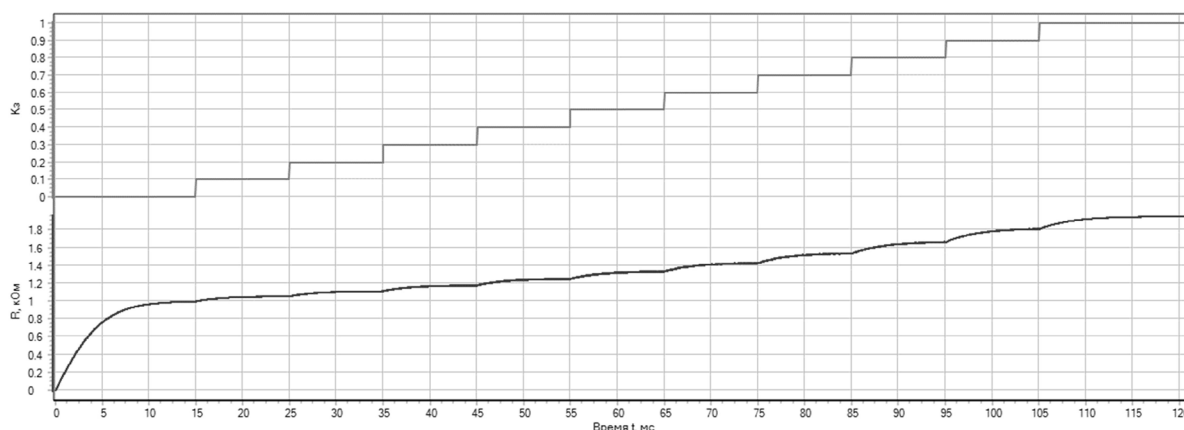


Рис. 4. Исследование характеристики преобразования в программе SimInTech

В результате анализа рис. 4 была получена характеристика преобразования (см. рис. 5, а), которая может быть описана квадратичной зависимостью с точностью аппроксимации $0,99$:

$$R = 0,6 \cdot \gamma^2 + 0,36 \cdot \gamma + 1,$$

где R – эквивалентное сопротивление схемы, кОм; γ – коэффициент заполнения ШИМ (относительная ширина импульса ШИМ).

$$R = (0,6 \cdot \gamma^2 + 0,36 \cdot \gamma) \cdot R1 + R2, \quad (1)$$

где $R1, R2$ – сопротивления резисторов схемы, кОм.

Зависимость длительности переходного процесса (в течение которого значение эквивалентного сопротивления достигает 0,95 от установившегося значения) от коэффициента заполнения (см. рис. 5, б) может быть описана линейной зависимостью с точностью аппроксимации 0,98:

$$\tau = 4,49 \cdot \gamma + 8,82, \quad (2)$$

где τ – длительность переходного процесса, мс.

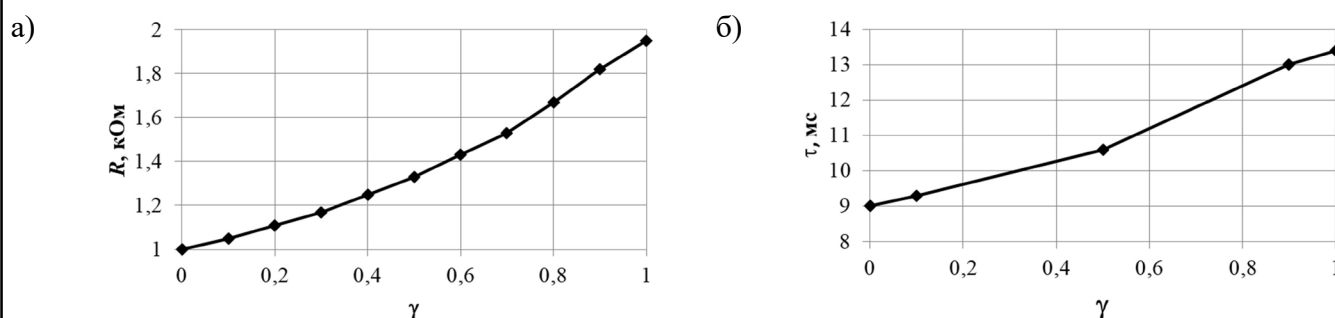


Рис. 5. Характеристики схемы импульсного цифрового потенциометра:
а – характеристика преобразования; б – зависимость длительности
переходного процесса от коэффициента заполнения

Для исследования зависимости эквивалентного сопротивления схемы от подводимого к ней напряжения был проведён эксперимент, в ходе которого напряжение дискретно увеличивалось от 0 до 10 В с шагом 1 В и анализировалась динамика изменения эквивалентного сопротивления. Исследование (см. рис. 6) показывает, что в статическом режиме напряжение практически не оказывает влияния на эквивалентное сопротивление цифрового потенциометра. Но в динамике наблюдается достаточно продолжительный переходный процесс (для исследуемых параметров элементов цепи длительностью до $\tau \sim \frac{15}{f}$, где f – частота ШИМ-сигнала управления, Гц; τ – длительность переходного процесса, с).

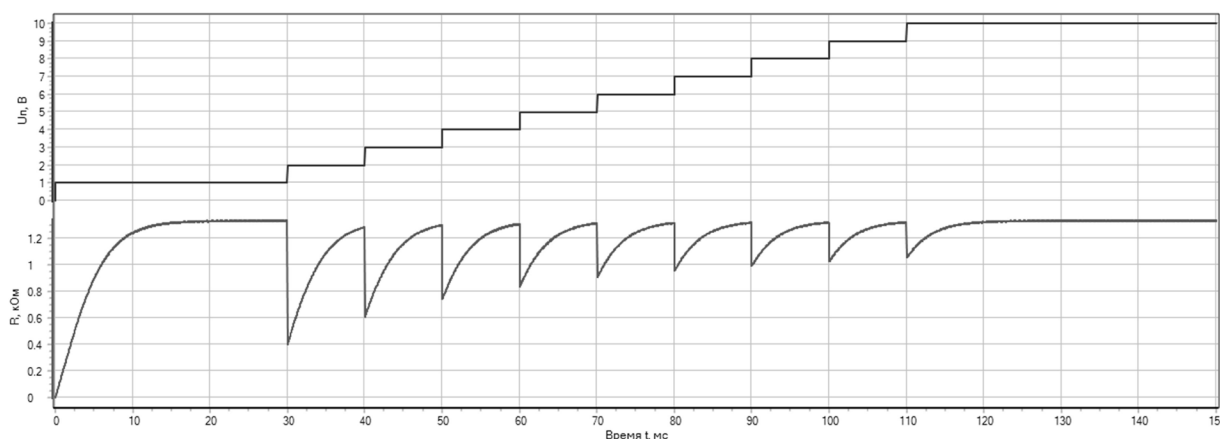


Рис. 6. Зависимость эквивалентного сопротивления схемы от подводимого к ней напряжения

Одним из важнейших показателей работы схемы, определяющим точность преобразования, является коэффициент пульсаций [10], который рассчитывается следующим образом:

$$k_{\pi} = \frac{R_1}{R_{cp}},$$

где k_{π} – коэффициент пульсаций; R_1 – амплитуда первой гармоники эквивалентного сопротивления, Ом; R_{cp} – среднее значение сопротивления нагрузки за период, Ом.

$$R_{cp} = f \int_0^{\frac{1}{f}} R(t) dt,$$

$$R_1 = \sqrt{A1^2 + B1^2},$$

$$A1 = 2f \int_0^{\frac{1}{f}} (R(t) \cos(2\pi ft)) dt,$$

$$B1 = 2f \int_0^{\frac{1}{f}} (R(t) \sin(2\pi ft)) dt.$$

Исследованные зависимости коэффициента пульсаций от параметров элементов схемы (см. рис. 7) могут быть описаны следующими выражениями:

$$k_{\pi} = \frac{1}{2,7035 + 15,341 \cdot C1 \cdot 10^{-6}}, \quad (3)$$

где $C1$ – ёмкость конденсатора $C1$, Ф;

$$k_{\pi} = \frac{1}{0,7271 + 160 \cdot f \cdot 10^3}, \quad (4)$$

$$k_{\pi} = \frac{1}{0,0477 + 160 \cdot R_H \cdot 10^3}, \quad (5)$$

где R_H – сопротивление нагрузки схемы, Ом;

$$k_{\pi} = 0,0009 + 0,0274 \cdot \gamma - 0,0324 \cdot \gamma^2. \quad (6)$$

Как видно из формул (3) – (5), коэффициент пульсаций находится в обратной зависимости от частоты, ёмкости конденсатора и сопротивления нагрузки, поэтому эти коэффициенты можно объединить в следующую функцию:

$$k'_{\pi} = \frac{1}{f \cdot C1 \cdot R_H},$$

после чего отобразить её на графике (см. рис. 7) и вывести коррелирующую функцию:

$$K_{\pi} \approx 5,8 \cdot k'_{\pi} = \frac{5,8}{C1 \cdot R_H \cdot f} + 0,1. \quad (7)$$

Формула (7) обеспечивает корреляцию расчётных и экспериментальных данных не хуже, чем 0,99.

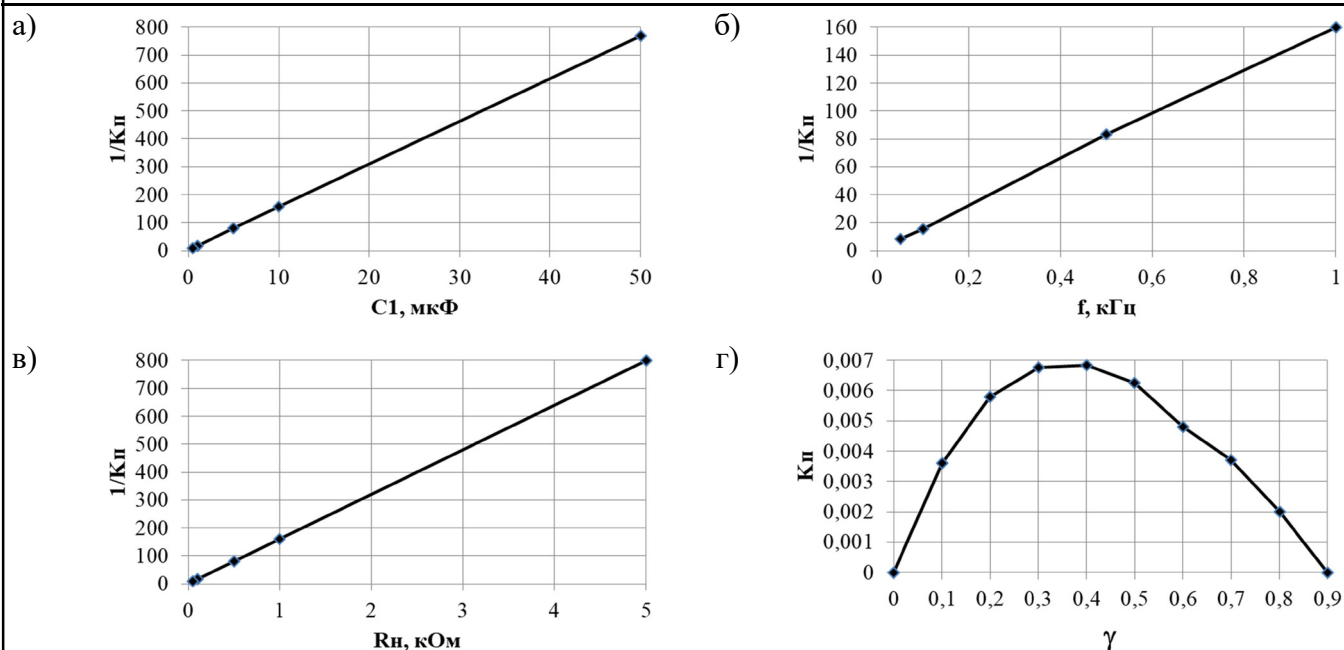


Рис. 7. Зависимость коэффициента пульсаций от ёмкости конденсатора (а), частоты сигнала управления (б), сопротивления нагрузки (в), коэффициента заполнения сигнала управления (г)

Выводы:

1. Моделирование работы спроектированной схемы цифрового импульсного потенциометра продемонстрировало работоспособность указанной схемы.

2. В статическом режиме разработанная схема обеспечивает преобразование ШИМ-сигнала управления в сопротивление. Сопротивление разработанной схемы определяется сопротивлениями входящих в неё резисторов и коэффициентом заполнения сигнала управления и не зависит ни от подводимого напряжения, ни от сопротивления нагрузки. Схема работоспособна в широком интервале рабочих напряжений, не требует дополнительного источника электропитания, обеспечивает гальваническую развязку со схемой управления, отличается простотой реализации, возможностью гибкой настройки как минимального эквивалентного сопротивления, так и диапазона его изменения, дискретность преобразования определяется разрешающей способностью ШИМ-сигнала и может быть очень низкой.

3. Как свойственно последовательным преобразователям, разработанная схема отличается достаточно низким быстродействием и характеризуется достаточно большой длительностью переходных процессов при изменении как входного напряжения, так и параметров сигнала управления. Как свойственно импульсным устройствам, разработанная схема формирует пульсации эквивалентного сопротивления. При этом снижение коэффициента пульсаций за счёт повышения ёмкости сглаживающего конденсатора неизбежно приводит к увеличению длительности переходных процессов и наоборот. Но одновременного улучшения коэффициента пульсаций и длительности переходных процессов можно добиться при повышении частоты управляющего ШИМ-сигнала.

4. Разработанная схема характеризуется хорошими статическими и эксплуатационными характеристиками, но не должна эксплуатироваться при резких изменениях параметров управляющего сигнала и рабочего напряжения.

5. У исследуемой схемы характеристика преобразования аппроксимируется квадратным выражением (1) с точностью аппроксимации порядка 0,99. Зависимость длительности переходного процесса от длительности импульса ШИМ-сигнала аппроксимируется выражением (2), а зависимость коэффициента пульсаций от параметров элементов схемы аппроксимируется выражением (7) с точностью аппроксимации не менее 0,99. Полученные эмпирические зависимости могут быть



использованы при расчёте схемы импульсного цифрового потенциометра с заданными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
2. Власенко, А. Применение цифровых потенциометров фирмы Analog Devices / А. Власенко // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8 (52). – С. 58-60.
3. Деревягин, А. Российская микросхема двухканального цифрового потенциометра на 256 положений с трёхпроводным последовательным интерфейсом / А. Деревягин, В. Бодров // Компоненты и технологии. – 2006. – № 11 (64). – С. 70-74.
4. Иванкова, Е. П. Исследование электромеханического привода возвратно-поступательного движения в пакете имитационного моделирования / Е. П. Иванкова, М. Б. Колесник // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 54-62.
5. Плотникова, Е. Ю. Моделирование полевого транзистора с управляющим р-п переходом / Е. Ю. Плотникова, А. А. Винокуров, А. В. Арсентьев // Твёрдотельная электроника, микроэлектроника и нанoeлектроника: межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. – С. 45-50.
6. Пушкарев, М. Цифровые потенциометры / М. Пушкарев // Компоненты и технологии. – 2006. – № 5 (58). – С. 74-81.
7. Рембеза, С. И. Секционный цифро-аналоговый преобразователь для проектирования конвейерных КМОП-КНИ-АЦП при минимизации переключаемых конденсаторов / С. И. Рембеза, В. С. Кононов // Моделирование систем и процессов. – 2013. – № 3. – С. 32-34.
8. Сухоруков, С. И. Разработка структуры системы управления роботизированного комплекса трёхмерной печати металлических изделий / С. И. Сухоруков, А. И. Годяев, А. Р. Овсянников // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 103-111.
9. Торопчин, Д. С. Синтез перестраиваемых фильтров высокого порядка на переключаемых МОП-конденсаторах в однородном базисе / Д. С. Торопчин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12. – № 2. – С. 35-40.
10. Фролов, А. В. Исследование особенностей работы мостового выпрямителя с активно-ёмкостной нагрузкой / А. В. Фролов, А. В. Боцманов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 20-31.
11. Фролов, А. В. применение модифицированного сигма-дельта модулятора для деления частоты цифровых сигналов / А. В. Фролов, А. Н. Швец, Ю. Ф. Мусихин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 63-67.
12. Шитиков, А. Цифровые потенциометры от Dallas Semiconductor / А. Шитиков // Компоненты и технологии. – 2001. – № 8 (17). – С. 32-35.

Ким К. К., Карпова И. М., Иванкова Е. П., Королева Е. Б., Михайлов М. В., Ткачук А. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЛЕТАЮЩЕГО МУЛЬТИКОПТЕРА ЭНЕРГИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЯГОВОГО ТОКА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Ким К. К., Карпова И. М., Иванкова Е. П., Королева Е. Б., Михайлов М. В., Ткачук А. А.
K. K. Kim, I. M. Karpova, E. P. Ivankova, E. B. Koroleva, M. V. Mikhailov, A. A. Tkachuk

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗАРЯДА
АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЛЕТАЮЩЕГО МУЛЬТИКОПТЕРА ЭНЕРГИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЯГОВОГО ТОКА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF THE BATTERY RECHARGE
OF A FLYING MULTICOPTER BY THE MAGNETIC FIELD ENERGY
OF THE ELECTRIFIED RAILWAY TRANSPORT TRACTION CURRENT**

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031 Московский пр., д. 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, 190031, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Карпова Ирина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031 Московский пр., д. 9. E-mail: legiero@mail.ru.

Irina M. Karpova – PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, 190031, Russia. E-mail: legiero@mail.ru.

Иванкова Евгения Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: jenyvany@mail.ru.

Evgeniya P. Ivankova – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: jenyvany@mail.ru.

Королева Елена Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031 Московский пр., д. 9. E-mail: elzazybina@yandex.ru.

Elena B. Koroleva – PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, 190031, Russia. E-mail: elzazybina@yandex.ru.

Михайлов Михаил Владимирович – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031 Московский пр., д. 9. E-mail: toe@pgups.ru.

Mikhail V. Mikhailov – Postgraduate Student, Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, 190031, Russia. E-mail: toe@pgups.ru.

Ткачук Антон Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031 Московский пр., д. 9. E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru.



Anton A. Tkachuk – PhD in Engineering, Associate Professor, Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Power Engineering Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, 190031, Russia. E-mail: a.a.tkachuk@mail.ru.

Аннотация. Величины токов в токоведущих элементах цепной контактной подвески переменного тока электрифицированного железнодорожного транспорта напряжения 27,5 кВ позволяют в установившихся режимах осуществить бесконтактный подзаряд бортовой аккумуляторной батареи во время полёта мультикоптера – беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Показано, что для подзаряда бортовой аккумуляторной батареи полёт БПЛА можно реализовывать по траектории, лежащей в плоскости, находящейся между несущим тросом и контактным проводом, однако с позиции обеспечения безопасности полёта БПЛА и упрощения управления аппаратом более приемлемым является полёт БПЛА в горизонтальной плоскости, в которой находится прямолинейный несущий трос. Выявлено, что чем больше витков содержит используемая зарядная кольцевая электрическая обмотка, тем требования по соблюдению полёта БПЛА по заданной траектории строже (в свете получения требуемого значения зарядного напряжения). Эксперименты показали, что подзаряд бортовой аккумуляторной батареи можно осуществить при «зависании» БПЛА рядом с токоведущим элементом контактной подвески.

Summary. The current values through the current-carrying elements of the contact catenary of the electrified railway transport (27.5 kV) allow for non-contact recharging of the onboard battery during the multicopter (an unmanned aerial vehicle – UAV) flight in steady modes. We show that to recharge the on-board battery, the UAV flight can be carried out along a trajectory lying in the plane located between the suspension cable and the contact wire. However, from the point of view of ensuring the safety of the UAV flight and simplifying the control of the device, it is more acceptable to fly the UAV in the horizontal plane where there is a rectilinear suspension cable. It has been revealed that the use of a charging ring electric winding with a higher number of turns imposes stricter requirements on the UAV's flight along a predetermined trajectory in order to achieve the required charging voltage. The experiments have shown that the on-board battery can be recharged when the UAV is "hovering" near to the live element of the contact catenary.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, цепная контактная подвеска, обмотка, подзаряд, аккумуляторная батарея, контактный провод, несущий трос.

Key words: unmanned aerial vehicle, contact catenary, winding, charging, battery, contact wire, suspension cable.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00159).

УДК 621.647.23

Введение. Одним из основных требований, предъявляемых к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), используемым для мониторинга железнодорожной инфраструктуры, в частности состояния контактной сети электрифицированного железнодорожного транспорта, является обеспечение максимального времени их непрерывного полёта. В случае использования электрических БПЛА мультикоптерного типа это время ограничено ёмкостью бортовой аккумуляторной батареи (АКБ) [1–8]. Одним из решений этой проблемы является бесконтактный подзаряд АКБ во время полёта БПЛА энергией магнитного поля, созданного токами, протекающими по элементам контактной подвески [9–13]. Реализация этого предложения возможна индукционным методом с помощью электрической обмотки, расположенной на борту БПЛА и являющейся частью зарядного устройства АКБ.

Эффективность данного метода зависит от величины магнитного поля, в котором передвигается БПЛА, а следовательно, от расстояния до источников поля (элементов контактной подвески с токами) и величины этих токов. Если расстояние до источника поля регламентируется требованиями безопасности полёта БПЛА, то вопрос определения возможных величин токов в том или ином элементе контактной подвески ещё требует своего разрешения.

Определение токов в элементах контактной подвески. В качестве объекта исследований была выбрана цепная контактная подвеска с несущим тросом ПБСМ70, контактным проводом МФ120 (предполагался прямолинейным) и струнами БСМ1. Рассматривалась одна межподстанционная зона однопутного участка с двусторонним питанием переменным током и одним электровозом на этом участке. Для расчёта токов была построена схемная модель этого типа подвески с учётом рельсовой цепи и двух конечных тяговых подстанций. Для учёта сложной топологии контактной подвески при разработке модели была использована конечно-элементная структурная схема, обычно применяемая для изучения механических нагрузок [14; 15], откуда же заимствованы длины всех участков, на которые подразделяется пролёт подвески (см. рис. 1).

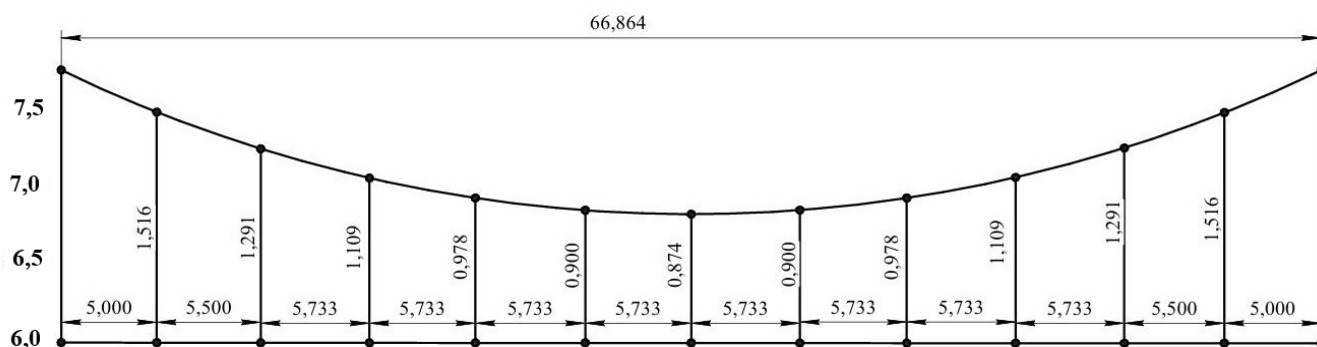


Рис. 1. Схема контактной подвески

Геометрические размеры элементов приведённой на рис. 1 структуры были использованы для определения их электрических параметров (индуктивного и резистивного сопротивлений), необходимых для нахождения токов. В табл. 1 приведены необходимые для расчётов габариты и электрические характеристики применяемых проводов подвески (несущего троса – НТ, контактного провода – КП, струны), а рассчитанные электрические параметры её отдельных элементов – в табл. 2.

Таблица 1

Габариты и электрические характеристики применяемых проводов подвески

	Марка	Эквивалентный радиус, мм	Сопротивление, Ом/км
НТ	ПБСМ-95	5,35	0,48
КП	МФ-120	6,18	0,1475
Струны	БСМ-1	6	2

Расчёт индуктивностей элементов схемы выполнялся по формуле для прямолинейного провода круглого сечения [16]:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left(\ln \frac{2l}{r_{\text{зкв}}} - 0,75 \right),$$

где μ_0 – магнитная постоянная, l – длина участка, $r_{\text{зкв}}$ – эквивалентный радиус круглого поперечного сечения провода.

Активные сопротивления элементов рассчитывались по формуле для сопротивления провода постоянному току:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода, S – площадь поперечного сечения провода.

Таблица 2

Электрические параметры отдельных элементов

№ участка	$R_{\text{три}} \times 10^3$, Ом	$L_{\text{три}} \times 10^6$, Гн	$R_{\text{при}} \times 10^3$, Ом	$L_{\text{при}} \times 10^6$, Гн	$R_{\text{стри}} \times 10^3$, Ом	$L_{\text{стри}} \times 10^6$, Гн
1	2,88	8,36	0,738	6,64	3,03	1,66
2	2,88	8,36	0,811	7,41	2,58	1,37
3	2,88	8,36	0,846	7,77	2,22	1,145
4	2,88	8,36	0,846	7,77	1,96	0,985
5	2,88	8,36	0,846	7,77	1,80	0,892
6	2,88	8,36	0,846	7,77	1,75	0,861
7	2,88	8,36	0,846	7,77	1,80	0,892
8	2,88	8,36	0,846	7,77	1,96	0,985
9	2,88	8,36	0,846	7,77	2,22	1,145
10	2,88	8,36	0,846	7,77	2,58	1,37
11	2,88	8,36	0,811	7,41	3,03	1,66
12	2,88	8,36	0,738	6,64	-	-

Эквивалентная электрическая схема одного пролёта контактной подвески (параметры элементов приведены в табл. 2) имеет вид, представленный на рис. 2.

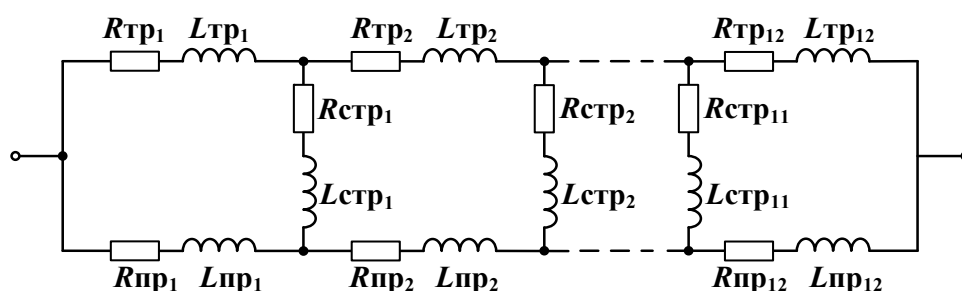


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема одного пролёта

На схеме параметры, относящиеся к несущему тросу, снабжены индексом «тр», параметры контактного провода и струн – индексами «пр» и «стр» соответственно.

Рельсовая цепь в модели учитывается введением сопротивлений рельсов в эквивалентную электрическую схему контактной подвески.

Если принять удельное сопротивление рельсовой стали равным $0,21 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, то погонное сопротивление одной рельсовой нити постоянному току для рельсов марки Р75 будет равно $0,0221 \text{ Ом/км}$, для Р65 – $0,0254 \text{ Ом/км}$ [17; 18].

Однако на переменном токе частотой 50 Гц наблюдается существенный разброс численных значений погонного активного сопротивления рельсов, полученных различными методами. Например, для рельсов типа Р65 диапазон значений находится в пределах $0,126 \dots 0,40 \text{ Ом/км}$.

В исследованиях, описанных в данной работе, использовались нормативные значения [19] и сопротивление одной рельсовой нити принималось равным

$$\underline{Z}_p = 0,4e^{j65^\circ} = (0,169 + j0,363) \text{ Ом/км}.$$

В данное выражение входят и сопротивления рельсовых стыков.

Для учёта движения электровоза на участке сопротивление рельсов разбивалось на 12 элементов подобно модели контактной подвески, показанной на рис. 1. Данные для построения электрической схемы сведены в табл. 3.

Таблица 3

Электрические параметры схемы

№ участка	l_i , м	$R_{pi} \times 10^4$	$L_{pi} \times 10^5$
1	5	8,45	0,578
2	5,5	9,295	0,636
3	5,733	9,689	0,663
4	5,733	9,689	0,663
5	5,733	9,689	0,663
6	5,733	9,689	0,663
7	5,733	9,689	0,663
8	5,733	9,689	0,663
9	5,733	9,689	0,663
10	5,733	9,689	0,663
11	5,5	9,295	0,636
12	5	8,45	0,578
Сумма	66,864	0,0113	0,0773

Авторами была использована упрощённая схема электровоза, в которой последний представлялся источником синусоидального тока $I_{ЭВ}$, величина которого была равна тяговому току. Такое представление электровоза позволило исследовать распределения токов в элементах контактной подвески. Изменением величины тока источника в заданных пределах (например, в диапазоне 200...800 А) имитировались различные режимы работы тяговой сети.

Тяговые подстанции в расчётах представлялись эквивалентными схемами, состоящими из последовательно соединённых идеального источника напряжения с внутренним активно-индуктивным сопротивлением (см. рис. 3).

Величина идеального источника напряжения определяется напряжением холостого хода.

На рис. 3 использованы: $R_{ТП} = 2,26$ Ом, $L_{ТП} = 0,0236$ Гн, что соответствует полному сопротивлению $Z_{ТП} = (2,26 + j7,41)$ Ом. Численные значения эквивалентных сопротивлений тяговой подстанции взяты из работы [18].

Моделирование участка контактной сети между двумя подстанциями с учётом электровоза на первом пролёте. Расстояние между двумя опорами контактной сети (пролёт) в рассматриваемом случае составляет величину, незначительно превышающую 66 м, а расстояние между тяговыми подстанциями переменного тока находится в пределах 40...60 км. Первый пролёт контактной сети (КС), ближайший к тяговой подстанции, представлялся подробной поэлементной электрической схемой, а участки остальной части КС, в предположении их каскадного соединения, моделировались по простейшей схеме (см. рис. 4).

Здесь полное сопротивление остальной части КС (без первого пролёта): $Z_{КС} = 0,0163e^{j69^\circ} = (0,0059 + j0,0152)$ Ом, а полное сопротивление рельсовой цепи этой части КС равнялось $Z_p = 0,0267e^{j65^\circ} = (0,0113 + j0,0242)$ Ом.

Расстояние между тяговыми подстанциями было принято равным 750 межпролётным (примерно 50 км), тогда расчётная схема для случая, когда электровоз находится в конце первого пролёта, выглядит следующим образом (см. рис. 5).

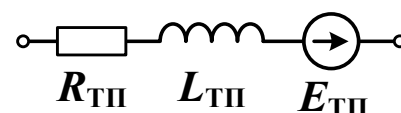


Рис. 3. Эквивалентная схема тяговой подстанции

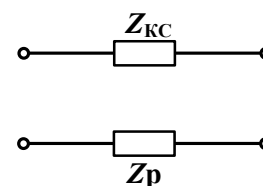


Рис. 4. Эквивалентная схема контактной сети без первого пролёта

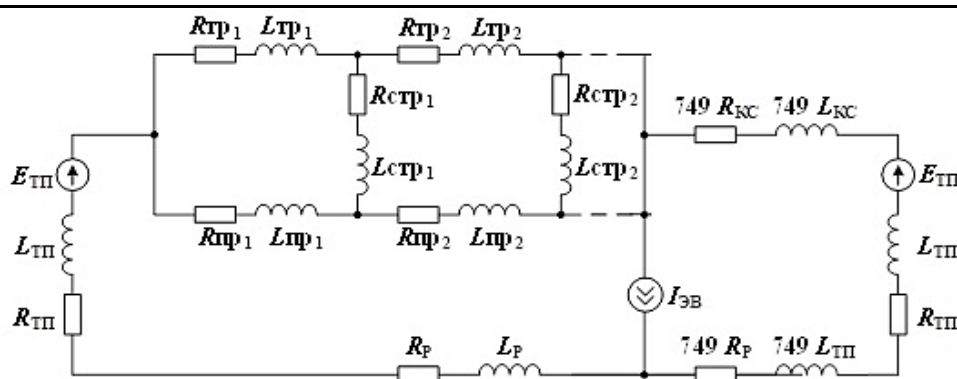


Рис. 5. Расчётная схема контактной сети с учётом электровоза

На рис. 5: $R_{К} = 0,0059 \text{ Ом}$; $L_{К} = \frac{0,0152}{314} = 0,484 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$; $R_{П} = 0,0113 \text{ Ом}$;
 $L_{П} = \frac{0,0242}{314} = 0,771 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$; $R_{ТП} = 2,26 \text{ Ом}$; $L_{ТП} = 0,0236 \text{ Гн}$; $E_{ТП} = 27\,500 \cdot \sqrt{2} \text{ В}$;
 $749 \cdot R_{К} = 4,419 \text{ Ом}$; $749 \cdot L_{К} = 3,626 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$; $749 \cdot R_{П} = 8,4637 \text{ Ом}$;
 $749 \cdot L_{П} = 5,775 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$.

Результаты расчёта токов в показанной на рис. 5 схеме приведены в табл. 4. Токи электровоза $I_{ЭВ}$ задавались как исходные данные.

Таблица 4

Значение токов

$I_{ЭВ}, \text{ А}$	$I_{НТ1}, \text{ А}$	$I_{КП1}, \text{ А}$	$I_{стр1}, \text{ А}$	$I_{ТП1}, \text{ А}$	$I_{ТП2}, \text{ А}$
200	63,53	108,42	2,76	167,43	32,689
500	158,83	271,06	6,7044	418,57	81,723
800	254,13	433,69	11,047	669,71	130,76

В табл. 4 использованы следующие обозначения: $I_{НТ1}$, $I_{КП1}$, $I_{стр1}$ – соответственно ток в несущем тресе, контактом проводе и струне (ближайшие к тяговой подстанции элементы); $I_{ТП1}$ – ток в тяговой подстанции № 1; $I_{ТП2}$ – ток в тяговой подстанции № 2.

Если учесть активно-индуктивный характер параметров тягового двигателя электровоза ($L = 30 \text{ мГн}$, $R = 0,1 \text{ Ом}$), то будет наблюдаться увеличение потребляемого тока электровозом (см. табл. 5) и соответствующее повышение токов во всех токопроводящих элементах подвески.

Таблица 5

Значения токов с учётом активно-индуктивного характера параметров тягового двигателя электровоза

$I_{ЭВ}, \text{ А}$	$I_{НТ1}, \text{ А}$	$I_{КП1}, \text{ А}$	$I_{стр1}, \text{ А}$	$I_{ТП1}, \text{ А}$	$I_{ТП2}, \text{ А}$
1743,1	553,7	944,95	27,07	1459,2	284,9

Расчёт величины наводимой ЭДС в бортовой катушке. Расчёты проводились для реального БПЛА – FREEFLY ALTA 8 (ALTA 6 & 8 Multi-Rotor Drones), у которого максимальное напряжение литий-ионной АКБ (ALTA Flight Battery Pack from FREEFLY, ёмкость – 10 А·ч) составляет 25,2 В.

На БПЛА была установлена круговая электрическая обмотка (КЭО) диаметром (по среднему витку) 0,8 м с числом витков 3880.

Данные проводов подвески, использованные в расчётах, приведены в табл. 1. При расчётах учитывалось исполнение КП по схеме «зигзаг», НТ предполагался прямолинейным.

Эскиз схемы расчёта представлен на рис. 6 и 7 (все размеры даны в миллиметрах). В рассматриваемом случае КЭО располагалась в горизонтальной плоскости, лежащей между НТ и КП, и была смещена в сторону относительно оси последнего.

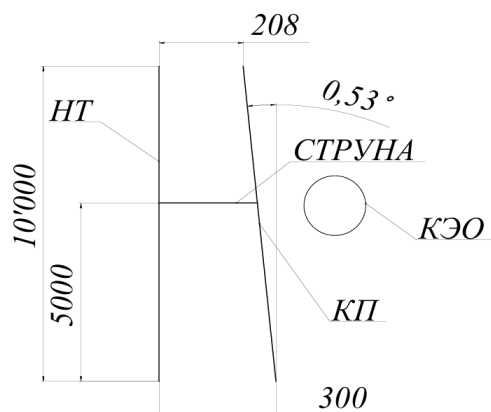


Рис. 6. Схема расчёта участка контактной подвески (вид сверху)

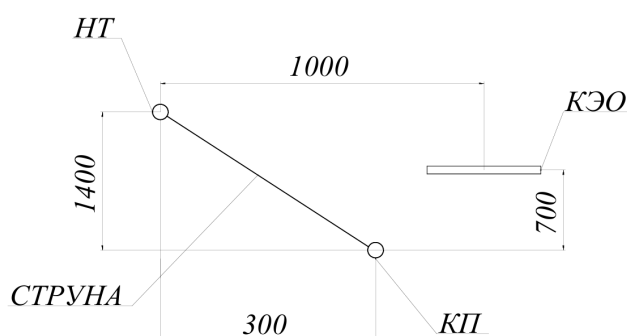


Рис. 7. Схема расчёта участка контактной подвески (вид спереди)

Моделирование осуществлялось с помощью программы COMSOL Multiphysics® 6.0.

На рис. 8 приведена картина магнитного поля контактной подвески в поперечной плоскости.

Горизонтальный прямоугольный указатель в левой части рис. 8 схематично обозначает КЭО.

Следует отметить, что ток, протекающий в струне, в силу своей малости (его величина более чем в 20 раз меньше величины тока в несущем тросе и более чем в 45 раз меньше величины тока контактного провода) незначительно влияет на картину результирующего магнитного поля.

На рис. 9 приведены результаты расчётов для случая $I_{ЭВ} = 500$ А (см. табл. 4).

Можно видеть, что действующее значение наводимой ЭДС составляет величину порядка 35 В, что свидетельствует о возможности подзарядки бортовой АКБ.

Также был рассмотрен случай, когда КЭО находится в одной горизонтальной плоскости с несущим тросом. При таком расположении КЭО (на рисунке КЭО находится справа от НТ) воздействия на БПЛА воздушных потоков, возбуждённых пантографным токоприёмником движущегося электроподвижного состава, незначительны, также полёт БПЛА может осуществляться по прямой траектории на фиксированном расстоянии от прямолинейного НТ, что значительно упрощает управление полётом аппарата. Как и в предыдущем случае, ток в НТ принимался равным 158,83 А (см. табл. 4).

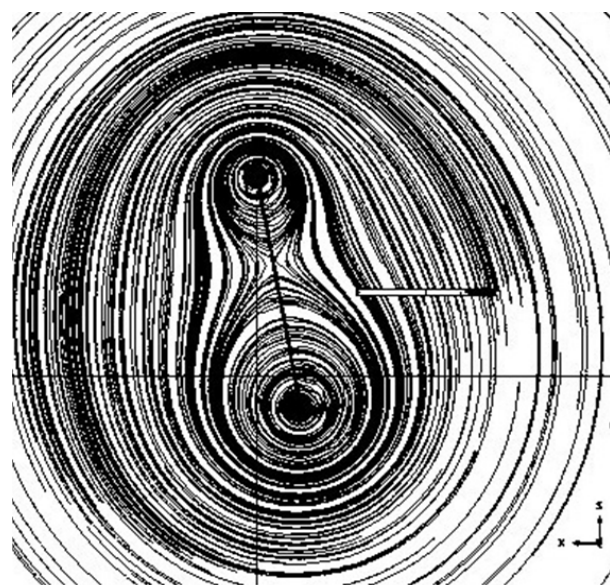
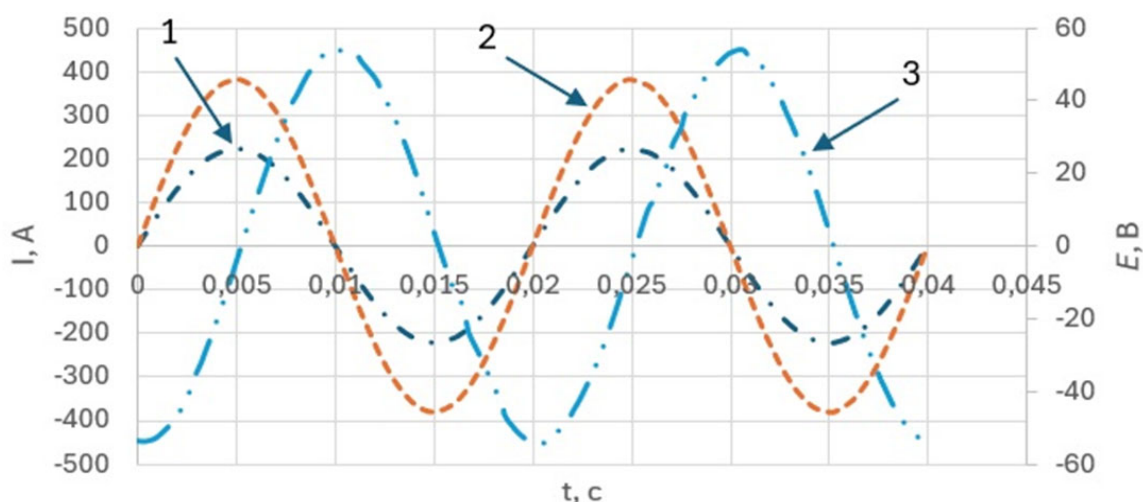


Рис. 8. Картина магнитного поля в поперечной плоскости (момент времени 0,015с)



1 – временная зависимость тока в несущем проводе; 2 – временная зависимость тока в контактном проводе; 3 – временная зависимость ЭДС круговой электрической обмотки
Рис. 9. Временные зависимости токов в элементах подвески и ЭДС круговой электрической обмотки

Расчёты проводились при разной величине бокового смещения КЭО относительно продольной оси несущего троса. Результаты расчётов представлены на рис. 10. Можно видеть, что в диапазоне бокового смещения КЭО от 0,1 м до 0,5 м подзаряд бортовой АКБ может быть успешно осуществлён.

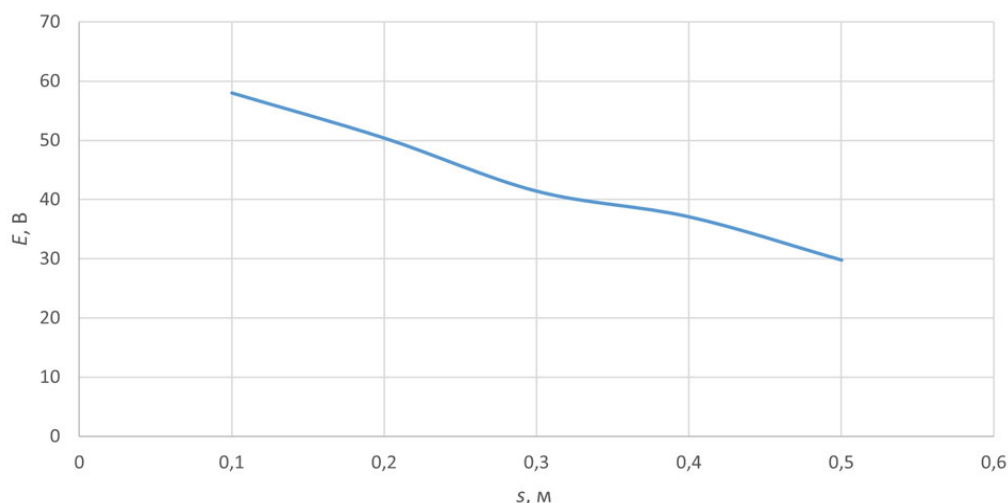


Рис. 10. Зависимость действующего значения наводимой ЭДС от величины бокового смещения круговой электрической обмотки от продольной оси несущего троса

Экспериментальный стенд и первые результаты. На кафедре «Теоретические основы электротехники и энергетики» ФГБОУ ВО ПГУПС был разработан и создан вращающийся стенд контактного провода барабанного типа (см. рис. 11). Стенд позволял проводить исследования процесса подзаряда КЭО при её различных положениях относительно КП, выполненного по схеме «зигзаг», в диапазоне скоростей 0...35 м/с. Использовалась обращённая конструкция, а именно: барабан с КП вращался, а КЭО была неподвижна, что значительно упростило процесс измерения наведённой ЭДС.

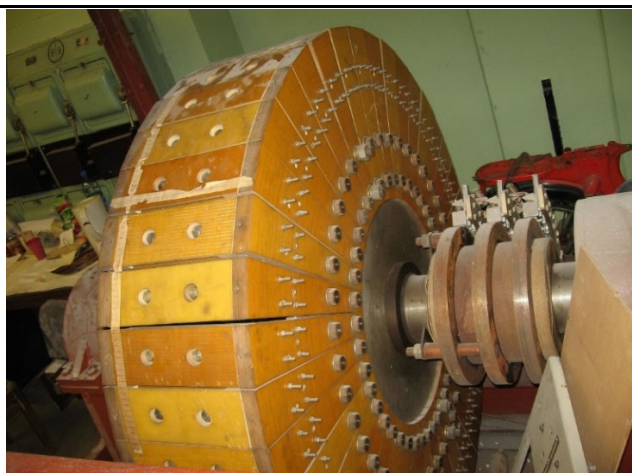


Рис. 11. Барабан с узлом скользящего токосъёма

Схема стенда представлена на рис. 12. Контактный провод 1 жёстко закреплён на ободе стеклотекстолитового барабана 2 с помощью диэлектрических болтов 3. Для заведения тока в КП использовался узел скользящего токосъёма 4, подобно системам возбуждения синхронных машин.

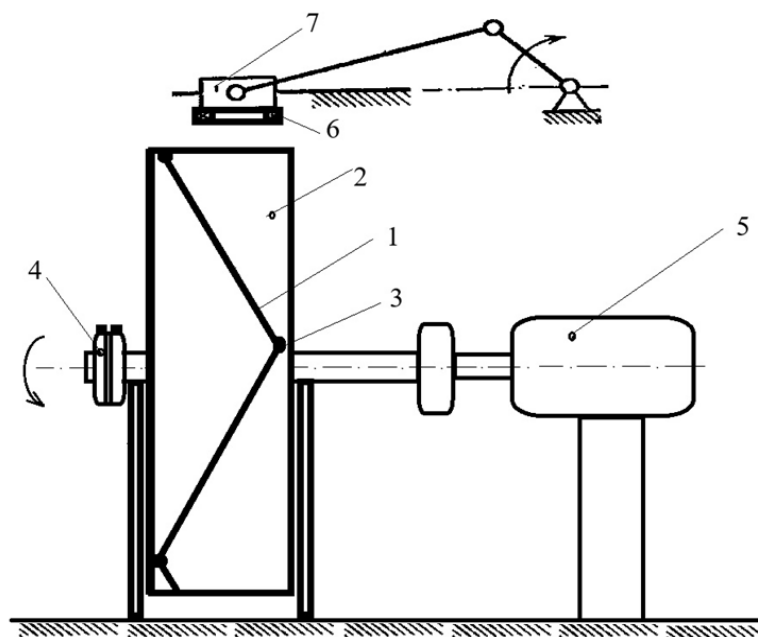
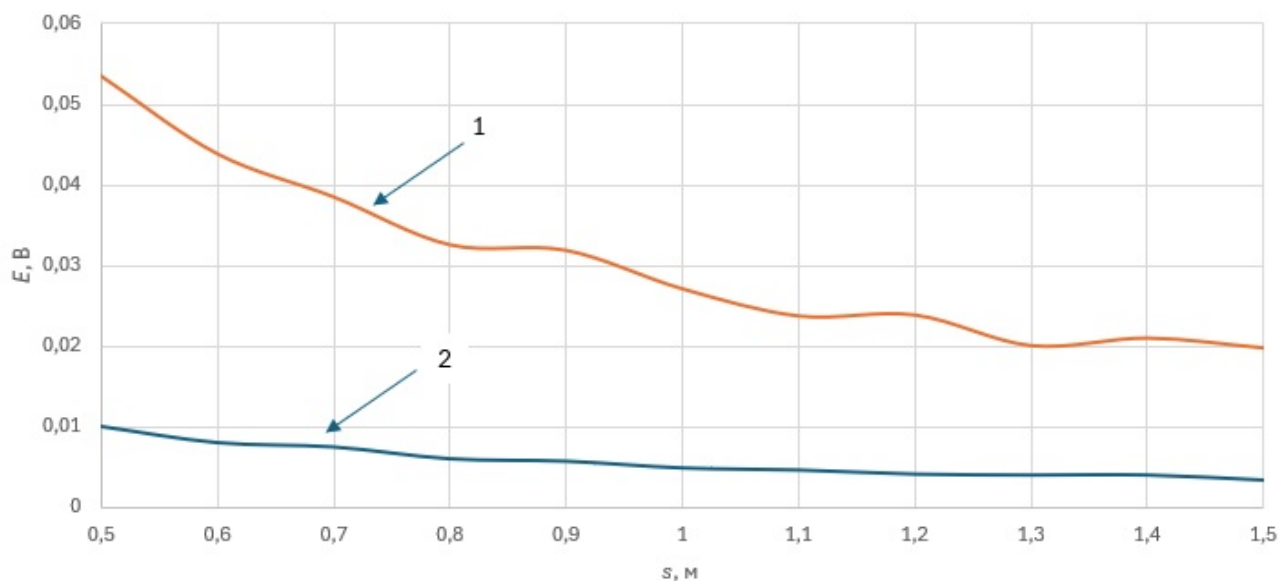


Рис. 12. Схема стенда

Барабан 2 вращался двигателем 5 постоянного тока П72 с якорным управлением частотой вращения. Ток в КП заводился через узел скользящего токосъёма 4 от внешнего источника переменного тока, нагрузкой служил реостат.

Испытывались два варианта исполнения КЭО 6: 1) диаметр по среднему витку – 90 мм, число витков – 600; 2) диаметр по среднему витку – 320 мм, число витков – 300; обмотка была закреплена на конце ползуна 7 кривошипно-ползунного механизма и могла имитировать движение в поперечной плоскости относительно КП1. Напряжение на выводах КЭО измерялось с помощью осциллографа DS 1052E.

Были сняты зависимости наведённой ЭДС в КЭО от поперечного смещения КЭО от КП. На рис. 13 показаны результаты измерений ЭДС при токе 15 А (50 Гц) в КП.



1 – число витков 300, 2 – число витков 600

Рис. 13. Зависимость наводимой ЭДС от поперечного смещения круговой электрической обмотки относительно контактного провода

Можно видеть, что величина наводимой ЭДС в КЭО в более сильной степени зависит от поперечного смещения КЭО относительно КП при больших числах витков КЭО, причём характер зависимости отличен от линейного.

Сравнение результатов, полученных на математической модели в программе COMSOL, описанной в [20], с экспериментальными данными показало расхождение менее 5 %.

Эксперимент также подтвердил вывод, сделанный на основе математического моделирования и опубликованный в [21–22]: движение КЭО вдоль КП не приводит к сколько-нибудь заметному увеличению ЭДС, индуцированной в КЭО. Так, при скорости вращения барабана стенда 30 м/с и неподвижной КЭО относительно барабана величина индуцированной ЭДС составила 105,04 % ЭДС, полученной при заторможенном барабане.

Выводы:

1. Результаты моделирования цепной контактной сети переменного тока напряжения 27,5 кВ показали, что токи в её элементах в установившихся процессах имеют величины, достаточные для реализации бесконтактного подзаряда бортовой АКБ во время полёта БПЛА.

2. Определено, что для подзаряда бортовой АКБ полёт БПЛА можно реализовывать по траектории, лежащей в плоскости, находящейся между несущим тросом и контактным проводом, однако с позиции обеспечения безопасности полёта БПЛА и упрощения управления аппаратом более приемлемым является полёт БПЛА в горизонтальной плоскости, в которой находится прямолинейный несущий трос.

3. Использование КЭО с бóльшим числом витков налагает более строгие требования по соблюдению полёта БПЛА по заданной траектории в свете получения требуемого значения зарядного напряжения.

4. Эксперименты подтвердили, что продольное движение КЭО относительно токоведущих элементов контактной подвески незначительно влияет на величину индуцированной ЭДС, вследствие этого подзаряд бортовой АКБ целесообразно осуществлять при «зависании» БПЛА рядом с токоведущим элементом контактной подвески.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коршуненко, М. В. Повышение длительности полёта БПЛА за счёт улучшения эксплуатационных показателей / М. В. Коршуненко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – № 12. – С. 862-863.
2. Воронов, С. В. Разработка алгоритмов и программных средств управления беспилотным летательным аппаратом / С. В. Воронов, В. Е. Дементьев, С. С. Логинов // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 сентября 2014 г., Казань, Россия): труды конференции. В 3 т. Т. 3. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – С. 249-255.
3. Артемьева, А. О. Аккумулятор нового поколения для БПЛА на службе МЧС / А. О. Артемьева, Е. П. Вялова // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Безопасный город: материалы XI научно-практической конф., посвящённой 25-летию МЧС России. Воронеж, 30 окт. 2015 г. В 2 т. Т. 2. – Воронеж: Воронежский гос. техн. ун-т, 2016. – С. 107-110.
4. Сергеев, И. А. Беспилотные летательные аппараты с водородными топливными элементами / И. А. Сергеев // Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли: все-рос. науч.-практ. конф. с международ. участием. Казань, 8-10 авг. 2018 г. – Казань: Казанский гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева, 2018. – С. 75-77.
5. Чурляева, К. Д. Обоснование эффективности использования гибридной ветро-солнечной системы источников энергии для подзарядки квадрокоптеров / К. Д. Чурляева, С. Ф. Степанов, О. Н. Чурляева // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII межд. науч.-практ. конф., Саратов, 1-30 апр. 2017 г. – Саратов: ООО «ЦеСАин», 2017. – С. 284-286.
6. Чурляева, К. Д. Мониторинг воздушных линий электропередач с помощью беспилотных летательных аппаратов. Разработка автономной наземной станции для подзарядки квадрокоптеров / К. Д. Чурляева, О. Н. Чурляева, С. Ф. Степанов // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VII межд. науч.-практ. конф., Саратов, 18 апр. 2016 г. – Саратов: ООО «Центр социальных агроинноваций СГАУ», 2016. – С. 251-252.
7. Комбинированные наземные автономные зарядные станции общего пользования с ветро-солнечными источниками энергии для мультикоптеров / С. Ф. Степанов, И. И. Артюхов, Д. И. Артюхов, И. Н. Яценко, О. Н. Чурляева // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VI межд. науч.-практ. конф., Саратов, 2015 г. – Саратов: ООО «ЦеСАин», 2015. – С. 269-274.
8. Оптимизация энергодинамических процессов в системе управления приводом стабилизации полёта беспилотного летательного аппарата / Ю. А. Денисов, О. Л. Шаповалов, О. В. Середа, Е. В. Куц // Технические науки и технологии. – 2018. – № 3 (13). – С. 187-195.
9. Патент № 2791914 Российская Федерация, МПК В64С 39/02 (2006.01), G01R 31/08 (2006.01). Беспилотный летательный аппарат для диагностики высоковольтных установок: № 2022129097: заявл. 08.11.2022; опубл. 14.03.2023 / Ким К. К., Панычев А. Ю.; заявитель ПГУПС. – 4 с.
10. Патент № 2801404 Российская Федерация, МПК В64С 27/08 (2006.01), В64С 39/02 (2006.01), В64U 10/10 (2023.01), В60L 53/20 (2019.01). Беспилотный летательный аппарат: № 2023102286: заявл. 01.02.2023; опубл. 08.08.2023 / Ким К. К., Панычев А. Ю.; заявитель ПГУПС. – 4 с.
11. Евразийский патент № 042897, В64С 27/08 (2006.01.01), В64С 39/02 (2006.01.01), H02J 7/02 (2016.01.01), H02J 50/10 (2016.01.01). Беспилотный летательный комплекс: № 202000255: заявл. 30.06.2020; опубл. 31.03.2023 / Ким К. К.; заявитель ФГБОУ ВО ПГУПС. – 5 с.
12. Ким, К. К. Беспилотные электрические летательные аппараты и комплексы для мониторинга на железнодорожном транспорте / К. К. Ким, Е. Б. Королёва, А. А. Ткачук // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2024. – № 6. – С. 44-51.
13. Kim, K. K. Unmanned aerial vehicle for monitoring transport infrastructure / K. K. Kim, E. B. Koroleva, A. S. Vataev, A. A. Tkachuk, D. Ya. Monastyrsky // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 549. – P. 02015. – DOI: 10.1051/e3sconf/202454902015.
14. Кудряшов, Е. В. Механические расчёты контактных подвесок на основе статических конечно-элементных моделей / Е. В. Кудряшов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3 (24). – С. 258-269.
15. Проектирование электромеханического привода беспилотного летательного аппарата / М. А. Ефремов, А. А. Ткачук, Д. Я. Монастырский, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № III (75). – С. 82-92.
16. Калантаров, П. Л. Расчёт индуктивностей / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1986. – 488 с.



17. Терлецкий, С. Г. Этапы имитационного моделирования системы тягового электроснабжения / С. Г. Терлецкий, А. Р. Мамаев // Научные достижения и открытия 2020: сб. ст. XIII Междунар. науч.-исслед. конкурса, Пенза, 25 янв. 2020 г. – Пенза: Наука и просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2020. – С. 46-51.
18. Шаманов, В. И. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 196-203.
19. Смолин, П. И. Исследование модели растекания тока по рельсовым нитям на безбалластном пути в системе тягового электроснабжения / П. И. Смолин, И. А. Ребров // Железная дорога: путь в будущее: сб. матер. I Междунар. науч. конф. аспирантов и молодых учёных, Москва, 28-29 апр. 2022 г. – М.: ВНИИЖТ, 2022. – С. 176-182.
20. Математическое моделирование бесконтактного процесса подзаряда аккумуляторной батареи мультикоптера от внешнего электромагнитного поля / К. К. Ким, Е. Б. Королёва, А. С. Ватаев, М. В. Михайлов, А. С. Соловьёв // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2024. – № 4 (151). – С. 28-46.
21. Беспилотный летательный аппарат для мониторинга контактной сети переменного тока / К. К. Ким, Е. Б. Королёва, П. К. Рыбин, О. А. Степанская // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 463-476.
22. Беспилотный летательный аппарат для мониторинга контактной сети переменного тока / К. К. Ким, Е. Б. Королёва, П. К. Рыбин, О. А. Степанская // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 10. – № 4. – С. 463-477.

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

Кучерова А. И., Иванкова Е. П., Горькавый М. А.
A. I. Kucherova, E. P. Ivankova, M. A. Gorkavyu

**ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОКРАСКИ ДЕТАЛЕЙ
СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**RESEARCH OF ROBOTIZED PROCESSES FOR PAINTING PARTS OF AVIATION
ASSEMBLY UNITS**

Кучерова Алина Игоревна – аспирант кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: alina@kucherova97.ru.

Alina I. Kucherova – Postgraduate Student, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: alina@kucherova97.ru.

Иванкова Евгения Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jenyvany@mail.ru.

Evgeniya P. Ivankova – PhD in Engineering, Associate Professor, Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jenyvany@mail.ru.

Горькавый Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Mikhail A. Gorkavyu – PhD in Engineering, Head of Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Аннотация. В данной работе исследован технологический процесс роботизированной покраски деталей авиационного производства. Анализ показал, что основная проблема заключается в недостаточной автоматизации и отсутствии формализованных интеграционных связей между подсистемами управления, что снижает согласованность работы и приводит к производственным потерям. Для решения поставленной задачи разработана оригинальная функциональная модель процесса в нотации IDEF0, отражающая этапы управления, подготовки деталей, нанесения лакокрасочных материалов и контроля качества. Моделирование позволило выявить узкие места на этапах позиционирования, подготовки и контроля, определить их влияние на эффективность всего участка и предложить меры по оптимизации. В качестве решений предложены внедрение систем компьютерного зрения, автоматизация подготовительных и контрольных операций, а также разработка цифровых двойников для прогнозирующего управления. Реализация этих мер позволит сократить временные затраты, снизить количество дефектов и повысить производительность роботизированного участка покраски, что имеет важное значение для предприятий авиастроения.

Summary. In this paper, the technological process of robotic painting of aircraft parts is studied. The analysis showed that the main problem lies in the insufficient level of automation and the lack of formalized integration links between subsystems, which reduces coordination and leads to production losses. To address this issue, an original functional model of the painting process was developed using the IDEF0 notation, covering the stages of management, part preparation, application of paints and varnishes, and quality control. The modeling results revealed bottlenecks at the stages of positioning, preparation, and quality control, determined their impact on the overall efficiency of the section, and provided a basis for optimization proposals. As solutions, the implementation of computer vision systems, automation of preparation and control operations, and the development of digital twins for predictive management are proposed. The application of these measures will reduce time costs, minimize defects, and improve the productivity of robotic painting sections, which is especially important for the aircraft manufacturing industry.

Ключевые слова: технологический процесс, роботизированный комплекс, функциональное моделирование, авиастроение, роботизированная покраска, компьютерное зрение, автоматизация производства.



Key words: technological process, robotic complex, functional modeling, aircraft construction, robotic painting, computer vision, automation of production.

Исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счёт средств Российского научного фонда (проект № 25-21-00292).

УДК 658.5.012.1

Введение. Современные требования промышленного производства требуют постоянной модернизации технологических процессов, что невозможно без детального анализа организационно-технической структуры предприятия. Ключевым аспектом такого анализа является понимание технологических процессов, их взаимосвязей и возможных проблемных мест. Однако прямое вмешательство в производство для изучения этих процессов может привести к значительным экономическим и временным потерям. В этой связи актуальным становится применение имитационного моделирования, позволяющего вносить корректировки на этапе проектирования без остановки производства [1]. Одним из наиболее эффективных инструментов для визуализации и анализа производственных процессов является функциональное моделирование, которое наглядно демонстрирует взаимодействие элементов системы и выявляет проблемные зоны [2].

В условиях динамично развивающейся технологической среды требуется постоянное совершенствование автоматизированных систем управления (АСУ). На практике же нередко используются упрощённые математические модели в области роботизированных процессов. Применение упрощённых моделей приводит к ограничению функциональных возможностей АСУ и снижает их эффективность. Причинами такого решения могут быть ресурсные ограничения, высокая сложность реализации комплексных моделей или недостаточная проработанность теоретических оснований. В итоге, несмотря на значительный потенциал повышения производительности и оптимизации процессов, существующие модели не позволяют в полной мере раскрыть возможности АСУ, что негативно отражается на их практической ценности и конкурентоспособности.

Целью данного исследования является разработка функциональной модели технологического процесса роботизированной покраски на авиационном заводе. Объектом исследования выступает участок роботизированной покраски гальванического цеха авиационного предприятия. В рамках работы поставлены следующие задачи:

- анализ организационно-технической системы;
- исследование технологического процесса роботизированной покраски;
- проектирование функциональной модели изучаемого процесса;
- выявление проблемных зон в текущей системе;
- разработка рекомендаций по оптимизации производства.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования механизмов интеграции автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) в производственную инфраструктуру предприятия. Как показал предварительный анализ экспертных данных, полученных на авиационном предприятии, низкое качество механизмов интеграции, а также недостатки в системе технического обслуживания и эксплуатации роботизированных комплексов приводят к задержке реализации технологического процесса на 10 %. Это связано с тем, что изначальное проектирование связей между АСУТП и системами управления производством не учитывало возможные изменения параметров системы в долгосрочной перспективе.

Для решения указанных проблем требуется детальное представление технологического процесса работы роботизированной камеры покраски. Наиболее эффективным способом его визуализации и анализа является функциональное моделирование, которое позволяет не только структурировать информацию о процессе, но и выявить критические точки, требующие оптимизации [4]. Результаты данного исследования могут быть использованы для повышения эффективности работы роботизированного участка и минимизации производственных потерь.

Модель построена в нотации IDEF0 с использованием ПО BPwin, т. к. анализ литературы [3; 7] показал эффективность этого инструмента для моделирования функциональных моделей.

Контекстная диаграмма. На рис. 1 представлена контекстная диаграмма верхнего уровня технологического процесса, которая показывает основные (граничные) информационные потоки и материальные объекты.

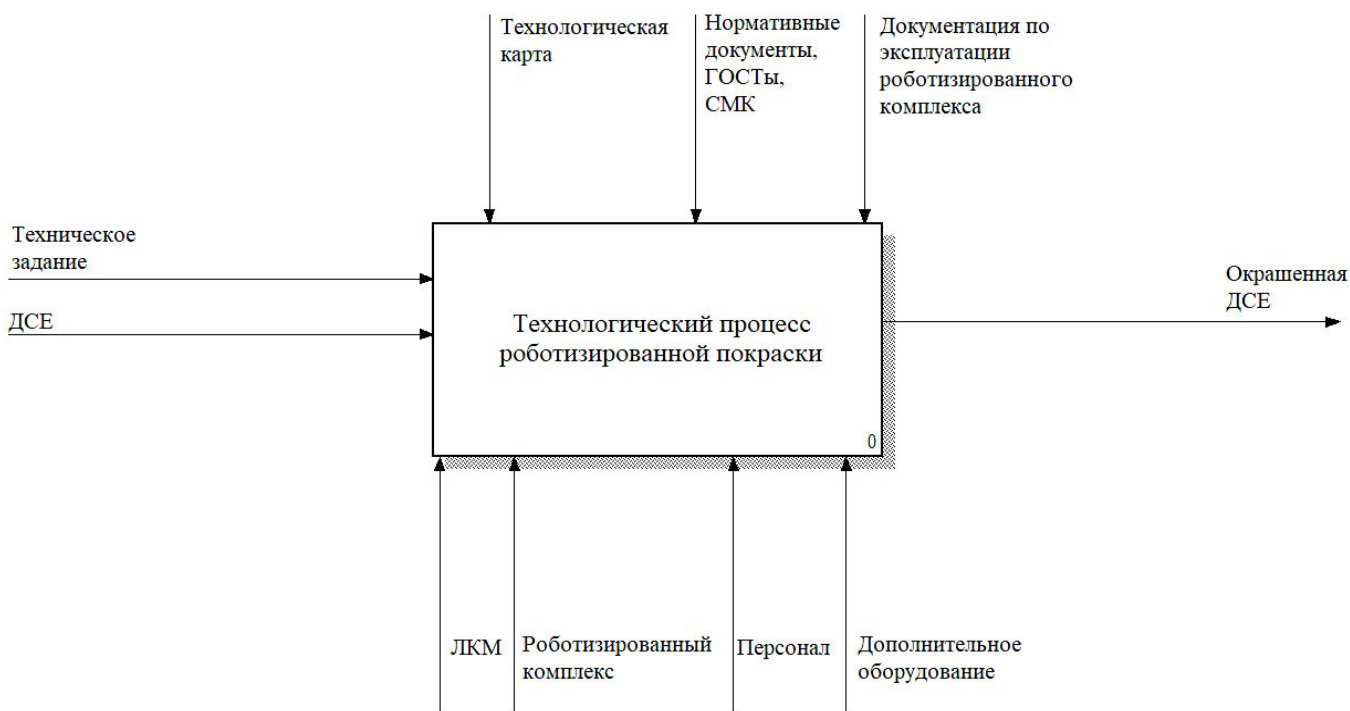


Рис. 1. Контекстная диаграмма технологического процесса роботизированной покраски

Процесс роботизированной покраски заключается в подготовке детали-сборочных единиц (ДСЕ) к окрашиванию, после подготовки ДСЕ покрывают лакокрасочным материалом (ЛКМ), далее просушивают (процесс с нанесением ЛКМ и сушкой может повторяться несколько раз в зависимости от технологии покраски) и проводят контроль качества на наличие дефектов в окрашенной ДСЕ. Результатом технологического процесса является готовая ДСЕ (полностью окрашенная в необходимое количество слоёв, прошедшая этап контроля качества, которая будет транспортирована в дальнейшее производство).

Как видно из диаграммы на рис. 1, для организации технологического процесса роботизированной покраски необходимо получить техническое задание и материальный объект в виде ДСЕ. По завершении процесса роботизированной покраски результатом будет окрашенная ДСЕ. Процесс выполняется с помощью: ЛКМ, роботизированного комплекса, персонала (задействованного в роботизированной покраске) и дополнительного оборудования. Также технологический процесс роботизированной покраски осуществляется с учётом управления в виде технологической карты, документации по эксплуатации роботизированного комплекса и прочих нормативных документов, государственных стандартов (ГОСТ) и системы менеджмента качества (СМК) предприятия.

Декомпозиция контекстной диаграммы представлена на рис. 2.

Ключевыми процессами в роботизированной покраске являются: этап управления (см. рис. 2, блок 1), этап подготовки ДСЕ (см. рис. 2, блок 2) и контроль качества (см. рис. 2, блок 5). Для этого необходимо выполнить их декомпозицию. Декомпозиция подпроцесса «управление» описывает формирование управляющих воздействий для остальных блоков технологического процесса, декомпозиция блока «подготовка ДСЕ» показывает последовательность подготовительных этапов перед обработкой ДСЕ, декомпозиция блока «контроль качества» демонстрирует этапы проверки ДСЕ на наличие или отсутствие брака при окрашивании или просушивании ДСЕ.

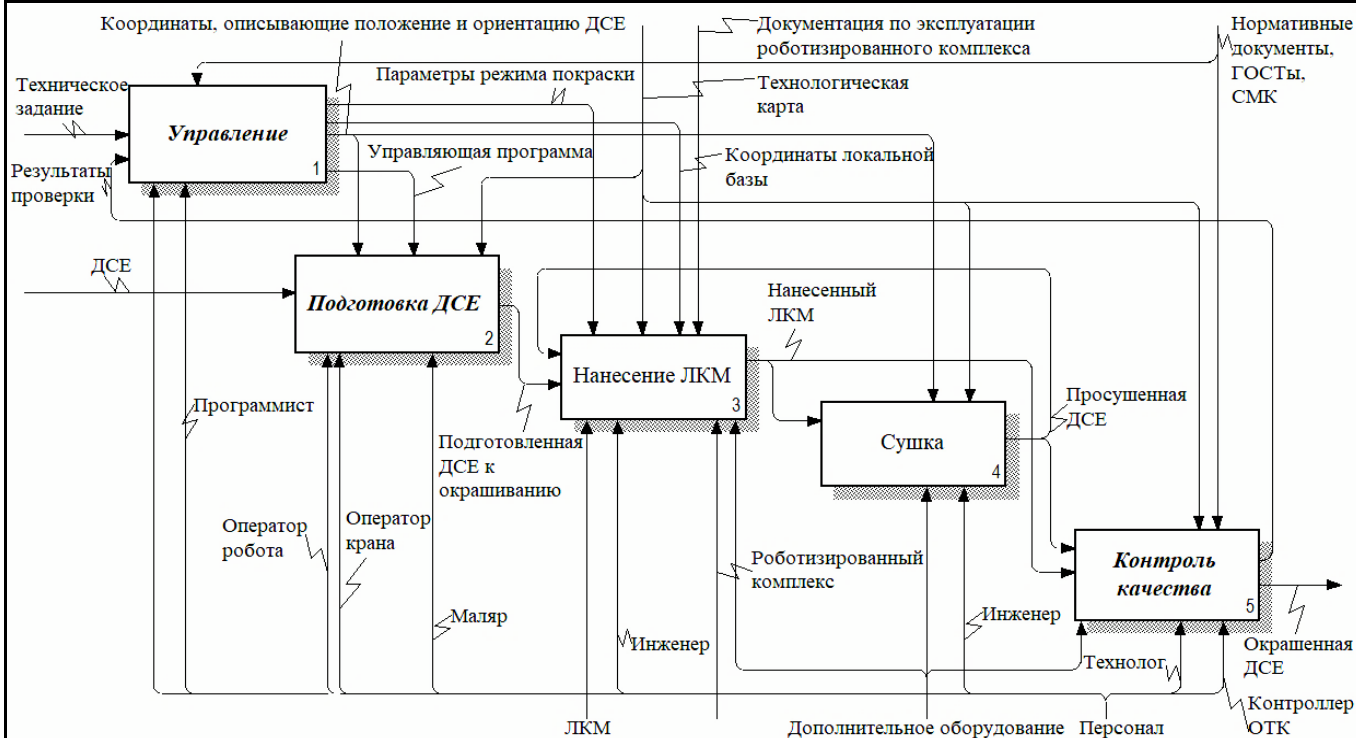


Рис. 2. Диаграмма первого уровня функциональной модели технологического процесса роботизированной покраски

На рис. 2 полужирным курсивом обозначены наименования тех подпроцессов, которые будут декомпозированы и описаны в данном исследовании.

Подпроцесс «Управление». На рис. 3 представлена диаграмма, которая является декомпозицией диаграммы первого уровня либо её дочерней диаграммой. Диаграмма показывает поэтапное формирование управляющих воздействий для процессов диаграммы первого уровня.

Диаграмма показывает этапы подпроцесса, где на основе технического задания оператор проводит идентификацию параметров ДСЕ (см. рис. 3, блок 1), результатом которой является предварительная позиция детали в рабочей зоне. Далее оператор при помощи калибровочного инструмента проводит калибровку локальной базы (см. рис. 3, блок 2), руководствуясь инструкциями по калибровке. Получив результат в виде координат локальной базы (которая будет также необходима в виде управления на родительской диаграмме), оператор определяет позиции и ориентации детали в пространстве (см. рис. 3, блок 3). Оператор передаёт результаты в виде координат, описывающих положение и ориентацию ДСЕ, программисту, который разрабатывает управляющую программу (см. рис. 3, блок 4), руководствуясь инструкциями по работе с программным обеспечением (ПО) и параметрами режима покраски, которые были получены в результате идентификации параметров ДСЕ.

Полученная в результате подпроцесса «Управление» управляющая программа передаётся в виде управления в подпроцесс «Подготовка ДСЕ».

На рис. 4 представлена диаграмма предложений модернизации подпроцесса «Управление».

Анализ выявил недостаточный уровень автоматизации управления, а именно: позиция и ориентация детали в пространстве определяются оператором самостоятельно, и на основе его понимания (знаний) составляется управляющая программа для роботов. Но если добавить систему компьютерного зрения [6; 8] для определения позиции ДСЕ в пространстве, то время на эту операцию сократится, что в дальнейшем приведёт к сокращению времени при написании управляющей программы.

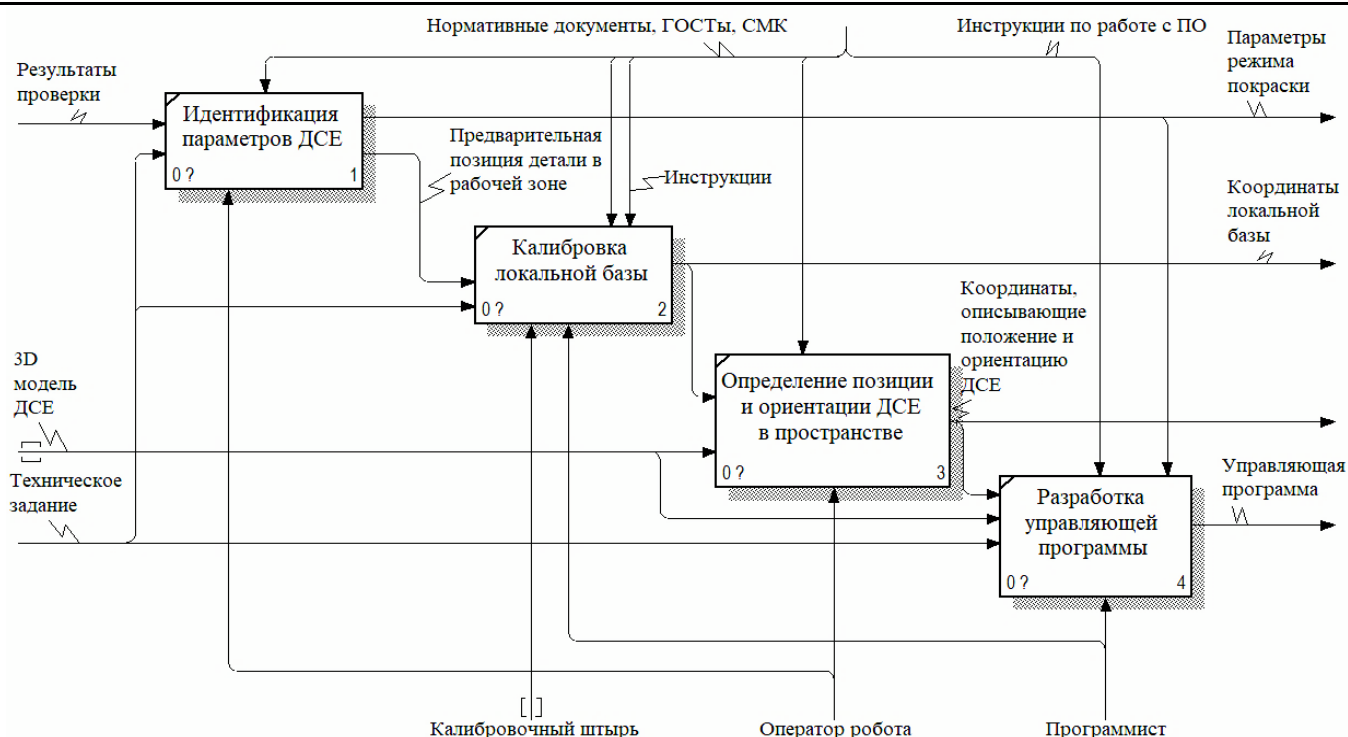


Рис. 3. Диаграмма декомпозиции подпроцесса «Управление»

Для реализации внедрения компьютерного зрения (камер, определяющих точки объекта в реальном времени) необходимо добавить систему диагностики, которая будет передавать полученную информацию с камер в систему управления автоматизированным комплексом.

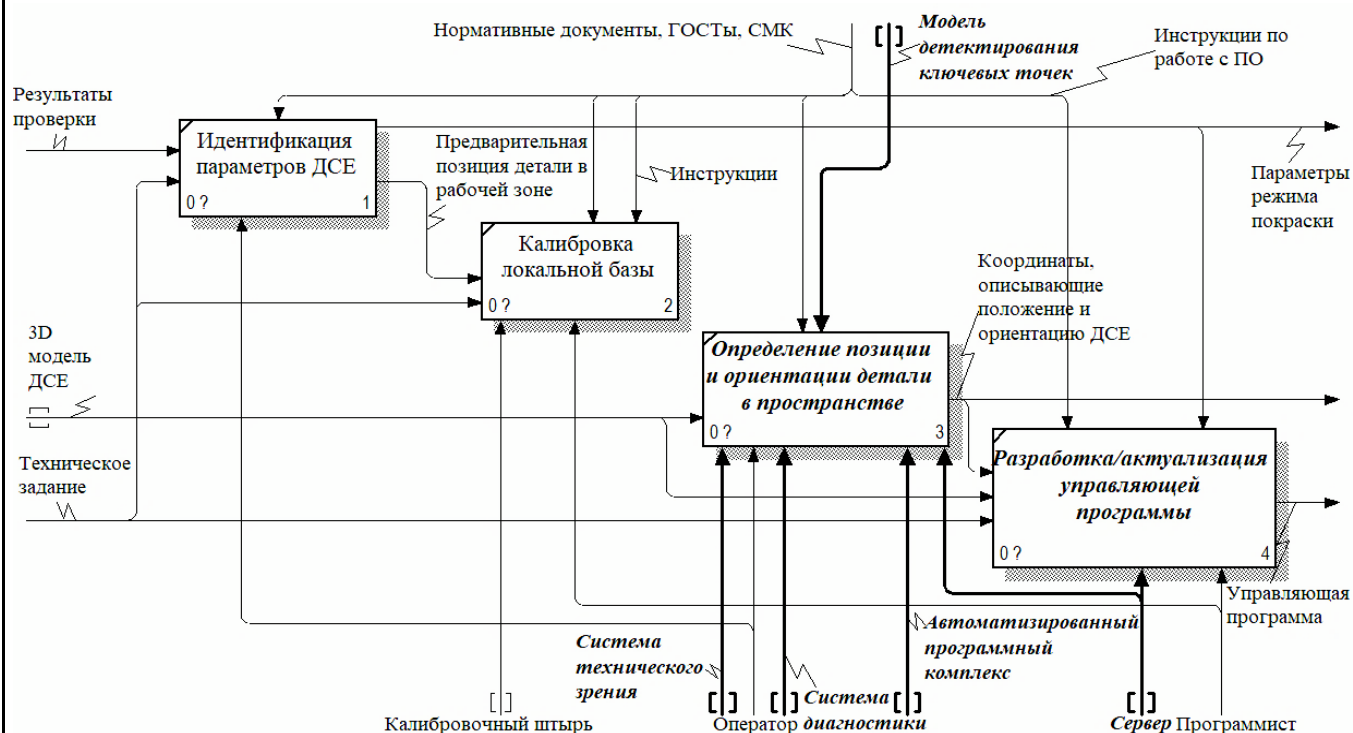


Рис. 4. Диаграмма предложений модернизации подпроцесса «Управление»

На рис. 4 стрелки, имеющие утолщённый размер и наименование, выделенное полужирным курсивом, обозначают механизмы и управляющие воздействия, которые предлагаются для модернизации процесса управления. Блоки, название которых выделено полужирным курсивом, означают, что этапы подвергаются изменениям.

Таким образом, внедрение предложенного автоматизированного оборудования в подпроцесс «Управление» технологического процесса покраски приведёт к сокращению временных ресурсов и освободит персонал от дополнительной работы.

Подпроцесс подготовки ДСЕ. На рис. 5 представлена декомпозиция подпроцесса «Подготовка ДСЕ».

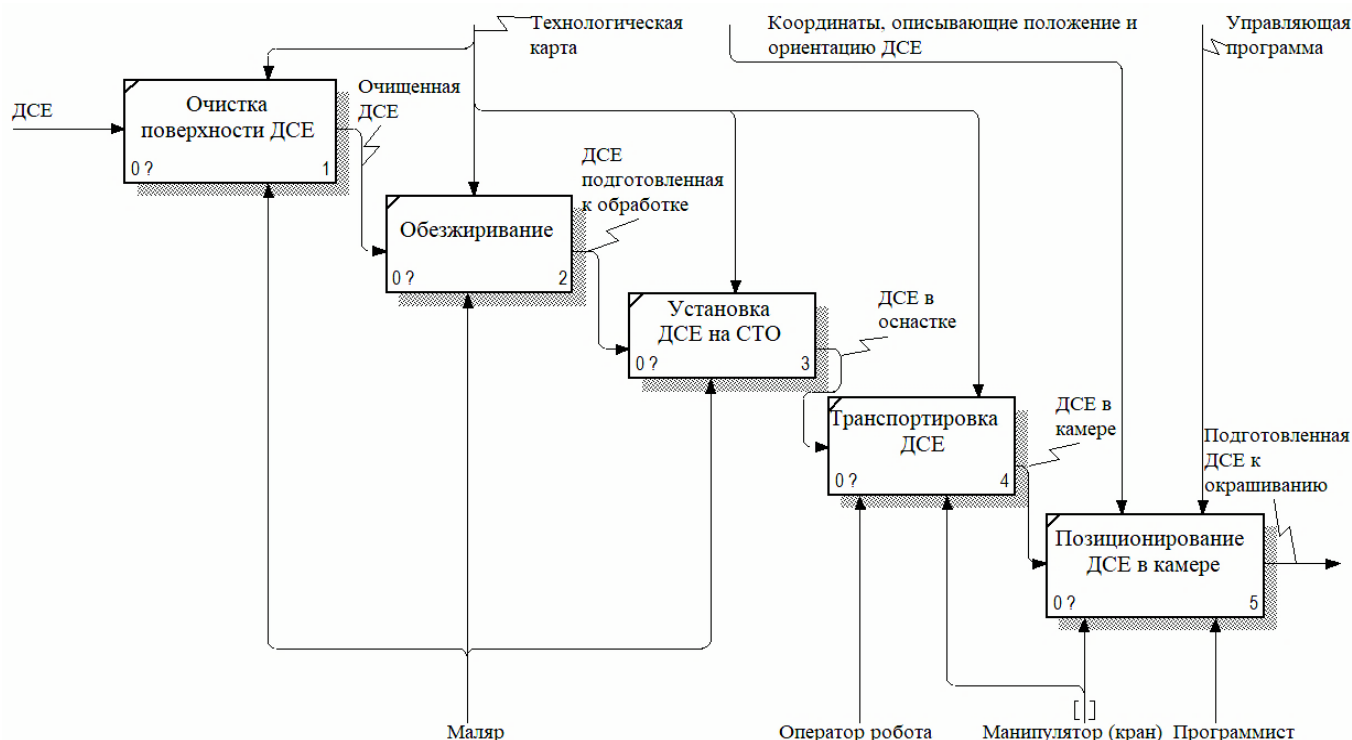


Рис. 5. Диаграмма декомпозиции подпроцесса «Подготовка ДСЕ»

Диаграмма демонстрирует подпроцесс «Подготовка ДСЕ», в котором маляр очищает поверхности ДСЕ (см. рис. 5, блок 1) и проводит её обезжиривание (см. рис. 5, блок 2), после подготовленную к обработке ДСЕ маляр размещает на средство технологического оснащения (СТО) (см. рис. 5, блок 3). Оператор крана транспортирует ДСЕ в камеру покраски (см. рис. 5, блок 4), где программист проводит позиционирование ДСЕ в камере (см. рис. 5, блок 5), руководствуясь координатами, описывающими положение и ориентацию ДСЕ, которые были получены в результате определения позиций и ориентаций ДСЕ в пространстве управляющей программой, написанной на предыдущем этапе технологического процесса.

Результатом данного подпроцесса является подготовленная ДСЕ, которая в следующем подпроцессе «Нанесение ЛКМ» проходит обработку ЛКМ. После ДСЕ попадает в камеру, где нанесённый слой ЛКМ просушивают.

В целях повышения эффективности качества подготовки ДСЕ к роботизированной покраске целесообразно предложить автоматизировать процессы очистки поверхности и обезжиривания ДСЕ. Для этого предлагается:

- разработать алгоритм автоматизированной работы на данном этапе технологического процесса;
- внедрить компьютерное зрение для системы контроля при позиционировании ДСЕ в камере.

Эти предложения позволят снизить риск возникновения дефектов, повысить эффективность технологического подпроцесса подготовки ДСЕ к покраске.

Подпроцесс контроля качества. Подпроцесс «Контроль качества» необходим для обеспечения соответствия лакокрасочного покрытия техническим требованиям. На рис. 6 представлена диаграмма декомпозиции подпроцесса «Контроль качества», в котором рассматриваются такие этапы контроля, как визуальный контроль, измерение толщины покрытия, проверка адгезии, документирование результатов.

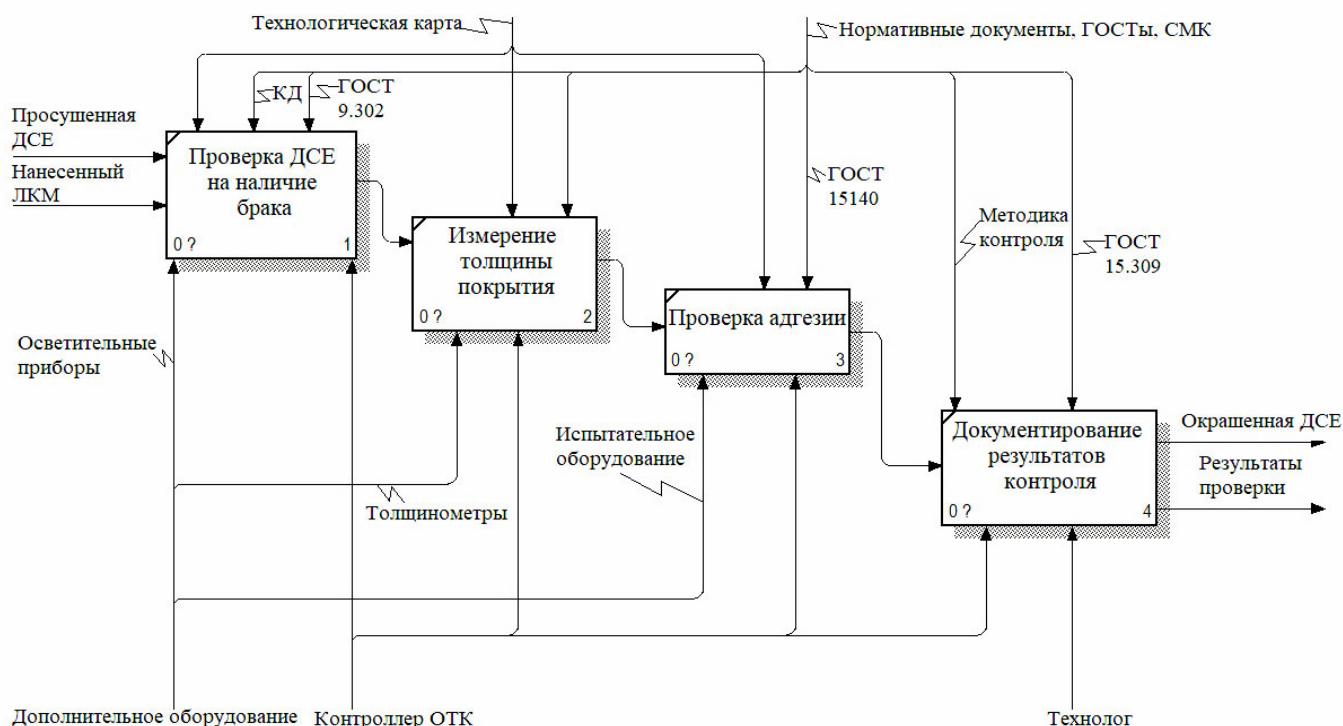


Рис. 6. Функциональная модель подпроцесса «Контроль качества»

Диаграмма демонстрирует подпроцесс контроля качества, который проводится после каждого этапа обработки ДСЕ (покраска каждого слоя, процесс сушки детали). Контролёр отдела технического контроля (ОТК) визуально проверяет ДСЕ на наличие брака (см. рис. 6, блок 1). Измерение толщины покрытия производится контролёром ОТК (см. рис. 6, блок 2) с помощью толщинометров и осветительных приборов, а также проводится проверка адгезии (см. рис. 6, блок 3). В качестве инструкций используются требования, указанные в технологической карте.

Когда ДСЕ прошла все проверки, весь проведённый контроль качества документируют для предоставления отчёта по окрашенной детали. Технолог формирует протокол испытаний, документирует результаты проверки в карту контроля и также составляет акт несоответствия, если на любом этапе проверки выявили несоответствия (см. рис. 6, блок 4).

Результаты проверки отправляются в подпроцесс «Управление», где на основе этих результатов будут формироваться новые параметры ДСЕ для управляющей программы роботизированного комплекса.

Контроль качества осуществляется контролёром ОТК, что указывает на отсутствие автоматизации на данном этапе технологического процесса. Чтобы автоматизировать этап контроля качества ДСЕ, необходимо внедрить компьютерное зрение для обнаружения наличия или отсутствия дефектов. После проведённой покраски ДСЕ деталь транспортируется в сборочный цех.

Участок роботизированной покраски на авиационном заводе представлен в виде камеры покраски, камеры автоматической сушки и отдельного отведённого места, на котором проводится подготовка ДСЕ и контроль качества ДСЕ. Процесс нанесения ЛКМ является роботизированным,



т. к. в нём минимизирована работа человека. Остальные этапы обработки ДСЕ на участке покраски являются ручными.

Заключение. Проведённое исследование подтвердило необходимость комплексной автоматизации технологического процесса роботизированной покраски деталей авиационного назначения. Предложенная авторами оригинальная функциональная модель в нотации IDEF0 позволила выделить три наиболее значимых проблемных подпроцесса: «Управление», «Подготовка деталей» и «Контроль качества». Для каждого из них сформулированы предложения по внедрению инструментов автоматизации, в частности, компьютерного зрения и автоматизированных алгоритмов, направленных на сокращение ручных операций и снижение риска возникновения дефектов.

В соответствии с проведённым аналитическим исследованием предполагается, что реализация предложенных мер обеспечит следующие эффекты:

- повышение согласованности работы подсистем АСУТП;
- снижение доли ручного труда в ключевых подпроцессах;
- сокращение временных затрат и производственных потерь;
- улучшение качества нанесения ЛКМ и повышение стабильности технологического процесса.

Результаты работы создают методическую основу для разработки цифровых двойников роботизированных покрасочных участков, что открывает возможность перехода к управлению по прогнозу и оптимизации параметров технологического процесса в реальном времени.

Интеграция предложенных решений с существующими АСУТП обеспечит согласованность работы оборудования и снизит риск технологических сбоев. Реализация этих мер не только минимизирует производственные потери, но и повысит качество продукции, что особенно важно для авиастроения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку алгоритмов систем управления технологическими процессами для оптимизации их параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника / М. А. Горькавый, В. П. Егорова, В. А. Соловьев [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 40-46.
2. Заплатников, П. В. Применение нотации IDEF0 для оптимизации бизнес-процессов производственного предприятия / П. В. Заплатников // Вестник науки. – 2020. – Т. 1. – № 6 (27). – С. 158-163.
3. Ковтун, И. И. Функциональное моделирование в процессе оценки степени реализации проектов комплексной автоматизации организационно-технических систем / И. И. Ковтун, Г. С. Романенко, С. А. Селиванов // Информатизация и связь. – 2023. – № 5. – С. 63-69.
4. Матвеев, Д. О. Современные подходы и методы анализа деятельности предприятия / Д. О. Матвеев // Прогрессивная экономика. – 2025. – № 4. – С. 209-218.
5. Чумичкин, А. А. Моделирование автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими системами / А. А. Чумичкин // I-methods. – 2020. – Т. 12. – № 1. – С. 1-14.
6. D. M. Grabar, Y. S. Ivanov and A. S. Gudim, «Determination of Atomic Actions of a Human Operator in a Collaborative Robotic Environment Using LLM», 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025, p. 777-782, doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028473.
7. Moritz Glatt, Patrick Kölsch, Marcel Wagner, Jan Mertes, Jan C. Aurich, Framework for synergetic integration of heterogenous Digital Twins in Manufacturing Systems, Procedia CIRP, Vol. 120, 2023, p. 798-803, ISYSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.078>.
8. Zhiganov, S. V. Investigation of Neural Network Algorithms for Human Movement Prediction Based on LSTM and Transformers / S. V. Zhiganov, Y. S. Ivanov, D. M. Grabar // Doklady Mathematics. – 2023. – Vol. 108, No. S2. – P. S484-S493. – DOI 10.1134/s1064562423701624.
9. ГОСТ 15140-78. Покрытия лакокрасочные. Методы определения адгезии = Paintwork materials. Methods for determination of adhesion: межгосударственный стандарт: издание официальное: утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 18.05.1978 № 1336: взамен ГОСТ 15140-69: дата введения 1979-01-01 / разработан и внесён Министерством химической промышленности. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 6 с.

Черный С. П.
S. P. Cherniy

**ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРОЦЕДУР УПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ**

**APPLICATION OF MULTICASCADE FUZZY SYSTEMS FOR IMPLEMENTING
MANAGEMENT PROCEDURES IN PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL PROCESSES**

Черный Сергей Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepau@knastu.ru.

Sergei P. Cherniy – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepau@knastu.ru.

Аннотация. В материале статьи предложен вариант применения нечётких систем управления к решению задачи регулирования сборочной линии в реальном масштабе времени на основе как информации об отдельной операции, входящей в производственно-технологический процесс, так и информации о функционировании всей технологической линии. В работе проведены анализ существующих способов решения задачи управления и перебалансировка сборочных линий в условиях действия различных критериев и их применения на различных уровнях производственного процесса. С учётом недостатков, характерных для классических форм организации таких систем, предложена обобщённая модель нечёткой многокаскадной системы управления сборочной линией. Интеллектуальная система управления производственно-технологическим процессом реализуется на основе иерархического каскадного построения нечёткого логического регулятора двойной вложенности, в котором элементарные модули внутреннего каскада формируют управляющие воздействия для отдельной операции цикла технологического процесса, а внешний каскад определяет процедуры регулирования с учётом информации на основании всех процессов, протекающих в системе. Предложенная форма организации интеллектуальной системы, базирующейся на моделях многокаскадного нечёткого логического управления, позволит упростить реализацию концепции «Индустрия 4.0» при формировании процессов управления гибких производственных и робототехнических систем.

Summary. The article offers a variant of applying fuzzy control systems to solving the problem of controlling an assembly line in real time based on both information about a single operation included in the production and technological process and information about the functioning of the entire production line. The paper analyzes the existing methods for solving the problem of control and calibration of assembly lines under the conditions of various criteria and their application at various levels of the production process. Taking into account the disadvantages typical of classical forms of organization of such systems, a generalized model of a fuzzy multistage assembly line control system is proposed. The intelligent control system for the production and technological process is implemented on the basis of a hierarchical cascade construction of a fuzzy logical controller with double nesting in which the elementary modules of the internal cascade form control actions for a separate operation of the technological process cycle, and the external cascade defines control procedures based on information, taking into account all processes occurring in the system. The proposed form of organization of an intelligent system based on models of multi-stage fuzzy logical control will simplify the implementation of the «Industry 4.0» concept in the implementation of control processes for flexible production and robotic systems.

Ключевые слова: многокаскадный нечёткий регулятор, системы управления производственно-технологическими процессами, дискретно-событийная модель.

Key words: multi-stage fuzzy controller, production and technological process control systems, discrete event model.

Исследования проводились в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024-2026 годы по теме «Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники».



УДК 681.5.01:658.5

Введение. Интенсификация современного производства, а также изменение требований к квалификации персонала в условиях современного гибкого автоматизированного и роботизированного производств диктуют применение альтернативных подходов к организации технологий и стратегий управления. Применение методов искусственного интеллекта к реализации управляющих процедур для локальных систем управления на текущем этапе представляет собой задачу, решаемую весьма успешно и независимо от выбранных подходов и особенностей их применения. В условиях перехода к концепции Индустрии 4.0 актуальным становится решение задач управления для объектов более высоких классов в иерархической структуре, например для производственно-технологических процессов. Такие процессы упрощённо можно охарактеризовать как объекты управления, обладающие существенным количеством координат, функционирующие в условиях действия некоторого набора критериев (зачастую формулируемых лингвистически в виде набора логико-трансформационных правил) и существующие в условиях вложенности ряда технологических операций.

На текущий момент множество производственных и технологических процессов с точки зрения их реализации и формирования стратегий и процедур управления развиваются в сторону роботизации. Кроме того, применение робототехнических систем постепенно распространяется от массового производства к выполнению достаточно точных и уникальных операций в ходе ряда операций в производственных системах [1–3]. К таким процессам можно отнести роботизацию нанесения различных покрытий, сборки крупных элементов (сварка, клёпка, позиционирование на стапелях) в авиастроительной и судостроительной отраслях производства.

Классические подходы к реализации алгоритмов управления производственными процессами связаны с выявлением и анализом узких мест операций, оказывающих существенное влияние на производительность технологического оборудования и составляющих основные источники потерь [4–6]. Оптимизация производительности выполняется на основе дискретно-событийных моделей, которые могут быть построены на основании таких методик, как метод критического пути, теория ограничений, методы линейного и целочисленного программирования, метод хронометража, метод балансировки, диаграммы Ганта и т. п. К общим недостаткам приведённых методов, помимо значительного объёма данных, обрабатываемых в реальном масштабе времени, можно отнести существенное количество необходимых математических моделей и проведение численных экспериментов.

Кроме того, ряд методов в ходе функционирования системы управления в реальном масштабе времени могут терять свойства информативности и наглядности, что при наличии существенного количества как качественной, так и количественной информации приводит к снижению эффективности принятия решений [4; 7; 21]. Некоторые негативные стороны функционирования таких алгоритмов вообще характерны для большинства АСУП: это высокая инерционность и значительные временные затраты, стабильность объёма производства и предсказуемость спроса, отсутствие контроля влияния внешних факторов и минимальное количество ограничений при формализации взаимосвязанной структуры производственного процесса.

Представленный перечень ограничений определяет необходимость применения альтернативных подходов к реализации стратегий и процедур регулирования в системах управления производственно-технологическими процессами. В таких условиях с учётом динамичности, уникальности объекта регулирования, а также существенной неполноты информации о его функционировании наибольшую эффективность показывают различные методы, основанные на искусственном интеллекте.

Модели и методы. Современные методы оптимизации управления производственными операциями основаны на использовании цифровых технологий, интеллектуальных алгоритмов и адаптивных систем. Эти подходы позволяют преодолеть ограничения классических методов, обеспечивая гибкость, высокую точность и возможность работы в условиях неопределённости. Инновационные методы ориентированы на комплексный анализ данных, прогнозирование и авто-

материализацию принятия решений, что делает их особенно актуальными в условиях цифровизации промышленности и внедрения концепций Индустрии 4.0.

Среди наиболее перспективных современных методов можно выделить следующие: дискретно-событийное моделирование, нечёткие системы управления, методы машинного обучения и анализа больших данных, предиктивное управление и многокритериальная оптимизация. Каждый из этих методов имеет свои особенности, преимущества и ограничения, что позволяет выбирать оптимальные инструменты для конкретных производственных задач [9–13; 22].

Дискретно-событийное моделирование представляет производственный процесс как последовательность событий, каждое из которых изменяет состояние системы (см. рис. 1). Этот метод позволяет точно моделировать логику взаимодействия элементов производства и выявлять скрытые зависимости без вмешательства в реальные процессы. К его достоинствам относятся высокая точность, возможность тестирования изменений до их внедрения и анализ сложных систем [6–8]. Однако дискретно-событийное моделирование требует значительных объёмов данных, регулярной актуализации моделей и может быть вычислительно затратным при высокой детализации процессов.

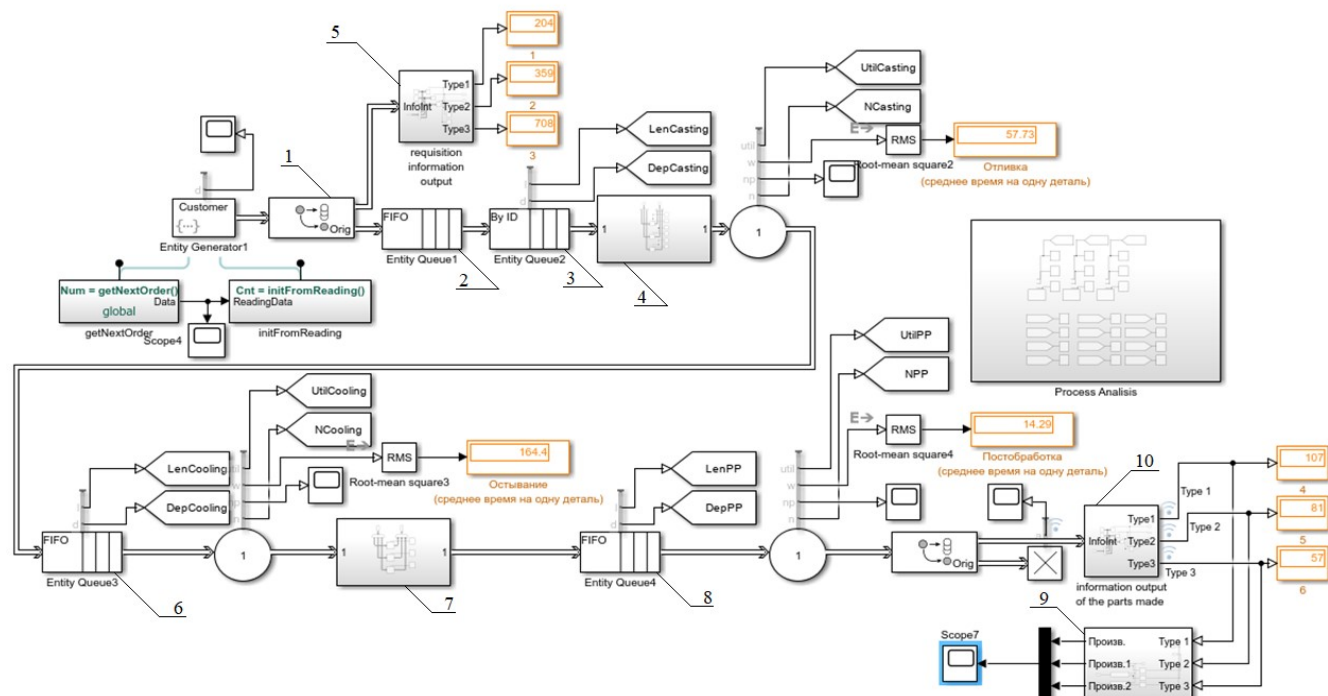


Рис. 1. Дискретно-событийная модель технологического процесса

Представленная на рис. 1 функциональная схема технологического процесса отражает направление следования информационных потоков дискретно-событийной модели и включает в себя следующие компоненты: 1 – блок подготовки входных параметров технологического цикла; 2, 3, 6, 8 – основные технологические операции; 4 – подсистема мониторинга выдачи изделий в результате проведения технологических операций 2 и 3; 5 – подсистема анализа входных данных технологического цикла; 7 – подсистема контроля изъятия оснастки по результатам выполнения технологической операции 6; 9 – подсистема вычисления производительности; 10 – подсистема анализа данных количества произведённых деталей и времени технологического цикла на их производство.

Нечёткие системы управления основаны на принципах мягких вычислений, где используются лингвистические переменные. Эти системы эффективны в условиях неполной или неточной информации, позволяя учитывать экспертные знания и адаптироваться к вариативности входных данных. Их преимущества включают гибкость, устойчивость к недетерминированным внешним и внутренним воздействиям, а также возможность управления слабо формализуемыми процессами.

Вместе с тем эффективность таких систем зависит от корректности правил, а масштабирование усложняется при увеличении числа переменных.

Интеграция представленных подходов позволит эффективно решать задачу управления такими сложными системами, характеризующимися многокоординатностью, многозадачностью, многокритериальностью [7]. На рис. 2 представлен один из возможных вариантов построения модели системы управления с нечёткой логикой.

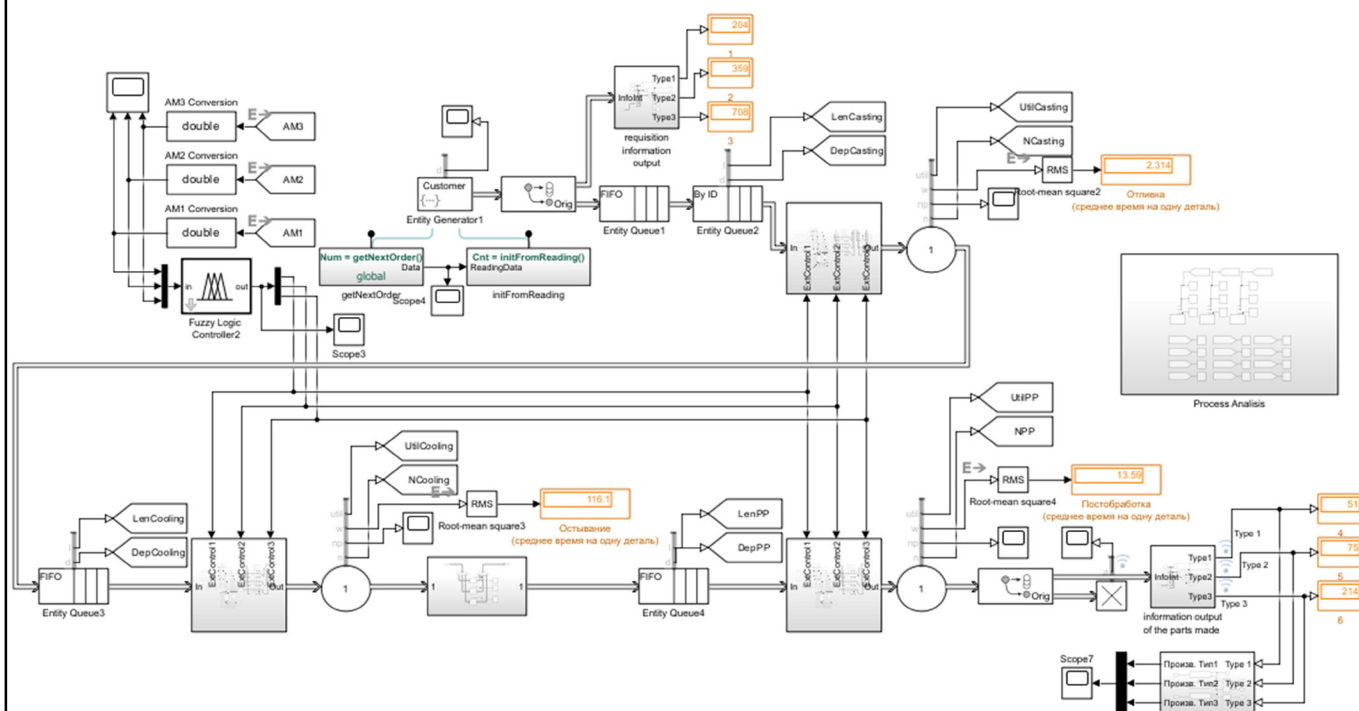


Рис. 2. Дискретно-событийная модель технологического процесса с МНЛР

Некоторые недостатки, присущие нечётким системам, например, количество лингвистических переменных, объём и размерность базы знаний, вид и форма нечётких термов, в сочетании с многокоординатностью, многозадачностью, многокритериальностью могут существенно ограничить область применения традиционных нечётких логических регуляторов (НЛР). При построении интеллектуальных систем управления производственно-технологическими процессами целесообразно применять нечёткие логические регуляторы, реализуемые по каскадному принципу, представленные на рис. 3 [14–17].

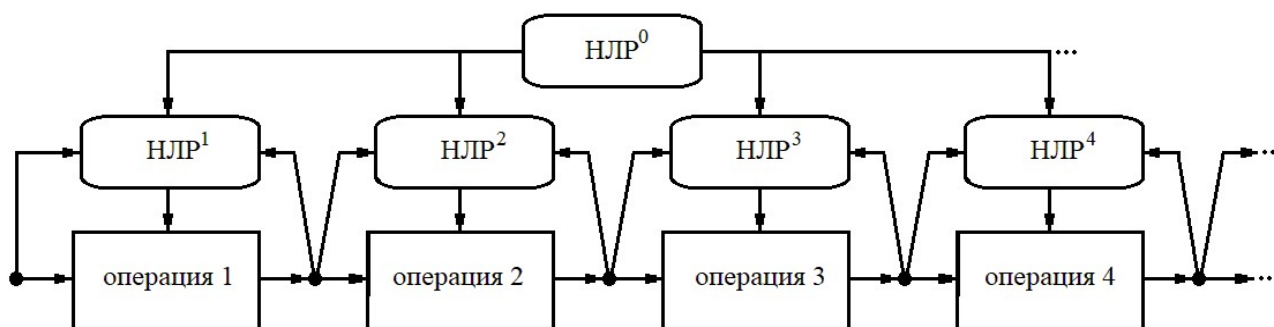


Рис. 3. Многокаскадная нечеткая система управления производственно-технологическим процессом

Производственно-технологическая система (см. рис. 3) состоит из некоторого цикла с набором операций. Формирование управляющих воздействий на каждую отдельную операцию выполняется отдельным элементарным нечётким регулятором НЛР¹...НЛР⁴. В свою очередь, общую стратегию управления производственным циклом выполняет регулятор внешнего каскада НЛР⁰ путём прямого воздействия на вложенные элементы. Гибкость предложенного подхода с учётом сложности формального описания процесса при условии действия множества критериев, детерминированных и недетерминированных воздействий достигается за счёт вариации количества вложенных модулей и вложенности каскадов интеллектуальной системы [18–20].

Результаты и выводы. В условиях многопараметрических производственных систем, включающих множество взаимосвязанных технологических операций, а также при наличии существенных нелинейностей в динамике объекта управления потенциал повышения производительности за счёт применения однокаскадных нечётких регуляторов оказывается ограниченным. Это связано с тем, что подобные устройства в полной мере не учитывают сложные взаимозависимости между множеством входных и выходных переменных. Также усложнение нечёткого логического регулятора однокаскадной структуры и увеличение количества правил нечёткой продукции повышают время вычисления и обработки сигналов, внося дополнительные временные задержки.

Таким образом, несмотря на свою простоту и удобство реализации, однокаскадные нечёткие системы управления демонстрируют снижение эффективности в высоконагруженных производственных линиях, где требуется комплексный учёт множества факторов. В подобных случаях целесообразным представляется переход к более сложным многокаскадным или гибридным системам управления, способным обеспечить более точное регулирование и существенное повышение производительности технологических процессов.

Нечёткое управление используется в различных ситуациях, где типовые методы управления оказываются недостаточно эффективными или неприменимыми из-за неполноты данных об объекте управления. Актуальность подхода связана с необходимостью не только учёта множества взаимосвязанных параметров, но и отсутствия математического описания дискретно-событийных процессов. Это позволяет формализовать управление, повышая его производительность за счёт оптимизации параметров.

Внедрение систем многокаскадного нечёткого управления в производственно-технологических процессах даёт возможность формировать гибкие алгоритмы регулирования, учитывающие специфические особенности производства.

Многокаскадная структура НЛР обеспечивает эффективное управление сложными технологическими процессами за счёт адаптации к изменению внутренних параметров системы. Внутренние каскады управляющего устройства повышают универсальность системы управления, позволяя масштабировать решение за счёт увеличения количества модулей на различные технологические операции, что позволяет оптимизировать технологический процесс на всём жизненном цикле изделия.

Продemonстрированный в работе подход по реализации модели объекта управления и настройке многокаскадной нечёткой системы управления позволяет расширить область применения нечёткого управления в сложных объектах и производственных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huo J., Chan F. T., Lee C. K., Strandhagen J. O. and Niu B. 2020 Smart control of the assembly process with a fuzzy control system in the context of Industry 4.0 Advanced Engineering Informatics 43 101031.
2. Gamberini R., Grassi A., and Rimini B. 2006 A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem International Journal of Production Economics 102 (2) 226-243.
3. Battaia O., Dolgui A. 2013 A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches International Journal of Production Economics 142 (2) 259-277.
4. Yang C., Gao J., Sun L. 2013 A multi-objective genetic algorithm for mixed-model assembly line rebalancing Computers & Industrial Engineering 65 109-116.
5. Wainer G. A. and Mosterman P. J. 2018 Discrete-event modeling and simulation: theory and applications (Boca Raton: CRC press).



6. Simulation of a discrete event system for process control of robotic casting / S. P. Cherny, D. O. Savelyev, A. S. Savelyeva [et al.] // Journal of Physics: Conference Series : International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021, Novosibirsk, 12-14 мая 2021 года. Vol. 2032. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012080. – DOI 10.1088/1742-6596/2032/1/012080.
7. Шидловский, С. В. Логическая система с перестраиваемой структурой в задачах управления технологическими процессами / С. В. Шидловский // Автометрия. – 2005. – Т. 41. – № 4. – С. 104-113.
8. Катина, А. М. Синтез мультиструктурных интеллектуальных систем / А. М. Катина, С. В. Шидловский // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 8. – С. 144-148.
9. Черный, С. П. Моделирование следящей системы управления с применением многокаскадного нечётного регулятора / С. П. Черный, И. Е. Бичаев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 1. – С. 47-54.
10. Способ компенсации статических нелинейностей с использованием мягких вычислений / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. – № 1. – С. 35-42.
11. Соловьев, В. А. Многокаскадные нечёткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / В. А. Соловьев, С. П. Черный, А. И. Малокова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 3. – С. 45-51.
12. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололёда на проводах линий электропередач / В. А. Соловьев, С. И. Сухоруков, С. П. Черный [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № III-1 (23). – С. 18-25.
13. Савельев, Д. О. Особенности компенсации неоднозначных сопутствующих нелинейностей с использованием нечёткого подхода / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4 (42). – С. 149-158.
14. Cherniy S. P. Modeling Multi-Cascade Fuzzy Controller with Integrated Implementation of Various Control Laws / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf. – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877652.
15. Cherniy S. P. A Model of Multi-Cascade Fuzzy Logic Controller Implemented Using Different Variations of Inference Algorithms / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva, A. S. Gudim. – 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934872.
16. Cherniy S. P. Advanced Fuzzy Logic Control System Electrically Driven with Dual-Zone Speed Regulation / A. Buzikaeva, R. Bazhenov, E. Lavrushina, T. Gorbunova, I. Ledovskikh. – AIP Conference Proceedings 2700, 020037 (2023), doi.org/10.1063/5.0125134.
17. Один из подходов к реализации модели нечёткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, Е. О. Полей, С. А. Васильченко, А. С. Гудим // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № IV-1 (36). – С. 25-32.
18. Cherniy S. P. Algorithm of fuzzy controller membership function allocation at fuzzification stage / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf, S. A. Vasilchenko. – Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Т. 200. P. 117-125. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_13.
19. Cherniy S. P. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf, V. N. Khrulkov. – EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19. DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496.
20. Cherniy S. P. General Principals of Building the Fizzy Multi-Cascade Tracking Control Systems / S. P. Cherniy, V. A. Soloviev. – 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602646.
21. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.
22. Черный, С. П. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / С. П. Черный, В. А. Соловьев, Д. О. Савельев // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 157-166.

Кувшинов В. В., Муровский С. П., Абдали Л. М. А., Исса Х. А.
V. V. Kuvshinov, S. P. Murovsky, L. M. Abdali, H. A. Issa

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХОСНЫМ СОЛНЕЧНЫМ ТРЕКЕРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FOPID-РЕГУЛЯТОРА

MODELING AND SIMULATION OF A SOLAR TRACKER BY USING FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLERS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF ENERGY

Кувшинов Владимир Владиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников энергии» Институт ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета (Россия, Севастополь). E-mail: kuvshinov.vladimir@gmail.com.

Vladimir V. Kuvshinov – PhD in Engineering, Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Energy Sources Department, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University (Russia, Sevastopol). E-mail: kuvshinov.vladimir@gmail.com.

Муровский Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: murovski@inbox.ru.

Sergey P. Murovsky – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: murovski@inbox.ru.

Лаит Абдали Мохаммед Абдали – кандидат технических наук Президентского университета Куфы (Ирак, Наджаф). E-mail: layth_2210@mail.ru.

Abdali Layth M. – PhD in Engineering, Presidency University of Kufa (Iraq, Najaf). E-mail: layth_2210@mail.ru.

Исса Хайдер Абдулсахиб – аспирант кафедры «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: hayderissa10@gmail.com.

Hayder Issa A. – Postgraduate Student, Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department, Ural Federal University (Russia, Yekaterinburg). E-mail: hayderissa10@gmail.com.

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования и оценки эффективности двух контроллеров двухосной системы слежения за солнцем: классического пропорционально-интегрально-дифференцирующего (PID) регулятора и регулятора дробного порядка (FOPID). Целью данного исследования является сравнение работы двух регуляторов по точности слежения, времени отклика и общей эффективности преобразования солнечной энергии. Сравнительный анализ показывает, что использование управления FOPID повышает эффективность преобразования солнечной энергии примерно на 8-12 %. Полученные результаты подчёркивают потенциал применения усовершенствованного FOPID-управления с целью повышения эффективности систем слежения за солнцем и вносят вклад в развитие высокоэффективных технологий возобновляемой энергетики.

Summary. In this paper the authors present the results of modeling and evaluating the effectiveness of two controllers of a biaxial sun tracking system: the classical proportional-integral-differentiating (PID) regulator and the fractional order regulator (FOPID). The purpose of this study is to compare the performance of two regulators in tracking accuracy, response time, and overall solar energy conversion efficiency. Comparative analysis shows that the use of FOPID control increases the efficiency of solar energy conversion by about 8 – 12 %. The results highlight the potential of advanced FOPID management to improve the efficiency of sun tracking systems and contribute to the development of highly efficient renewable energy technologies.

Ключевые слова: двухосная система слежения за Солнцем, FOPID-регулятор, управление двигателем постоянного тока, фотоэлектрический модуль, энергоэффективность.

Key words: two-axis sun tracking system, FOPID-controller, DC motor control, photovoltaic module, efficiency of energy.

УДК 681.5.01

Введение. Применяемые механизмы слежения за солнцем играют ключевую роль в увеличении выработки электроэнергии фотоэлектрических систем за счёт непрерывной ориентации положения фотопанелей перпендикулярно падающим солнечным лучам [1–4]. Традиционные пропорционально-интегрально-дифференцирующие (PID) регуляторы широко используются в таких системах благодаря своей простоте и лёгкости реализации. Проводимые исследования в моделировании многокаскадного нечёткого регулятора привели к появлению интеллектуальных вариантов PID-регуляторов для улучшения управления многодвигательной системой электроприводов в нелинейных системах [5], включая системы слежения за солнцем. Однако обычные PID-регуляторы часто не могут обеспечить оптимальную работу фотопанелей в условиях нелинейной динамики, неопределённостей системы и внешних возмущений [6–11].

В отличие от них PID-регуляторы дробного порядка (FOPID), которые вводят дополнительные степени свободы за счёт нецелых порядков интегрирования и дифференцирования, обеспечивают повышенную гибкость и устойчивость при проектировании систем управления. Их потенциал был проверен в различных инженерных приложениях, особенно в тех случаях, когда системы обладают нелинейным поведением и изменяющимися во времени характеристиками [12; 13]. В системах возобновляемой энергии, особенно в подключённых к сети ветрогенераторах, современные FOPID-регуляторы демонстрируют превосходные динамические характеристики и устойчивость к возмущениям, таким как колебания параметров ветрового потока и нестабильность сети [14; 15]. Эти успешные внедрения демонстрируют универсальность и надёжность управления FOPID-регулятора и стимулируют его использование в системах слежения за солнцем, где важны повышенная точность и оптимизация энергопотребления.

Целями исследования являются оценка результатов моделирования управления двухосной системой слежения за солнцем с использованием PID- и FOPID-регуляторов на основе показателей эффективности, включая точность слежения, время отклика и улучшение выработки электроэнергии, а также обсуждение практических аспектов практической реализации в реальном времени.

Рассматриваемый в исследовании FOPID-регулятор обладает балансом между производительностью и сложностью реализации. Используя пять настраиваемых параметров, основанных на дробном исчислении, FOPID-регулятор обеспечивает большую гибкость управления и подходит для систем слежения за солнцем, подверженных механическим задержкам и изменениям параметров солнечного излучения. В проведённом исследовании FOPID-регулятор рассматривается как эффективное решение, направленное на повышение точности слежения за Солнцем и максимальной выработки электроэнергии фотопанелями.

Моделирование интеллектуальной системы. В данной работе алгоритмы управления PID- и FOPID-регулятора используются для описания и регулирования двухосного солнечного трекера. Для моделирования и имитации работы двигателя постоянного тока и подвижной фотоэлектрической панели используется программа Simulink. Основным результатом исследования является моделирование перспективного регулятора для двухосных солнечных трекеров, используемых с целью мониторинга и повышения эффективности солнечных фотопанелей. Этот трекер управляет движением солнечной панели, используя FOPID-регулятор с целью увеличения выходной мощности фотопанели. На рис. 1 представлен алгоритм, используемый в проведённом исследовании для оптимизации и оценки характеристик PID- и FOPID-регуляторов в системе двухосевого слежения за солнцем. Процесс начинается с моделирования динамики объекта, за которым следует определение критерия качества, которым в данном случае является интеграл модуля ошибки, взвешенной по времени (*ITAE*). Затем для настройки параметров регуляторов PID и FOPID применяется метод оптимизации роя частиц (*PSO*). После оптимизации отклики замкнутой системы моделируются с использованием полученных параметров. Значения *ITAE* рассчитываются для каждого регулятора и используются в качестве основы для сравнения их производительности.

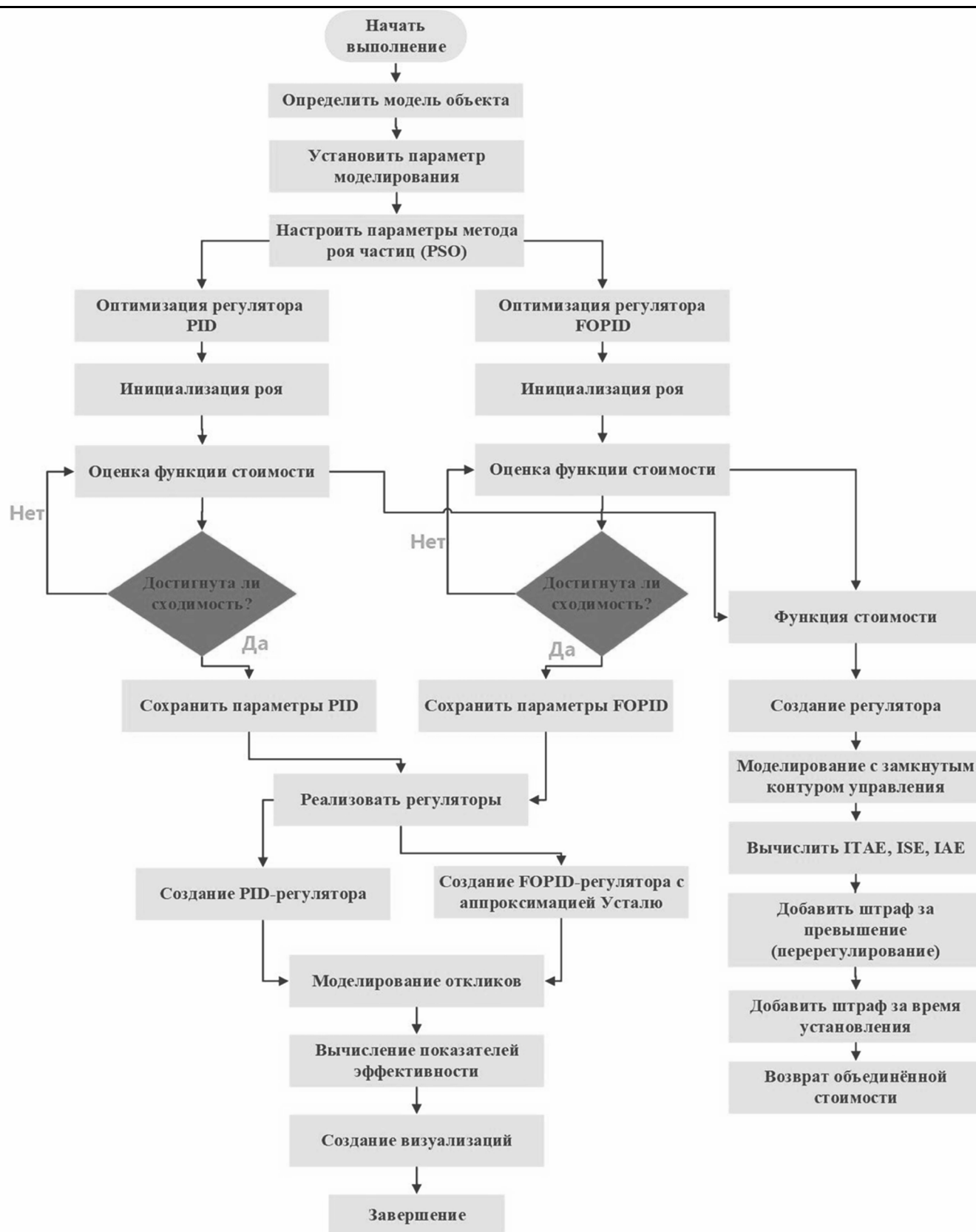


Рис. 1. Блок-схема оптимизации и оценки характеристик PID- и FOPID-регуляторов в системе двухосевого слежения за солнцем

Двухосная система слежения за солнцем была смоделирована в среде MATLAB Simulink. Математические уравнения были использованы для моделирования основных компонентов системы слежения, таких как двигатели постоянного тока, солнечная панель и положение солнца. Моделирование управления двигателями системы слежения за солнцем и положения фотопанели является важной частью процесса. Исследование проводилось в два этапа. Первый этап включает использование традиционного блока управления PID-регулятором. На втором этапе исследования использовался блок управления FOPID-регулятором. Среда MATLAB Simulink предоставляет подходящую платформу для моделирования подобных систем и получения результатов, дающих представление о направлении дальнейшего развития.

На рис. 2 представлена комплексная модель двухосной системы слежения за солнцем в среде MATLAB Simulink, объединяющая модель двигателя постоянного тока и фотопанели для моделирования общей производительности слежения за солнцем в различных условиях работы.

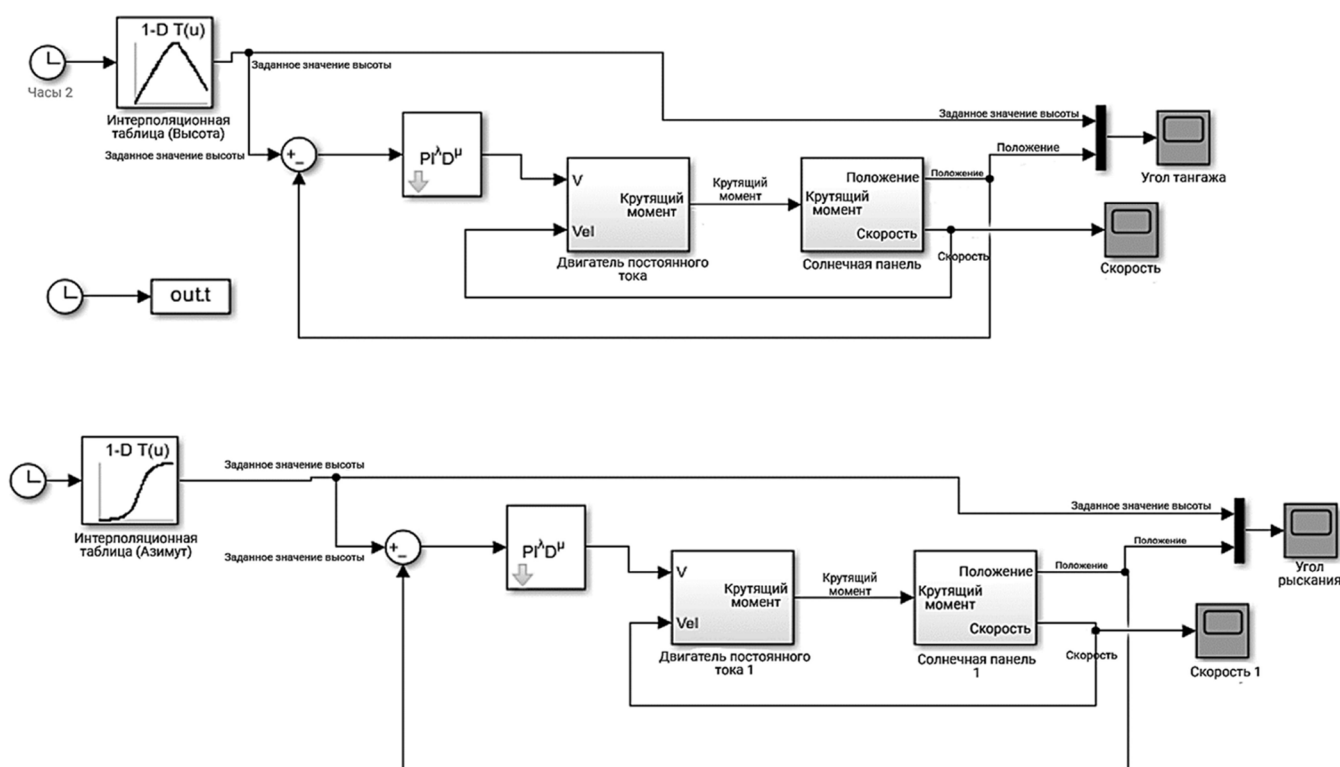


Рис. 2. Модель двухосевой системы слежения за солнцем в среде MATLAB Simulink

В двухосных системах слежения за солнцем необходимо понимать термины «угол склонения» и «угол наклона (широты)», где вращение панелей вокруг вертикальной оси (солнечные панели следуют за движением солнца с востока на запад) представлено углом склонения. Угол, который регулирует положение солнечных панелей с севера на юг – угол широты. Двухосевые системы слежения способны непрерывно регулировать эти углы, что гарантирует приход большего количества солнечного излучения на фотопанели и, таким образом, увеличивает выработку электроэнергии. Чтобы фотопанели всегда были ориентированы согласно траектории движения солнца, угол наклона установки солнечного трекера должен соответствовать широте места с целью достижения максимальной производительности. На рис. 3 показано регулирование угла наклона, соответствующего широте, с помощью PID-регулятора. Скорость движения трекера по широте показана на рис. 4. На рис. 5 и 6 показаны угол и скорость склонения двухосного трекера с использованием PID-регулятора. Модель двухосной системы слежения за солнцем с использованием PID-регулятора целочисленного порядка была реализована в среде MATLAB Simulink.

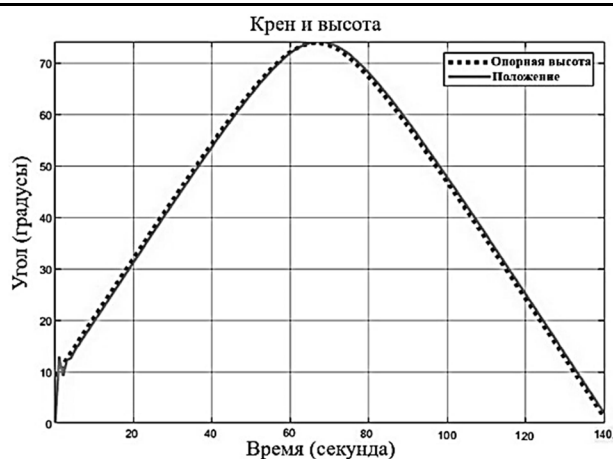


Рис. 3. Угол широты двухосного трекера с использованием PID-регулятора

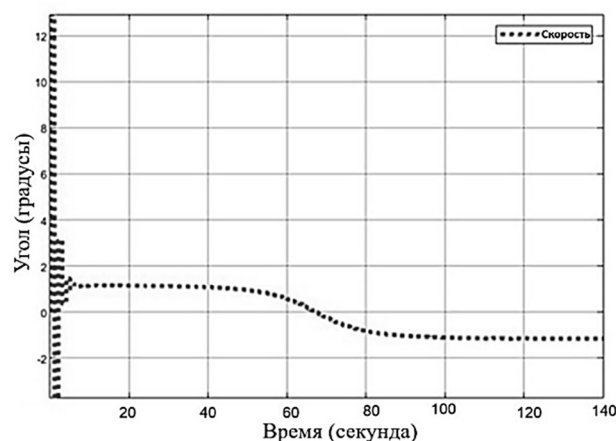


Рис. 4. Скорость изменения широты при использовании PID-регулятора

Благодаря своим преимуществам в области гибкости и плавности управления сложными нелинейными системами по сравнению с традиционными регуляторами целого порядка FOPID-регулятор рассматривается как перспективный подход, применяемый в системах слежения за солнцем и способствующий повышению точности положения. Для моделирования двухосной системы слежения за солнцем с применением контроллера FOPID была также использована среда MATLAB Simulink. На рис. 7 показан угол широты, на рис. 8 – скорость изменения широты трекера с использованием контроллера FOPID. Благодаря измерению угла рыскания и угла наклона, определяющего положение панелей в направлении север-юг, двухосевые солнечные трекеры способны непрерывно оптимизировать своё положение с целью максимального преобразования солнечной энергии. На рис. 9 и 10 представлены угол рыскания и скорость его изменения при использовании контроллера FOPID.

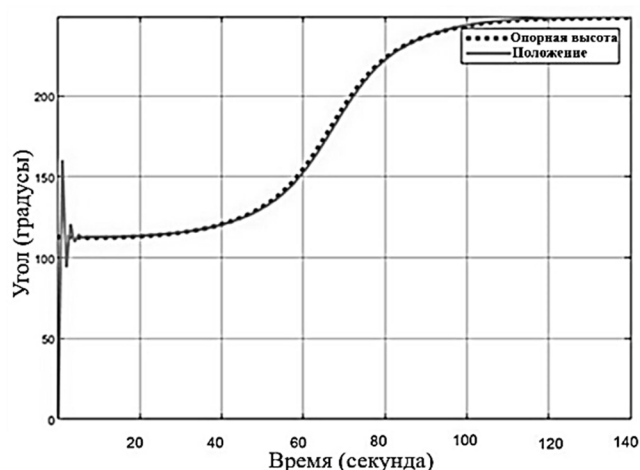


Рис. 5. Угол рыскания при использовании PID-регулятора

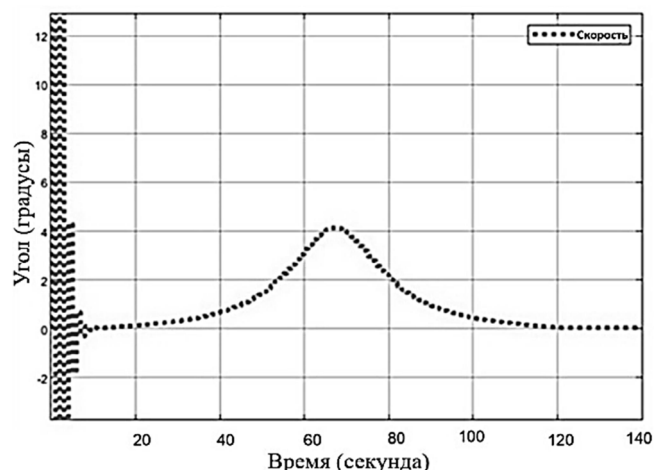


Рис. 6. Скорость рыскания при использовании PID-регулятора

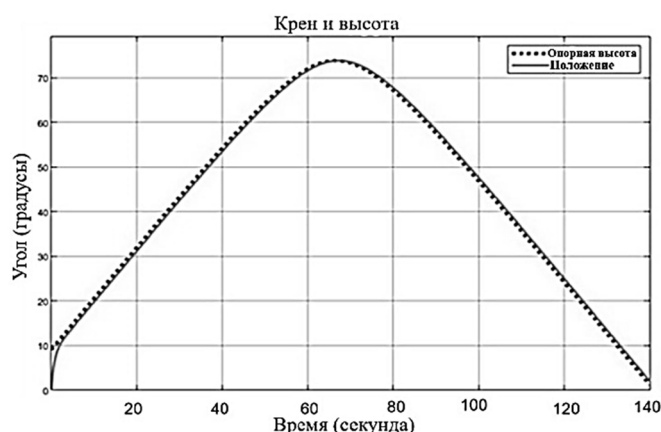


Рис. 7. Угол широты двухосного трекера с использованием FOPID-регулятора

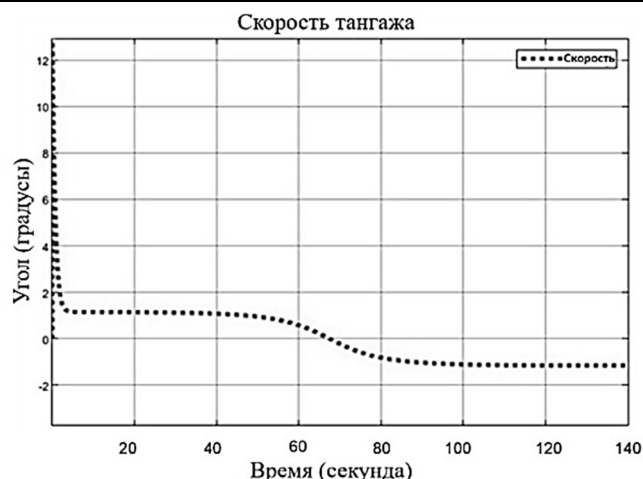


Рис. 8. Скорость изменения широты при использовании FOPID-регулятора

В проведённом исследовании учитывали высокий потенциал FOPID-регулятора в обеспечении точности и плавности управления двигателями постоянного тока – он был использован для управления двухосной системой слежения за солнцем с целью отслеживания углов высоты и азимута солнца, а также углов наклона и рыскания мотора солнечного трекера. Полученные результаты наглядно подтвердили работоспособность FOPID-регулятора в обеспечении оптимального слежения за солнцем и, как следствие, повышении эффективности эксплуатации системы солнечных панелей. Результаты проведённого моделирования показали, что погрешность, возникающая при использовании PID-контроллера в системе слежения за солнцем, значительна. В то же время применение FOPID-контроллера более точно ориентирует положение фотоэлектрических панелей относительно падения солнечных лучей, обеспечивая плавное и точное слежение, как показано на рис. 7-10, и в итоге повышает эффективность преобразования солнечной энергии. На рис. 11 показана выработка мощности единичного фотоэлектрического модуля при управлении FOPID в сравнении с традиционным PID-регулятором.

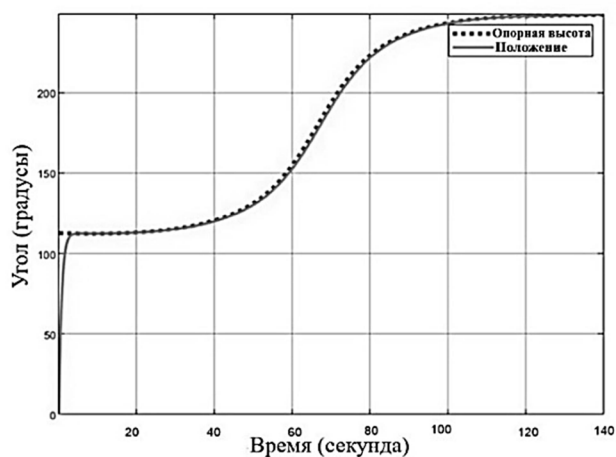


Рис. 9. Угол рыскания при использовании FOPID-регулятора

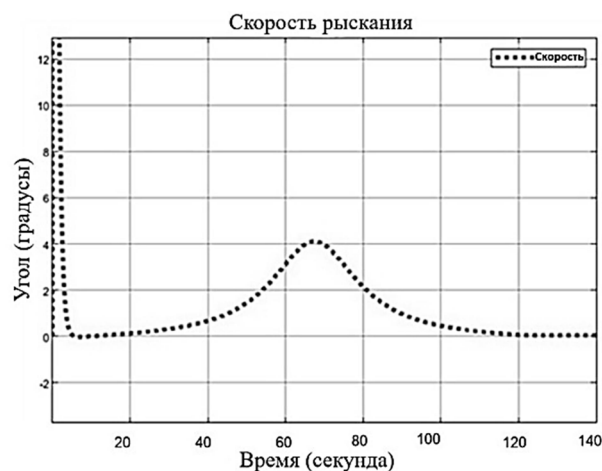


Рис. 10. Скорость рыскания при использовании FOPID-регулятора

Видно, что выходная мощность фотоэлектрического элемента начинает постепенно увеличиваться в утренние часы, достигая максимального значения в полдень, когда уровень солнечной радиации максимальный, а затем начинает постепенно снижаться во второй половине дня, что иллюстрирует кривая выходной мощности фотоэлектрического модуля, обусловленная изменением

уровня солнечной радиации и температурных условий в течение дня. Управление фотоэлектрическим модулем с применением FOPID-регулятора обеспечивает более точное слежение за солнцем, тем самым увеличивая выработку электроэнергии в течение дня по сравнению со стандартным PID-регулированием.

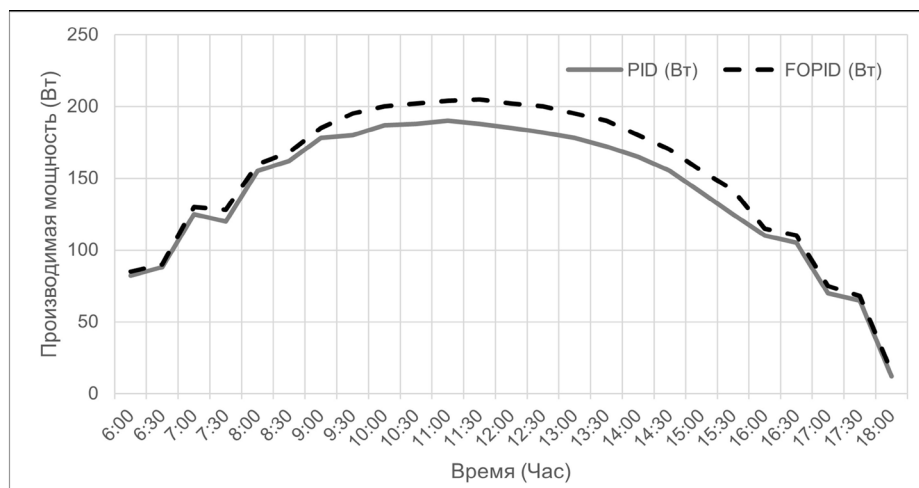


Рис. 11. Производство электроэнергии фотоэлектрическим модулем под управлением FOPID по сравнению с PID-регулятором

Проведённое моделирование показало, что использование FOPID-регулятора позволяет более эффективно преобразовывать солнечную энергию на фотоэлектрическом модуле, обеспечив прирост выработки на 8-12 % по сравнению с традиционным PID-регулированием. Увеличение мощности происходит за счёт снижения колебаний выработки при резких изменениях параметров солнечного света. Применение FOPID-регулятора обеспечило лучшую динамическую реакцию фотоэлектрического модуля на резкие изменения прихода солнечного излучения на приёмную фотопанель. Снижение колебаний и чрезмерных движений солнечной панели позволило снизить нагрузку на двигатель, что привело к экономии электроэнергии на собственные нужды.

Обсуждение результатов моделирования. Применение трекеров на фотоэлектрических станциях в разных климатических районах обуславливает использование различных систем регулирования, в частности, солнечные панели регулируются как по географическим и угловым координатам, так и по различным системам определения максимальных значений освещённости и потока солнечной радиации (датчики освещённости, люксметры, радиометры и др.). Эти устройства сопоставляют значения угловых параметров (градусы, радианы и др.) и значения освещённости (Ватт на квадратный метр, люксы и др.), дают отклик на систему регулирования в течение некоторого временного интервала, затем происходит механический поворот трекерной системы, время реагирования которой напрямую связано с настройкой регуляторов. Настройки FOPID-регулятора позволяют значительно сократить время реагирования электронных приборов, отвечающих за поворот всей трекерной системы, следовательно, происходит увеличение выработки электрической энергии. На рис. 3-10 приведены результаты моделирования при использовании PID- и FOPID-регуляторов, которые дают различный отклик на работу системы по вышеуказанным параметрам. Как показало проведённое моделирование, FOPID-регуляторы обладают значительно большим быстродействием, чем PID-регуляторы, что повышает эффективность работы всей фотоэлектрической системы.

На рис. 11 приведены результаты натурных испытаний фотоэлектрической панели с системой PID- и FOPID-регулирования. Эти результаты были проверены и подтверждены авторами в ходе испытаний на полигоне Севастопольского государственного университета и экспериментальной установки в провинции Наджаф Республики Ирак [16; 17]. Как видно из полученных графи-



ков, применение FOPID-регулирования обеспечило прирост выработки электроэнергии фотоэлектрической установкой и, как следствие, значительное увеличение эффективности работы фотоэлектрической станции.

Сравнительный анализ результатов моделирования предлагаемого FOPID-регулятора с традиционным PID-регулятором показал, что традиционный PID-регулятор обладает ограниченной адаптивностью и умеренной точностью слежения при средней угловой погрешности $\pm 1,5^\circ$, а предлагаемый FOPID-регулятор обеспечивает значительно более высокую точность слежения ($\pm 0,3^\circ$), более быстрое время отклика (0,6-0,8 с) и повышенную эффективность преобразования солнечной энергии, обеспечивая прирост 8-12 % по сравнению с базовым PID-регулятором.

По сравнению с другими стратегиями управления, такими как нечёткая логика и управление скользящим режимом, FOPID-регулятор демонстрирует оптимальный баланс между сложностью реализации и уровнем производительности. Он позволяет избежать сложностей в управлении скользящим режимом (например, дребезжания) и зависимости от правил нечёткой логики, при этом обеспечивая превосходную динамическую реакцию и высокую надёжность. Эти преимущества однозначно позиционируют FOPID-регулятор как перспективное решение для высокопроизводительных двухосевых систем слежения за солнцем.

Заключение. Были проведены моделирование и сравнительная оценка традиционного PID-регулятора и регулятора дробного порядка (FOPID) для двухосной системы слежения за солнцем с целью повышения эффективности выработки электроэнергии солнечными фотоэлектрическими системами. Хотя PID-регуляторы широко используются благодаря своей простоте, в данной работе показаны преимущества использования FOPID-регулятора для достижения повышенной точности управления, более быстрого динамического отклика и уменьшения ошибок слежения как по широте, так и по углу склонения. Исследование показывает возможность интегрирования дробного управления в двухосную систему и оценки результата посредством моделирования с использованием реальных фотоэлектрических модулей.

Результаты моделирования показывают, что контроллер на базе FOPID-регулятора значительно превосходит классический PID-регулятор по нескольким ключевым параметрам: снижает перерегулирование, подавляет колебания (дребезжание) и увеличивает преобразование энергии солнечного излучения в электрическую энергию примерно на 8-12 %; контроллер на базе FOPID-регулятора снижает энергозатраты на управление исполнительными механизмами, способствуя повышению общей эффективности системы. Улучшения достигаются без усложнения системы сверх практических ограничений, что делает предлагаемое решение пригодным для встраиваемых платформ управления в режиме реального времени.

Хотя двухосное слежение и PID-регулирование являются хорошо изученными областями, новизна данной работы заключается в целенаправленном применении FOPID-регулирования и количественной оценке его влияния на выработку электроэнергии и производительность системы. Проведённое исследование предлагает обоснованное решение по применению FOPID-регулятора в системах слежения за солнцем с учётом повышения производительности энергосистемы. В целом, рассматриваемый подход по применению FOPID-регулятора способствует разработке более интеллектуальных, надёжных и энергоэффективных систем электрогенерации на базе солнечной энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuvshinov, V. V., L. M. Abdali, N. V. Morozova, B. L. Krit, F. M. Al-Rufaei, and H. A. Issa. «Experimental studies on receiving surfaces of flat solar collectors». *Surface engineering and applied electrochemistry* 57 (2021): 715-720.
2. F. Shama, G. H. Roshani, A. Ahmadi and S. Roshani, «A Novel Design and Experimental Study for a Two-Axis Sun Tracker», 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, 2011, p. 1-4, doi: 10.1109/APPEEC.2011.5748909.
3. D. Pritchard, «Sun tracking by peak power positioning for photovoltaic concentrator arrays», in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 3, no. 3, p. 2-8, August 1983, doi: 10.1109/MCS.1983.1104767.

4. J. Wu, X. Chen and L. Wang, «Design and Dynamics of a Novel Solar Tracker With Parallel Mechanism», in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 1, p. 88-97, Feb. 2016, doi: 10.1109/TMECH.2015.2446994.
5. Моделирование многокаскадного нечёткого регулятора для управления многодвигательной системой электроприводов / С. П. Черный, К. А. Емельянов, М. А. Лямин, Д. Ю. Облогин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 4-10.
6. A. Al Nabulsi and R. Dhaouadi, «Efficiency Optimization of a DSP-Based Standalone PV System Using Fuzzy Logic and Dual-MPPT Control», in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 8, no. 3, p. 573-584, Aug. 2012, doi: 10.1109/TII.2012.2192282.
7. Bahrami, Arian, Okoye, Chiemeka Onyeka, 2018. The performance and ranking pattern of PV systems incorporated with solar trackers in the northern hemisphere. Renew. Sustain. Energy Rev. 97, 138-151.
8. Bahrami, Arian, Okoye, Chiemeka Onyeka, Atikol, Ugur, 2016. The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa. Appl. Energy 177, 896-906.
9. Ahmed, N. M.; Ebeed, M.; Magdy, G.; Sayed, K.; Gamoura, S. C.; Metwally, A. S. M.; A. Mahmoud, A. A New Optimized FOPIDA-FOIDN Controller for the Frequency Regulation of Hybrid Multi-Area Interconnected Microgrids. Fractal Fract. 2023, 7, 666. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7090666>.
10. Al-Soud, Mohammed S., Abdallah, Essam, Akeyleh, Ali, Abdullah, Salah, Hrayhat, Eyad S., 2010. A parabolic solar cooker with automatic two axes Sun tracking system. Appl. Energy 87, 463-470.
11. Черный, С. П. Моделирование интеллектуальной системы управления с многокаскадным нечётким ПИД-регулятором / С. П. Черный, Е. Н. Землянская, А. С. Филатова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2015. – № IV-1 (24). – С. 15-21.
12. Ahmed G. Abo-Khalil, Khairy Sayed, Ali Radwan, Ibrahim I.A. El-Sharkawy, «Analysis of the PV system sizing and economic feasibility study in a grid-connected PV system», Case Studies in Thermal Engineering, Volume 45, May 2023, 102903, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102903>.
13. C. D. Rodríguez-Gallegos, O. Gandhi, S. K. Panda and T. Reindl, «On the PV Tracker Performance: Tracking the Sun Versus Tracking the Best Orientation», in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 10, no. 5, p. 1474-1480, Sept. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3006994.
14. S. I. Palomino-Resendiz, F. A. Ortiz-Martínez, I. V. Paramo-Ortega, J. M. González-Lira and D. A. Flores-Hernández, «Optimal Selection of the Control Strategy for Dual-Axis Solar Tracking Systems», in IEEE Access, vol. 11, p. 56561-56573, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3283336.
15. K. Achuthan et al., «Remote Triggered Dual-Axis Solar Irradiance Measurement System», in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 2, p. 1742-1751, March-April 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2966156.
16. Создание полигона для исследований солнечных и ветровых установок на площадке базы отдыха «Горизонт» Севастопольского государственного университета / Л. М. Абдали [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021: сборник статей по материалам междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Г. В. Кучерик, Ю. А. Омельчук. – Севастополь: СевГУ, 2021. – С. 28-33.
17. Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак / Л. М. Абдали [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2022. – Т. 25. – № 3. – С. 82-91.



Горькавый М. А.
M. A. Gorkavyu

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫМ РОБОТОМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

POSITIONAL MODE CONTROL OPTIMIZATION OF A COLLABORATIVE ROBOT IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS

Горькавый Михаил Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и инновационные технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Mikhail A. Gorkavyu – PhD in Engineering, Head of Industrial Electronics and Innovative Technologies Department, Komsomolsk-na-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mixkomsa@gmail.com.

Аннотация. В исследовании рассмотрена проблема выхода коллаборативного робота из подмножеств технологически эффективных конфигураций в ходе исполнения движений, реализующих части технологических операций, назначаемых оператором или системой управления в реальном времени. Предложен оригинальный механизм модернизации системы планирования движений, функционирующей в режиме позиционного управления, использующий предустановленную базу знаний редуцированных конфигурационных пространств. Предустановленный параметр (максимально коррелирующая конфигурация в точке назначения) с помощью средств классификации извлекается из базы знаний редуцированных конфигурационных пространств и устанавливается в качестве первоначальной догадки для алгоритмов решения обратной задачи кинематики оптимизационными методами. Полученные при этом движения не образуют конфигурации и, соответственно, пространственные расположения коллаборативного робота, выходящие за рамки технологически эффективных. Результаты исследования базируются на фундаментальных положениях и методах классической теории автоматического управления в контексте линейной и нелинейной частей, теории электропривода, общей робототехнике. Доказательство реализуемости и эффективности предложенных решений выполнялось путём проведения экспериментов на имитационных моделях и на физическом оборудовании.

Summary. This study examines the problem of a collaborative robot's escape from subsets of technologically efficient configurations during the execution of movements implementing parts of technological operations assigned by the operator or the control system in real time. A novel mechanism for upgrading a motion planning system operating in positional control mode is proposed. This mechanism utilizes a predefined knowledge base of reduced configuration spaces. A predefined parameter (the maximally correlated configuration at the destination point) is extracted from the knowledge base of reduced configuration spaces using classification tools and is set as an initial guess for algorithms solving the inverse kinematics problem using optimization methods. The resulting movements do not form configurations and, accordingly, spatial arrangements of the collaborative robot that go beyond technologically efficient ones. The results of the study are based on the fundamental principles and methods of classical automatic control theory in the context of its linear and nonlinear components, electric drive theory, and general robotics. The feasibility and effectiveness of the proposed solutions were demonstrated through experiments on simulation models and physical equipment.

Ключевые слова: технологический процесс, роботизированный комплекс, оптимизация, управление, коллаборативный робот, планирование движения, конфигурационное пространство.

Key words: technological process, robotic complex, optimization, control, collaborative robot, motion planning, configuration space.

Исследование выполнено в рамках научного проекта, финансируемого за счёт средств Российского научного фонда (проект № 25-21-00292).

УДК 62.529

Актуальность. Эффективность коллаборативных роботизированных технологических процессов (КРТП) определяется способностью системы управления коллаборативного робота (КР) оперативно и адекватно реагировать на изменения переменных состояния совместного пространства комплекса [1]. Изменения могут быть связаны как с необходимостью исполнения заданной последовательности частей технологических операций (ТО), так и с недетерминированностью рабочей зоны, вызванной изменением положения объектов коллизий во времени [2]. Исполнение КР технологических переходов (ТПд) и вспомогательных переходов (ВП) как частей ТО реализуется посредством движения инструмента (центральной точки инструмента (ЦТИ)) КР в операционном пространстве (ОП). При этом специфика движения зависит от допустимого и применённого режима управления [3]. Использование режимов контурного и траекторного управления при реализации ТПд, особенно при ограниченных режимах подачи инструмента, оставляет узкий диапазон варьирования параметров движения при проведении оптимизационных процедур. Разрешение коллизий в моменте исполнения движения, реализующего ТПд, без нарушения технологического режима не представляется возможным [4]. С другой стороны, режим позиционного управления при реализации ВП предоставляет широкие возможности оптимизации параметров движения. При исполнении ВП в случае необходимости разрешения коллизий возможен переход на режимы траекторного и контурного управления, допустимы полная остановка КР, перемещение в предустановленные позиции или перемещение в предустановленные зоны.

Отсутствие жёстких ограничений для режима позиционного управления, с одной стороны, расширяет возможность и простоту применения типовых методов планирования движения, таких как инерциальный способ с использованием предустановленных шаблонов траекторий (прямых, частей окружности, сплайнов и любых других видов), обратная задача кинематики (ОЗК) без ограничений, ОЗК с ограничениями, разрешаемые нелинейными решателями [5; 6; 7], с другой стороны, может привести к выходу КР из технологически эффективных подмножеств конфигурационного пространства (КП), что может отражаться в виде неэффективных поз КР в ОП, либо вообще визуально не наблюдаться в ОП, при этом запас углового перемещения по некоторым осям может оказаться критически малым. Получение в точке назначения очередного движения технологически неэффективной конфигурации в большинстве случаев приведёт к невозможности осуществления траекторного и контурного управления, высоким затратам вычислительных ресурсов (в силу сложности задачи оптимизации нелинейного решателя), а также занятию значительного объёма рабочей области ОП при реализации движения. Тогда становится актуальной задача разработки механизма (в рамках технологического метода оптимизации движений КР), позволяющего при осуществлении последовательной серии движений в целях исполнения ТО обеспечить нахождение КР в приемлемом для текущей ТО объёме конфигурационного пространства.

Методология. Результаты исследования базируются на фундаментальных положениях и методах классической теории автоматического управления в контексте линейной и нелинейной частей, теории электропривода, общей робототехники. Доказательство реализуемости и эффективности предложенных решений выполнялось путём проведения:

- численных экспериментов на имитационной модели КР [8] в составе кинематической модели робота KUKA LBR iiwa 7 R800 [9] и модели системы управления взаимосвязанных электроприводов на базе двигателей постоянного тока, устройство управления локальных систем реализовано ПИД-регуляторами (имитационная модель поддерживает возможность также включения интеллектуальных устройств управления приводами, например [10]);
- физических экспериментов в рамках лабораторной организации ТПд механообработки, в качестве КР выступал промышленный робот KUKA LBR iiwa 7 R800, программно управляемый внешним устройством, синтезирующим в качестве задания (спланированного движения) массив углов положения во времени для каждого шарнира.

Задание точки назначения ВП осуществлялось наиболее удобным для оператора образом – в виде матрицы однородного преобразования для ЦТИ относительно глобальной системы координат.

нат КР. Планирование движения по заданной матрице трансформации в моделях было реализовано как посредством инерциального способа, при этом переход от ОП к КП осуществлялся с помощью псевдообратной матрицы Якобиана (для избыточного робота манипулятора), вычисляемой согласно методу Мура – Пенроуза [11; 12], так и классическим решением ОЗК для точки назначения в условиях ограничений и без них. Искомая точность решения была установлена в пределах стандартных допусков для промышленных роботов, определялась количеством времени, выделяемым на решение задачи оптимизации, и сама по себе не ставилась в работе в качестве критерия для оптимизации ТПД. При исследовании работоспособности предлагаемых решений опорные конфигурации использовались как параметр для нелинейного решателя ОЗК. Движения, реализующие ВП, не сопровождалась коллизиями.

Результаты. В качестве основной идеи исследования была выдвинута гипотеза, что любому классу ТО роботизированной механообработки, включающей повторяющиеся ТПД, может быть поставлено в соответствие ограниченное дискретное КП Q^{red} , такое, что для любой точки k начала рабочего хода (РХ) для ТПД, определённой в ОП матрицей трансформации TF_k , может быть найдена такая конфигурация Q_k , что

$$Q_k = F_{IK}(TF_k, Q_j^{red}),$$

где Q_j^{red} – наиболее подходящий элемент из Q^{red} , подаваемый в функцию F_{IK} в качестве входного параметра, отражающего первоначальную догадку для алгоритма оптимизации BFGS, при этом Q_k останется эффективной технологической конфигурацией, обеспечивающей эффективную технологическую позу КР. Условием будет являться то, что фактическая матрица трансформации

$$\widetilde{TF}_k = F_{FK}(Q_k) \cong TF_k$$

будет определяться в пределах допустимой погрешности Δ (рассчитанной, с помощью метрик NRMSE, RMSE или MAD), и если

$$V_{Rk} \subset V_R,$$

где

$$V_{Rk} = \{X \subset R^3 | \partial X = S_{Rk}\},$$

$$V_R = \{Y \subset R^3 | \partial Y = S_R^{Q^{red}}\},$$

здесь ∂X и ∂Y – границы множеств, замыкающие объёмы соответствующих пространств.

То есть выполняются следующие условия: для V_{Rk} , если $x_0 \in X$, то для \forall окрестности $U \ni x_0$ справедливо $U \cap X \neq \emptyset$ и $U \cap X^c \neq \emptyset$, для V_R , если $y_0 \in Y$, то для \forall окрестности $W \ni x_0$ справедливо $W \cap Y \neq \emptyset$ и $W \cap Y^c \neq \emptyset$, где X^c , Y^c – дополнения множеств X и Y соответственно; $S_{Rk} = F_{surf}^R(Q_k, Model_R)$ – множество точек в декартовом пространстве, определяющих внешнюю оболочку поверхности модели КР; $S_R^{Q^{red}} = \bigcup_{i=1}^n (F_{surf}^R(Q_i, Model_R))$ – множество точек в декартовом пространстве, определяющих внешнюю оболочку n поверхностей моделей КР для всех конфигураций из Q^{red} , $i \in \overline{1, n}$, n – мощность множества Q^{red} , $Model_R$ – модель робота KUKA LBR iiwa 7 R800 в URDF-формате [13].

Для подтверждения гипотезы был поставлен численный эксперимент на имитационной модели и физический эксперимент на соответствующем промышленном оборудовании в лабораторных условиях. В качестве компонентов программно-аппаратного комплекса (ПАК) в эксперименте, помимо основного оборудования и управляющего ПО, выступала разработанная база данных с системой управления, содержащая набор редуцированных КП и признаков выбора конкретного редуцированного КП по спецификации (характеристикам частей ТО) соответствующей ТО.

Редуцированные КП формировались на основании следующих значений требований по ТО:

- тип ТО (рассматривались ТО сверления, построчного фрезерования, окрашивания изделий с радиусом кривизны более 1 м и др.);

- диапазон вариаций параметров локальной системы координат изделия в глобальной системе координат робота (вариации локализации обрабатываемой плоской поверхности или касательной плоскости в случае наличия кривизны обрабатываемой поверхности, например окрашивание или шлифование);
- требуемая ориентация ЦТИ относительно обрабатываемой поверхности, определяющая матрицу ориентации для ЦТИ в глобальной системе (нормаль к поверхности или заданный угол наклона);
- геометрические ограничения рабочей зоны (локализация объектов коллизий);
- ограничения для вспомогательного хода (ВХ) и ВП из операционного описания ТО.

Условиями исполнения ТО были приняты: индифферентность к углу проворота инструмента относительно оси аппликат 7-й оси вращения при ТО механообработки и значительный диапазон вариации угла поворота при ТО окрашивания. Количество повторений ТПД в технологической операции для разных положений начала РХ в эксперименте было принято не ниже 4 при сохранении одинаковой ориентации ЦТИ относительно плоскости поверхности обработки.

Для ТО сверления изделия, расположенного в горизонтальной плоскости с отклонением нормали к поверхности обработки (оси аппликат локальной базы изделия) от оси OZ глобальной системы координат КР не более $0,2356$ рад, математическое описание редуцированного КП может быть представлено в следующем виде:

$$Q^{red} = F_{IK}^a(TF), TF = F_{TF}(pose, \alpha_{rot}, \alpha_{tilt}), \quad (1)$$

где $pose, \alpha_{rot}, \alpha_{tilt}$ – массивы положений ЦТИ, угла поворота ЦТИ и угла наклона ЦТИ относительно 7-й оси вращения КР соответственно, при этом при проведении эксперимента ограничения переменных составили: $\alpha_{rot} \in [\frac{-175*\pi}{180}; \frac{-175*\pi}{180}]$, $\alpha_{tilt} \in [0; \frac{3*\pi}{40}]$; массив векторов в декартовой системе координат представляется как $pose = f(r(R, \theta), \theta, \varphi)$, где $\{R, \theta, \varphi\}$ – координаты соответствующей сферической системы координат, $r = R \cdot \sin(\theta)$ – проекция радиус-вектора $R = 0,9$ на плоскость сечения сферы по параллели, проходящей через текущую точку сферической системы, ограничения зенитного угла $\theta \in [\frac{2*\pi}{9}; \frac{7*\pi}{18}]$, ограничения азимутального угла $\varphi \in [\frac{-\pi}{4}; \frac{\pi}{4}]$, ограничения для $\{R, \theta, \varphi\}$ приняты исходя из технических характеристик КР KUKA LBR iiwa 7 R800.

Тогда итоговая формула формирования закона управления в обобщённых координатах для движения КР будет выглядеть так:

$$q(t) = \{u(t) | q(t_f) = q_k = F_{IK}(TF_k, Q_j^{red}) \wedge \min(RMSE(TF_k, TF_j)), j \in \overline{1, n}\}. \quad (2)$$

На рис. 1, а представлен ограниченный набор пространственных расположений КР, соответствующих конфигурациям из редуцированного пространства: 1) для операций сверления плоской поверхности (ось вращения седьмого звена направлена вниз к плоскости XOY глобальной системы КР) и 2) для операций фрагментарного окрашивания изделия с дугообразным изгибом в вертикальной плоскости (ось вращения седьмого звена направлена перпендикулярна оси OZ глобальной системы КР); на рис. 1, б представлены те же пространственные расположения, вид сверху, при этом звенья, кроме 7-го и базы, скрыты для обеспечения возможности визуализации рамок локальных систем координат звеньев КР. На рис. 1, в представлены примеры возможных отклонений локальной базы 7-го звена робота от первоначальной как по углу наклона α_{tilt} (формула (1)) оси OZ , так и по углу вращения α_{rot} (формула (1)) локальной системы координат относительно оси OZ , слева отображено минимальное отклонение по углу наклона, посередине – среднее отклонение, справа – существенное. Все позы робота в ОП и, соответственно, конфигурации в редуцированном КП по условию (по механизму построения редуцированного КП) технологически эффективны – КР заходит к изделию сверху, все звенья максимально удалены от обрабатываемой поверхности, отсутствует проваливание 2-5-го звеньев в нижнюю рабочую зону КР.

Применение закона (2) и базы знаний (БЗ) редуцированных КП для планирования движений, реализующих части технологических операций, на имитационных моделях и физическом

оборудовании показало справедливость положенной гипотезы, а именно сохранение технологически эффективных поз КР в ОП.

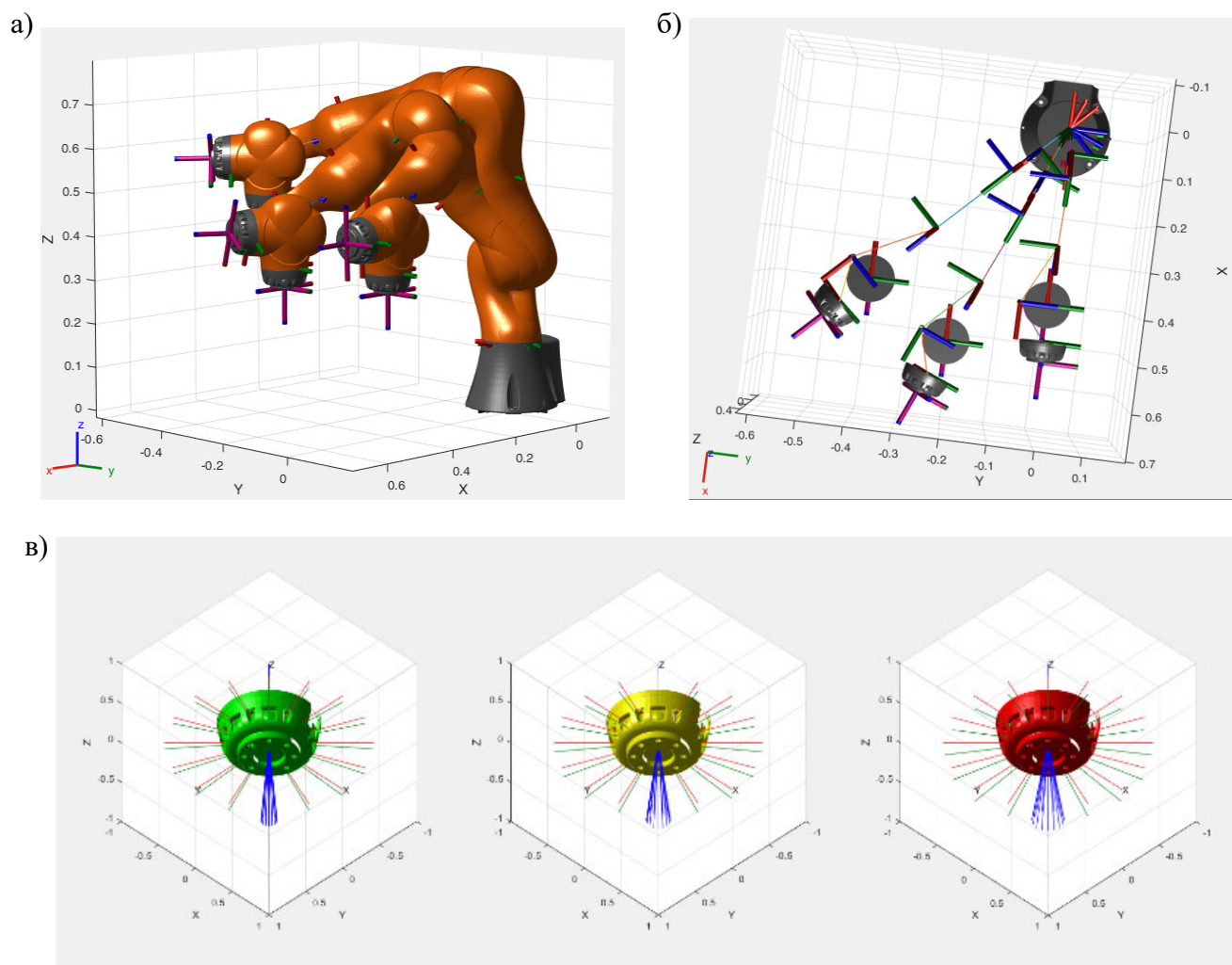


Рис. 1. Визуализация моделей КР и его звеньев в пространственных расположениях, соответствующих экземплярам конфигураций из редуцированного КП:
а – графические модели КР; б – геометрическая интерпретация кинематических моделей КР;
в – возможные отклонения локальных систем координат седьмого звена КР

На рис. 2 представлен пример схемы визуализации движений, реализующих ТО, состоящую из одного ВП (расположения 3-5) и двух ТПД (расположения 1-3 и 5-7), с поддержкой БЗ редуцированного КП (см. рис. 2, б) и без поддержки БЗ (см. рис. 2, а). На схеме жёстко ограниченные части ТО – РХ для ТПД не представлены, т. к. соответствующие движения реализуются в режиме траекторного управления по шаблону отрезка прямой и выполняются инерциальным способом без решения ОЗК. Отчётливо видны на рис. 2, а неэффективная технологическая поза (существенный «провал» звеньев в нижнюю часть рабочей зоны), возникшая в виду накопившейся ошибки смещения конфигураций, а также два потенциально опасных перемещения инструмента в направлении рабочей зоны оператора. Во втором случае (управление с использованием БЗ редуцированного КП) эффективность поз сохраняется, перемещение инструмента при смене происходит через верхнюю часть рабочей зоны КР, не представляя опасности для оператора.

Кроме того, использование предустановленных конфигураций для поиска закона управления движением в большинстве случаев позволяет сократить общую длину траектории перемещения КР в КП для ТО по сравнению с вариантом без использования БЗ редуцированных КП в сред-

нем на 7 %. Так, для представленного примера длина траектории варианта на рис. 2, а составило 6,7912 рад, а для второго варианта (см. рис. 2, б) – 6,3641 рад.

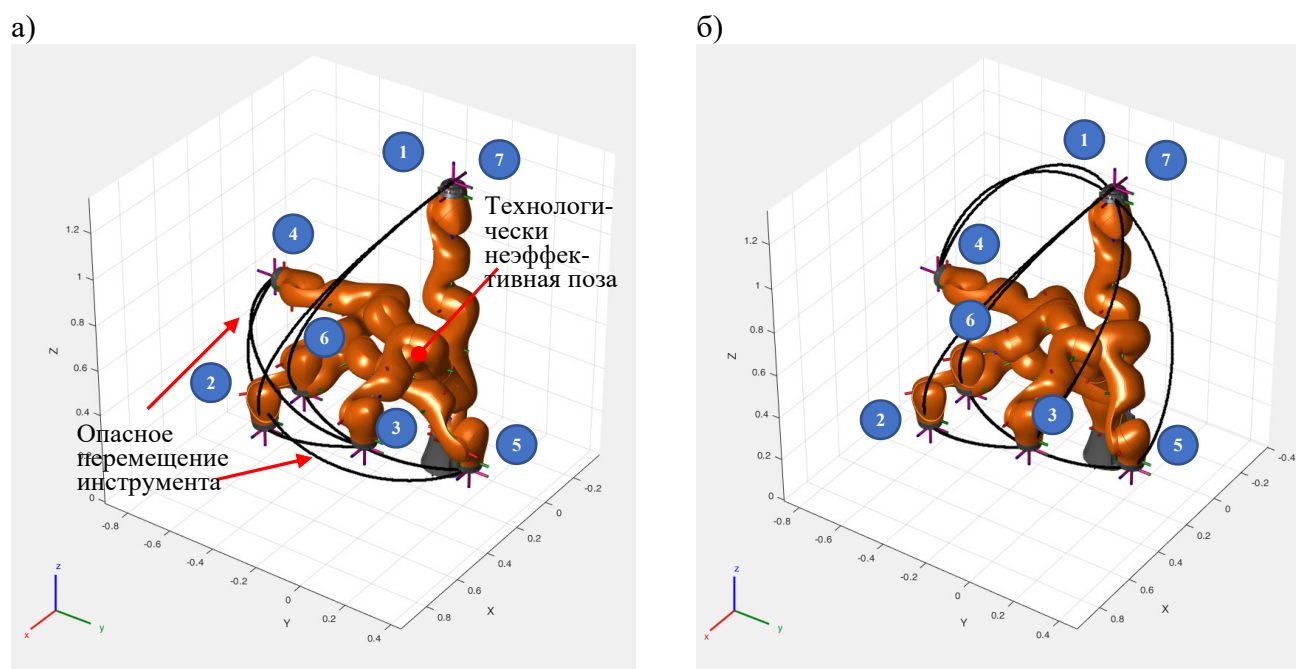


Рис. 2. Визуализация моделей КР и его звеньев в пространственных расположениях:
а – без БЗ редуцированного КП; б – с БЗ редуцированного КП

Сокращение длины траектории в КП с учётом неизменности общего времени исполнения ТО, очевидно, ведёт к различиям и в показателях динамики, оставляя преимущество за вторым вариантом (использование БЗ редуцированных КП) в части максимальных угловых ускорений и рывков шарниров.

На рис. 3 представлена диаграмма потребления энергии КР в разрезе 6 частей ТО (6 движений) и график потребления энергии КР накопленным итогом для двух представленных вариантов реализации ТО: без использования БЗ редуцированных КП (БЗ-) и с использованием БЗ редуцированных КП (БЗ+).

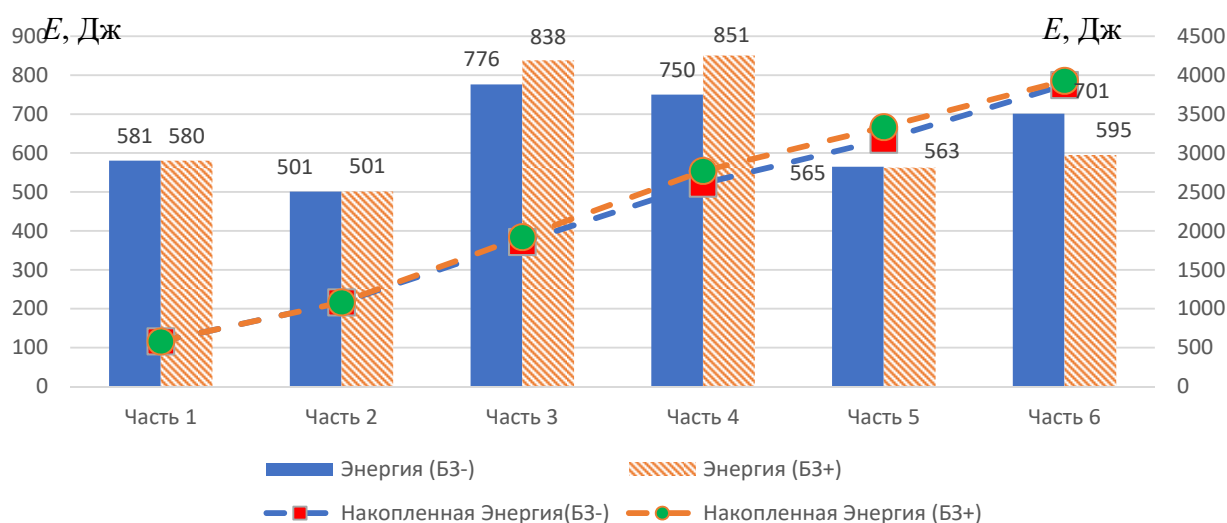


Рис. 3. Потребление энергии КР при реализации ТО в разрезе шести частей и накопленным итогом для двух вариантов сравнения

На диаграмме замечен значительный перерасход энергии для движений 3 и 4 в варианте 2, что связано с перемещением инструмента в верхней (безопасной) рабочей зоне КР, в итоге за всё время реализации ТО общее потребление энергии для варианта 2 увеличилось незначительно. При этом большие затраты энергии в шестой части для варианта 1 связаны с потерей технологической эффективности позы в позиции 5 (см. рис. 2, а).

Обсуждение. Избыточность [14], являясь одним из основных преимуществ КР с семью и более степенями свободы, определяет его универсальность в вариантах реализации технически сложных движений, но, с другой стороны, усложняет задачи планирования движений для частей ТО, технически тривиальных. Анализ разнообразия КРТП показал, что в большинстве случаев в рамках ТО преобладают технически тривиальные части, для которых можно гораздо проще спланировать и реализовать движения, ограничив пространство переменных состояния КР. Тогда становится целесообразным, имея инструменты выбора ограничений, для каждой спецификации ТО ставить в соответствие набор ограничений или использовать полное пространство для КР, подключая актуальные наборы из БЗ. В частности, в качестве одного из набора инструментов видится целесообразным использовать редуцированные КП. Собрать БЗ, включающую редуцированные КП под каждый класс технологических задач для каждого конкретного КРТП, не представляется сложным, тогда реальным становится обеспечение механизмов планирования движений массивом опорных конфигураций, что облегчает поиск оптимальных движений. В случае неперекрывания БЗ редуцированных КП конкретного массива частей ТО всегда есть возможность скорректировать положение изделия [15] в рекомендуемую позицию при помощи автоматического позиционера либо действиями оператора, т. е. подвести спецификацию частей ТО под актуальное редуцированное КП.

Заключение. В ходе исследования был предложен механизм, обеспечивающий нахождение КР в технологически эффективных позах при осуществлении последовательной серии движений в целях исполнения ТО. Принцип действия заключается в выборе актуальных предустановленных параметров для модулей системы планирования и контроля исполнения движений в режиме позиционного управления с решением ОЗК оптимизационными методами. Предустановленный параметр Q_j^{red} с помощью средств классификации извлекается из БЗ редуцированных КП в качестве первоначальной догадки для алгоритмов решения ОЗК. Полученные при этом движения не образуют конфигурации и, соответственно, пространственные расположения КР, выходящие за рамки технологически эффективных. Эксперимент на имитационных моделях и физическом оборудовании продемонстрировал преимущества предложенного решения, в том числе подтвердив общее сокращение длины траекторий КР в КП до 7 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jinyi Huang, Xun Xu, Jan Polzer, Towards instructional collaborative robots: From video-based learning to feedback-adapted instruction, Journal of Manufacturing Systems Volume 83, December 2025, Pages 29-45, ISSN: 0278-6125 <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.08.018>.
2. Konstantinos Katsampiris-Salgado, Nikos Dimitropoulos, George Michalos, Sotiris Makris, Suitability assessment method for safe robot tooling design in Human-Robot Collaborative applications, Procedia CIRP Volume 128, 2024, Pages 770-775, ISSN: 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.063>.
3. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д. П. Ким. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 2016. – 440 с.
4. Горькавый, М. А. Планирование и оптимизация движений коллаборативного робота при разрешении коллизий в ограниченном операционном пространстве / М. А. Горькавый // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68. – № 3. – С. 56-69.
5. Byrd, R. H., J. C. Gilbert, and J. Nocedal., A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming, Mathematical Programming, Vol 89, No. 1, 2000, p. 149-185.
6. Coleman, T. F. and Y. Li., An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds, SIAM Journal on Optimization, Vol. 6, 1996, p. 418-445.
7. Coleman, T. F. and Y. Li., On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds, Mathematical Programming, Vol. 67, Number 2, 1994, p. 189-224.

8. Ronit Shah, Arockia Selvakumar Arockia Doss, Natrayan Lakshmaiya, Advancements in AI-enhanced collaborative robotics: towards safer, smarter, and human-centric industrial automation, Results in Engineering, Volume 27, September 2025, 105704, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105704>.
9. KUKA Robots LBR iiwa 7 R800. Specification., KUKA Laboratories GmbH Issued: 16.10.2014.
10. Моделирование многокаскадного нечёткого регулятора для управления многодвигательной системой электроприводов / С. П. Черный, К. А. Емельянов, М. А. Лямин, Д. Ю. Облогин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № III (83). – С. 4-10.
11. Nokleby, S. B., Podhorodeski, R. P., Reciprocity-based resolution of velocity degeneracies singularities for redundant manipulators, Mechanism and machine theory, 2001, vol. 36, p. 397-409.
12. Simas, H. Dias, A., Martins, D., Extended Jacobian For Redundant Robots Obtained From The Kinematics Constraints, Proseedings of COBEM 2011, 2012.
13. 2025 GitHub, Inc. – URL: https://github.com/kuka-isir/iiwa_description.
14. Federico Lozer, Lorenzo Scalera, Paolo Boscariol, Alessandro Gasparetto, Planning optimal minimum-jerk trajectories for redundant robots, Robotics and Autonomous Systems, Volume 192, October 2025, 105049 <https://doi.org/10.1016/j.robot.2025.105049>.
15. Мельниченко, М. А. Разработка интеллектуальных моделей и алгоритмов повышения эффективности функционирования роботизированных технологических процессов: дис. канд. техн. наук: 2.3.3 / Мельниченко Маркел Андреевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2024. – 209 с.



Савельев Д. О.
D. O. Savelyev

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ПОДВОДНОГО МОДУЛЯ

INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROLLING THE TRAJECTORY OF AN UNMANNED UNDERWATER MODULE

Савельев Дмитрий Олегович – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Dmitriy O. Savelyev – Senior Lecturer, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kepapu@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматривается применение интеллектуальной системы управления на основе нечёткой логики для контроля траектории движения беспилотного подводного модуля. Проведён сравнительный анализ применения классического пропорционального регулятора и нечёткого логического регулятора для объекта управления. Разработана имитационная модель системы управления, позволяющая оценить эффективность различных подходов в условиях воздействия внешних возмущающих факторов на объект управления. Представлены результаты имитационного моделирования и переходные процессы, показывающие эффективность применения нечёткого логического регулятора для задач точного управления подводными аппаратами, что открывает перспективы для создания адаптивных систем, устойчивых к изменяющимся условиям подводной среды.

Summary. The article discusses the application of an intelligent control system based on fuzzy logic for controlling the trajectory of an unmanned underwater module. A comparative analysis of the application of a classical proportional controller and a fuzzy logic controller for the control object is performed. A simulation model of the control system has been developed to evaluate the effectiveness of various approaches under the influence of external disturbances on the control object. The results of simulation modeling and transient processes are presented, showing the effectiveness of using a fuzzy logic controller for precise control of underwater vehicles, which opens up prospects for the creation of adaptive systems that are resistant to changing conditions in the underwater environment.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, нечёткий логический регулятор, автономный необитаемый подводный модуль, контроль траектории.

Key words: Intelligent control system, fuzzy logic controller, autonomous unmanned underwater module, trajectory control.

УДК 681.5.01:658.5

Введение

В настоящее время наиболее распространённым регулятором в системе управления движением беспилотным подводным модулем является пропорциональный либо пропорционально-интегральный регулятор. Несмотря на то что пропорционально-интегральный регулятор теоретически устраняет статическую ошибку, его применение на практике для управления движением подводных аппаратов часто связано с существенными сложностями реализации. Таким образом, пропорциональный регулятор (далее П-регулятор) остаётся более распространённым решением ввиду простоты настройки, устойчивости и предсказуемости работы в условиях значительных и изменяющихся возмущений.

Однако у П-регулятора также существует ряд минусов, не позволяющих обеспечить максимальную эффективность в применении управления для беспилотного подводного модуля.

П-регулятор требует много времени для его калибровки и настройки для точного линейного движения модуля в плоскости либо пространстве по двум и более координатам. При реализации классической системы управления параметры П-регулятора должны быть корректно настроены и будут иметь отличия при различных параметрах внешней среды и различных возмущающих воздействиях (подводные течения, волнение на поверхности). Помимо этого, для разработки системы управления движением беспилотного подводного модуля при движении по трём координатам необходимо учитывать 3 степени свободы (продольное, боковое и вертикальное перемещения). В таком случае потребуется применять три П-регулятора для каждой из осей движения соответственно, что значительно усложняет задачу синтеза и координации системы, т. к. эти каналы управления в общем случае являются связанными.

Основным системным недостатком классических регуляторов в применении к подводным модулям и аппаратам является их неадаптивность. Они не способны в реальном времени компенсировать существенные нелинейности гидродинамических сил, изменение массо-инерционных характеристик аппарата (например, при расходе энергии или взятии проб грунта) и скачкообразные изменения внешних возмущений. Это приводит к возникновению статической ошибки для П-регулятора, перерегулированию или длительному времени установления переходных процессов, что критично для задач точного позиционирования и следования по сложной траектории в условиях нестационарной океанской среды.

Точное математическое моделирование объекта управления и системы регулирования линейного движения подводного модуля, включающее в себя решение уравнений гидродинамики, учёт присоединённых масс и сил вязкого трения, позволяет приблизить объект исследований к реальным условиям среды и физическим параметрам. Такой подход позволит не только изучать объект регулирования, но и апробировать на нём различные законы управления, в том числе и более совершенные, такие как адаптивные, робастные или нелинейные контроллеры, обладающие потенциалом для преодоления указанных ограничений.

Имитационное моделирование

Для обеспечения движения по кратчайшей траектории к заданным координатам требуется синтезировать систему управления беспилотным подводным модулем (БПМ), обладающую функционалом координированного регулирования работы взаимосвязанных движителей по сигналу отклонения.

Структурная схема, отображающая общую математическую модель движения БПМ, приведена на рис. 1. Для реализации движения по кратчайшей траектории к заданным координатам требуется синтезировать систему управления БПМ [1–3], обладающую функционалом координированного регулирования работы взаимосвязанных движителей по сигналу отклонения [4–5]. Как видно из рис. 1, система функционирует по принципу замкнутого контура. Внешние возмущающие воздействия влияют на положение аппарата, что приводит к возникновению ошибок по двум координатам [6]. Такие ошибки измеряются и преобразуются в вектор отклонения и расстояние до целевой точки. Регулятор, обрабатывая эту информацию, формирует управляющие сигналы (U_x , U_y) для движительно-рулевого комплекса (ДРК).

На рис. 2 приведена имитационная модель движения БПМ по двум координатам (оси абсцисс и оси ординат). Она включает в себя вычисление угла отклонения от заданной траектории и вычисление линейной скорости, с которой БПМ будет перемещаться до заданных координат. Модель объекта управления учитывает параметры внешней среды и такие воздействия, как течение, силу лобового сопротивления и вертикальные силы (сила Архимеда и сила тяжести). Приведённая система управления позволяет отрабатывать отклонения от заданной траектории посредством классического П-регулятора [7].

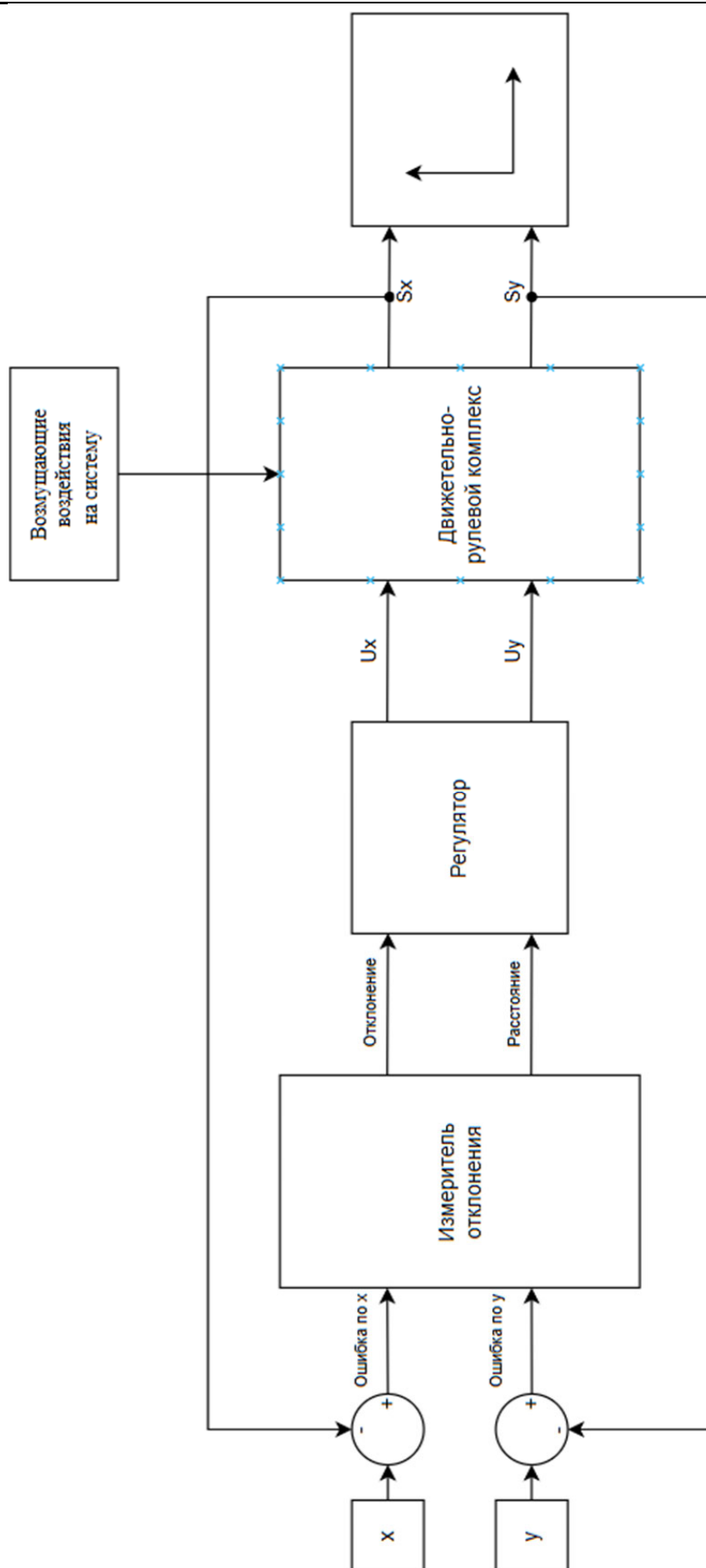


Рис. 1. Структурная схема движения БПМ

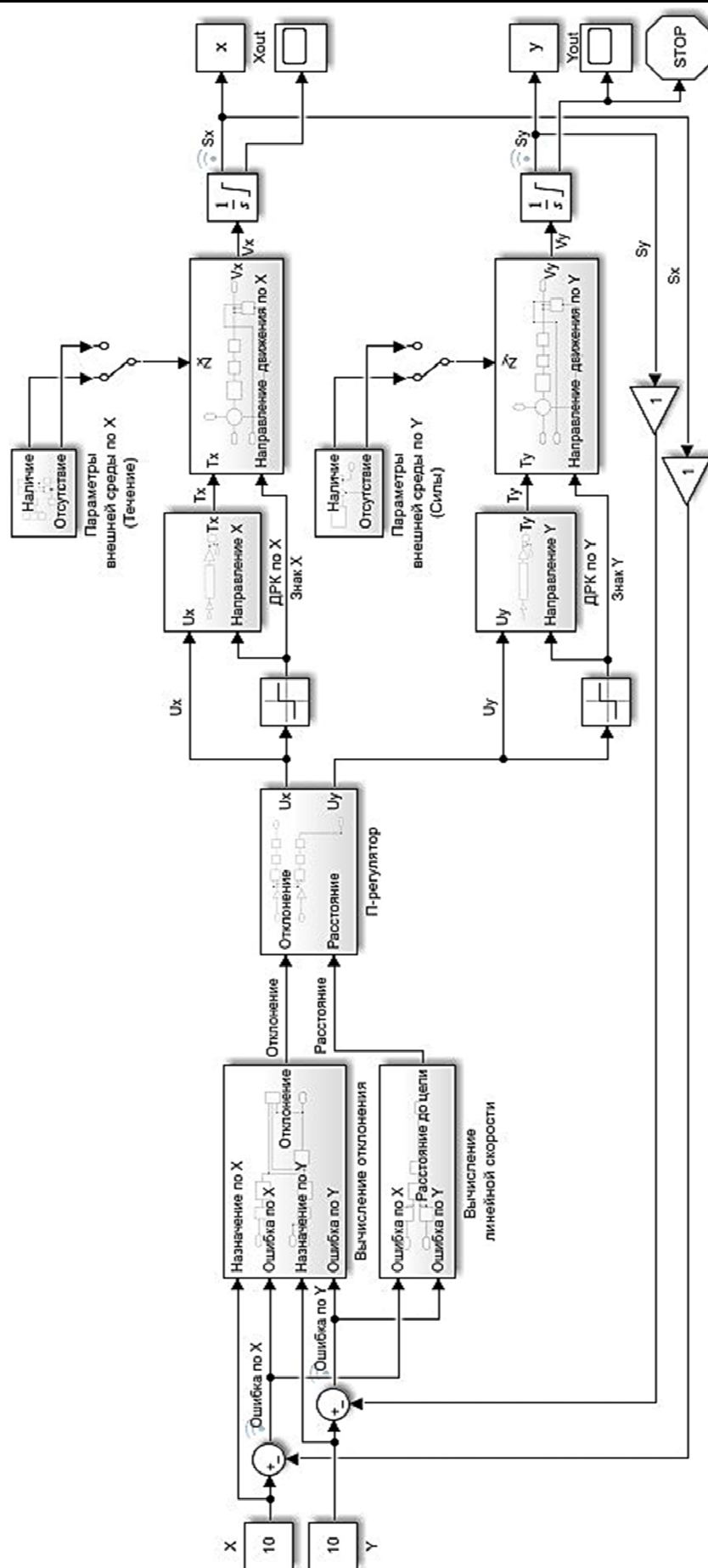
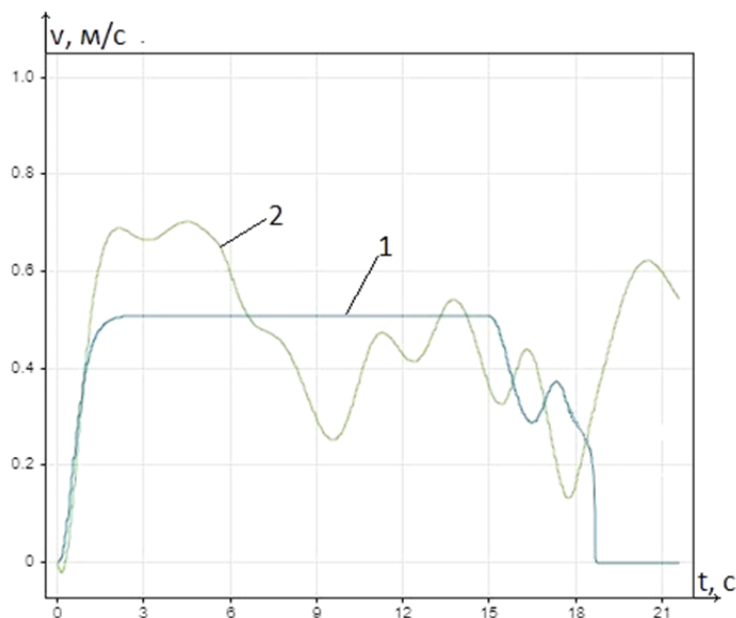


Рис. 2. Общая модель движения БПМ

Анализ динамических характеристик системы управления движением беспилотного подводного модуля осуществляется на основе временных зависимостей его ключевых кинематических параметров. Соответствующая временная зависимость скорости движения аппарата, характеризующая динамические свойства системы, приведена на рис. 3.



1 – скорость БПМ вдоль оси ординат; 2 – скорость БПМ вдоль оси абсцисс;

Рис. 3. Переходный процесс изменения скорости БПМ по времени

Как видно из графика переходного процесса изменения скорости (см. рис. 3), процесс движения по оси ординат протекает быстрее, чем по оси абсцисс. Это происходит по причине накладываемых возмущающих воздействий в виде течения на ось абсцисс. Анализ эффективности системы управления на основе классического П-регулятора демонстрирует его ограниченную пригодность для задач точного позиционирования. Траектория движения БПМ [8; 9] в вертикальной плоскости по двум координатам, полученная с его применением, представлена на рис. 4.

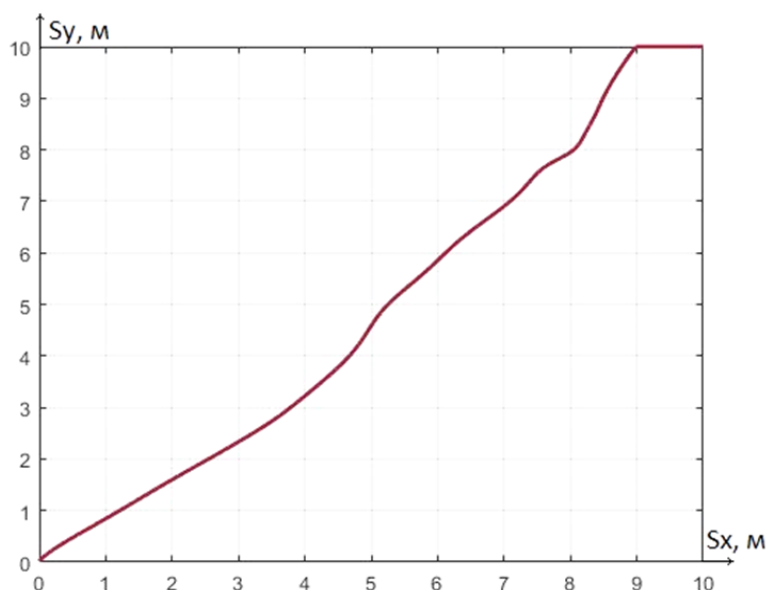


Рис. 4. Траектория движения БПМ с П-регулятором по двум координатам

Визуальный анализ графика позволяет зафиксировать существенное отклонение от оптимального пути: под воздействием внешних возмущений (течений, нелинейностей гидродинамики) аппарат осуществляет перемещение по кривой траектории. Данный характер движения свидетельствует о невозможности производить эффективную и своевременную компенсацию внешних воздействий при помощи П-регулятора. Таким образом, формируемая траектория движения является не кратчайшей, а система управления не обеспечивает достижения желаемого результата (точного оптимального выхода в целевую точку).

Исходя из выявленных недостатков классического П-регулятора, представляется целесообразной его замена на другой класс систем управления, позволяющий работать в условиях неопределённости информации. Такими системами управления выступают системы с нечётким управлением. Их применение для управления сложными нелинейными объектами особенно эффективно благодаря способности формализовать качественные экспертные знания через систему лингвистических правил. В отличие от классического П-регулятора с фиксированными коэффициентами нечёткий регулятор способен адаптивно изменять параметры управления в зависимости от величины и характера отклонения, что критически важно в условиях изменяющихся внешних возмущающих воздействий [9; 10].

В качестве наиболее упрощённого варианта реализации управления и настройки выбран нечёткий регулятор с алгоритмом вывода Мамдани. Данный алгоритм обеспечивает плавность формируемых управляющих воздействий, что исключает резкие изменения режима работы двигателей. Применение нечёткого логического регулятора для построения интеллектуальной системы управления движением БПМ открывает возможности для более эффективного управления объектом в условиях неопределённости и изменяющихся внешних воздействий, характерных для подводной среды. Принципиальное преимущество нечёткого подхода заключается в его способности формализовать качественные экспертные знания о динамике объекта в виде системы лингвистических правил. Это позволяет учитывать нелинейные зависимости и взаимовлияние каналов управления без построения сложных аналитических моделей, что особенно актуально для гидродинамических систем с их внутренними нелинейностями [11; 12].

Имитационная модель системы управления движением БПМ с нечётким логическим регулятором показана на рис. 5. Входными параметрами, по которым осуществляется управление двигателями, являются отклонение от курса и длина вектора, определяющего расстояние до цели. Отклонение от заданного курса определяется из расчёта нахождения разницы между идеальным курсом до целевой точки и отклонением положения БПМ.

График переходного процесса изменения скорости БПМ по времени с использованием нечёткого логического регулятора представлен на рис. 6. На приведённом графике переходного процесса изменения положения БПМ по времени видно, что БПМ достигает целевой точки назначения через 10,25 с от начала движения. На приведённом графике переходного процесса изменения скорости БПМ по времени (см. рис. 6) можно наблюдать, что скорость БПМ выходит на уровень 1 м/с через 0,5 с после начала старта при наложении на систему сил внешней среды.

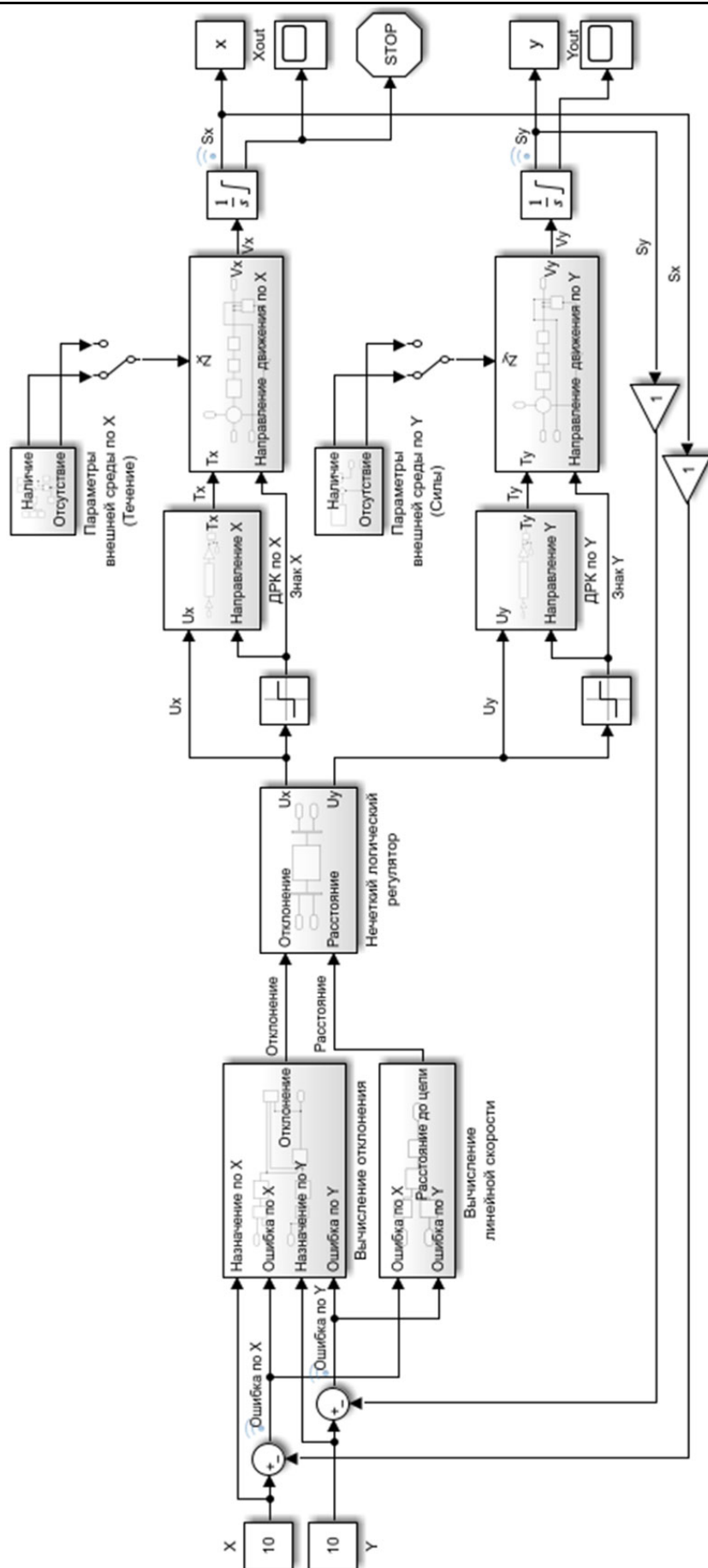
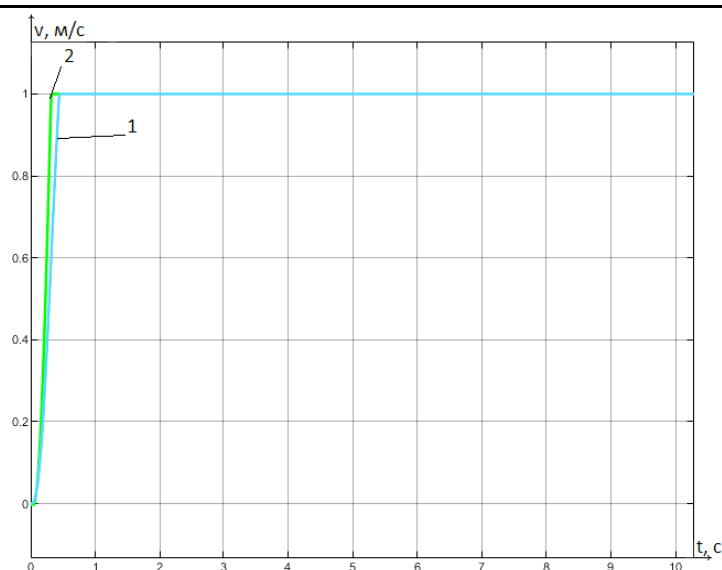


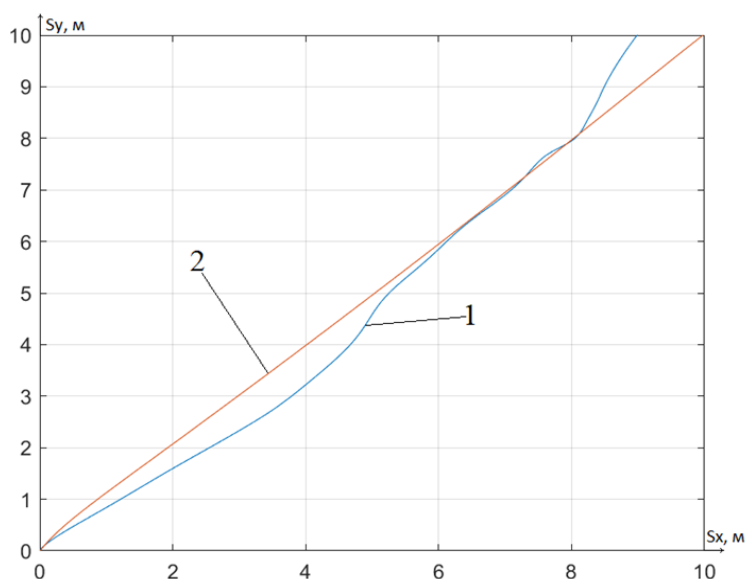
Рис. 5. Общая модель движения БПМ по двум координатам с нечётким регулятором



1 – скорость БПМ вдоль оси ординат; 2 – скорость БПМ вдоль оси абсцисс;
Рис. 6. Переходный процесс изменения скорости БПМ по времени

Сравнительный анализ траекторий движения (см. рис. 7) наглядно показывает, что система с нечётким логическим регулятором (траектория 2) обеспечивает более прямолинейное движение к целевой точке, минимальное отклонение от оптимальной траектории, а также лучшую сходимость к заданным координатам целевой точки назначения.

Ключевым преимуществом нечёткого регулятора является его способность адаптивно изменять параметры управления в зависимости от величины и характера отклонения, что особенно важно в условиях изменяющихся внешних возмущений. В отличие от классического П-регулятора с фиксированными коэффициентами нечёткий регулятор реализует нелинейный закон управления, позволяющий одновременно обеспечивать высокое быстродействие при больших отклонениях и точность позиционирования в окрестности целевой точки.



1 – траектория движение БПМ по двум координатам с классическим П-регулятором;
2 – траектория движение БПМ по двум координатам с нечётким логическим регулятором
Рис. 7. Траектория движения БПМ по двум координатам



На основе проведения вычислительного эксперимента было доказано, что система с нечётким логическим регулятором удовлетворяет предъявляемым требованиям по точности и устойчивости, превосходя по всем ключевым показателям систему с классическим П-регулятором. Важным практическим преимуществом является также относительная простота настройки нечёткого регулятора. При наличии определённого опыта настройка параметров системы управления осуществляется быстрее и обеспечивает большую гибкость при изменении условий эксплуатации. Дополнительным резервом для повышения качества управления служит возможность увеличения числа входных сигналов регулятора, что расширяет возможности учёта различных факторов, влияющих на движение аппарата.

Заключение

Проведённое исследование и вычислительный эксперимент доказали перспективность применения нечётких логических регуляторов в системах управления движением БПМ. Сравнительный анализ классического П-регулятора и нечёткого регулятора показал существенное превосходство последнего по основным показателям перемещения объекта управления. Экспериментально установлено, что система с нечётким управлением обеспечивает более прямолинейную траекторию движения к целевой точке, сокращение времени достижения цели, лучшую устойчивость к внешним возмущениям и повышение точности позиционирования.

Перспективы использования интеллектуальных систем управления в различных областях подтверждают эффективность включения в систему управления регуляторов с нечётким выводом на практике. Дальнейшее совершенствование подходов к исследованию сложных объектов управления может значительно улучшить их функциональность и эффективность в выполнении задач в сложных условиях подводной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайдук, А. Р. Методы синтеза нелинейных систем управления (квазилинейный подход): учеб. пособие для вузов / А. Р. Гайдук. – СПб.: Лань, 2025. – 288 с.
2. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учёта геометрических параметров / С. П. Черный, Д. О. Савельев, Н. Р. Сбитнев, П. О. Саяпина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 4-10.
3. Особенности моделирования пространственного движения многофункционального АНПА с избыточным движительно-рулевым комплексом / В. В. Костенко, А. В. Медведев, И. Г. Мокеева, А. Ю. Толстоногов // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2019. – Т. 8. – С. 74-79.
4. Беденко, К. В. Моделирование поля течений в рамках имитационного моделирующего комплекса для отработки алгоритмов интеллектуального управления групп АНПА / К. В. Беденко // Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям: тезисы докладов. – Новосибирск: Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, 2018. – С. 55-56.
5. Агеев, М. Д. Автономные необитаемые подводные аппараты / М. Д. Агеев. – Владивосток: Дальнаука, 2020. – 223 с.
6. Томских, А. А. Особенности реализации систем управления исследовательскими подводными беспилотными модулями / А. А. Томских, Д. О. Савельев, С. П. Черный // Электропривод на транспорте и в промышленности: материалы III Всероссийской научно-практической конференции: посвящается 60-летию кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», Хабаровск, 19-20 октября 2023 года. – Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 90-93.
7. Wang Y. et al. Review on research of control technology of autonomous underwater vehicle // World Sci-Tech Res Develop. 2021. Vol. 43. P. 636.
8. Антипов, А. С. Управление малоскоростным подводным роботом в условиях параметрических и внешних возмущений / А. С. Антипов, Д. В. Краснов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): труды Шестнадцатой международной конференции, Москва, 26-28 сентября 2023 года. – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2023. – С. 531-541.

9. Филаретов, В. Ф. Разработка метода формирования траекторий движения группы подводных роботов в среде с препятствиями во время их обхода / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21. – № 6. – С. 356-365.
10. Савельев, Д. О. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / Д. О. Савельев, С. П. Черный, В. А. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 213-221.
11. Savelyev, D. O. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements / Savelyev D. O., Gudim A. S., Solovev D. B. // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. 2019. P. 8725324.
12. Savelyev, D. O. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (Automatic Control System) elements / D. O. Savelyev, A. S. Gudim, D. B. Solovev // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019, Vladivostok, 01-02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725324. – DOI 10.1109/Eastconf.2019.8725324.



Емельянов К. А.
K. A. Emelianov

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ
ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ**

**SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF A MODULAR MULTI-STAGE
FUZZY CONTROL SYSTEM FOR PLASMA ARC CUTTING PARAMETERS**

Емельянов Кирилл Андреевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 79144032890@yandex.ru.

Kirill A. Emelianov – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 79144032890@yandex.ru.

Аннотация. В статье представлена программно-аппаратная реализация модульной системы многокаскадного нечёткого управления параметрами воздушной плазменно-дуговой резки листовой стали. Разработана экспериментальная установка на базе программируемого контроллера автоматизации, интегрированная поверх штатной системы ЧПУ станка без нарушения её функций интерполяции траектории. Предложен вариант реализации распределённой архитектуры на примере внутреннего каскада нечёткой системы управления. Рассмотрено применение программируемых логических интегральных схем для увеличения производительности нечётких систем управления реального времени. Показано, что применение нечётких логических регуляторов позволяет существенно повысить стабильность технологических параметров при типовых возмущениях, снизить среднеквадратичное отклонение тока дуги, время стабилизации высоты и погрешность расхода воздуха, а также уменьшить площадь термически повреждённой зоны кромки по сравнению со штатными регуляторами. Разработанная установка обладает запасом аппаратных и вычислительных ресурсов, открыта для дальнейшего наращивания интеллектуальных функций и может быть адаптирована к другим станкам плазменной резки с минимальными изменениями. Полученные результаты подтверждают эффективность распределённого многокаскадного нечёткого управления для повышения качества и производительности реза в условиях промышленного производства.

Summary. The article presents the software and hardware implementation of a modular multi-cascade fuzzy control system for air plasma arc cutting of sheet steel. An experimental setup based on a programmable automation controller has been developed, integrated over the standard CNC system of the machine tool without disrupting its trajectory interpolation functions. A variant of distributed architecture implementation is proposed using the example of an internal cascade of a fuzzy control system. The use of programmable logic integrated circuits to increase the performance of real-time fuzzy control systems is considered. It is shown that the use of fuzzy logic controllers can significantly improve the stability of technological parameters under typical disturbances, reduce the root mean square deviation of the arc current, the stabilisation time of the height and the air flow error, as well as reduce the area of the thermally damaged edge zone compared to standard controllers. The developed installation has a reserve of hardware and computing resources, is open for further expansion of intelligent functions, and can be adapted to other plasma cutting machines with minimal changes. The results obtained confirm the effectiveness of distributed multi-level fuzzy control for improving the quality and reproducibility of cuts in industrial production conditions.

Ключевые слова: многокаскадный нечёткий регулятор, плазменно-дуговая резка, числовое программное управление.

Key words: multi-stage fuzzy controller, plasma arc cutting, numerical control.

Исследования проводились в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024-2026 годы по теме «Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники».

УДК 681.5.01:658.5

Введение. Механизированная воздушная плазменно-дуговая резка (ПДР) листовой стали остаётся одним из наиболее производительных и экономичных способов раскроя в машиностроении, судостроении, авиастроении и металлообработке. Однако стабильность качества кромки при резке материалов в значительной степени зависит от одновременного поддержания в заданных пределах нескольких взаимосвязанных технологических параметров: тока дуги, высоты сопла над заготовкой, расхода плазмообразующего воздуха и скорости перемещения резака. Нарушение хотя бы одного из них (например, изменение высоты при переходе через шов или ржавчину, скачок сетевого давления воздуха, неподходящий ток источника) приводит к появлению дефектов: грата, облоя, чрезмерной зоны термического влияния, ухудшению перпендикулярности кромки и итогового качества реза [7; 8; 10].

Штатные промышленные системы управления плазменной резкой, как правило, используют независимые регуляторы тока и высоты, встроенные в источник питания и систему управления станком. Такие контуры эффективны в узком диапазоне рабочих режимов, но плохо справляются с нелинейными и перекрёстными возмущениями, характерными для реального производства. Попытки повышения качества за счёт ручной подстройки параметров оператором ограничены скоростью реакции человека и приводят к значительному разбросу результатов.

В последние годы активно развивается направление интеллектуального управления технологическими процессами, в том числе с применением нечёткой логики, способной формализовать и использовать экспертные знания технолога, а также учитывать сложные нелинейные взаимосвязи без построения точной математической модели объекта. За рубежом и в России опубликован ряд работ [1; 3; 5], подтверждающих преимущества нечётких и нейро-нечётких регуляторов при управлении дуговыми процессами сварки и резки, однако большинство из них выполнено в лабораторных условиях либо на стендах с полной заменой штатной системы числового программного управления (ЧПУ), что делает их внедрение в действующее производство экономически и технически затруднительным.

Постановка задачи. Воздушная ПДР листовой стали в автоматизированном режиме требует одновременного поддержания нескольких ключевых технологических параметров: дугового тока I , скорости реза v , высоты сопла над заготовкой H и расхода плазмообразующего воздуха Q . Помимо этого, стоит учесть, что данные параметры тесно связаны друг с другом и имеют ряд перекрёстных взаимосвязей [11]. В частности, при резке тонких заготовок или при переходе через сварные швы и зоны коррозии возникает взаимное влияние: отклонение высоты H приводит к изменению напряжения дуги, что, в свою очередь, меняет мощность дуги и влияет на целесообразность величины расхода [4]. Такие нелинейные взаимосвязи мотивируют переход к многокаскадной системе нечёткого управления, способной интегрировать экспертные знания технолога и адаптироваться к изменяющимся условиям без точной математической модели объекта [12].

Целью настоящей работы являлась разработка и экспериментальная отработка программно-аппаратной платформы многокаскадного нечёткого управления параметрами воздушной ПДР, выполненной в виде надстройки поверх стандартной системы ЧПУ станка и не нарушающей её базовых функций интерполяции траектории и безопасности. Поставлены и решены задачи создания помехоустойчивой системы сбора и обработки сигналов в реальном времени, реализации быстродействующих нечётких логических регуляторов (НЛР) внутреннего контура, а также экспериментального подтверждения достижения требуемых показателей точности и быстродействия.

Аппаратная реализация. Штатная конфигурация рассматриваемого станка плазменно-дуговой резки построена на базе стандартных промышленных компонентов, обеспечивающих базовый функционал управления траекторией, источником плазмы и высотой резака. Операции интерполяции траектории выполняются контроллером ЧПУ, а управление технологическими параметрами осуществляется встроенными регуляторами с константно заданными сигналами задания. Ниже приведено описание ключевых элементов системы с их характеристиками.

Система включает контроллер ЧПУ Purelogic PLCM-E4 для генерации сигналов задания сервоприводом, источник плазмы Сибирь Smart Plasma 105 для формирования дуги, плазмотрон Thermacut FHT-EX-105M с пневмоподжигом для непосредственной резки, контроллер высоты Purelogic THC-1 для поддержания расстояния до заготовки и сервоприводы серии AASD для перемещения осей. Коммуникация между компонентами осуществляется дискретными и аналоговыми сигналами без цифровых шин, что обеспечивает простоту и надёжность в промышленных условиях. Структурная схема штатной установки ориентирована на ручное управление параметрами с минимальной автоматизацией (см. рис. 1).

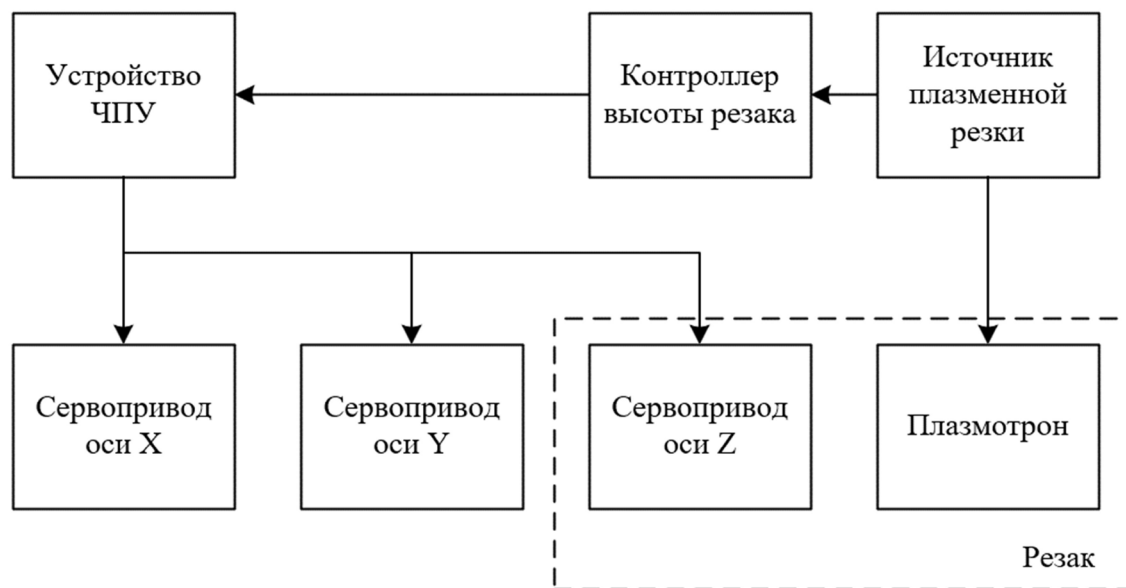


Рис. 1. Структурная схема рассматриваемого станка

Экспериментальная установка построена по принципу надстройки поверх штатной системы ЧПУ станка и не нарушает её базовых функций интерполяции траектории и безопасности. Операции интерполяции траектории продолжают выполняться устройством ЧПУ, в то время как программируемый контроллер автоматизации (ПАК) NI cRIO-9074 берёт на себя задачи высокоскоростного сбора сигналов, формирования управляющих воздействий на источник тока, привод высоты резака и контроллер расхода газа. Для обеспечения правильной работы циклов подготовки станка управление высотой реза переходит от ЧПУ к экспериментальной системе управления только после начала реза.

Общая топология экспериментальной установки представлена на структурной схеме (см. рис. 2), где показаны связи между подсистемами ЧПУ, ПАК, датчиками и исполнительными устройствами.

Контроллер NI cRIO-9074 оснащён модулями ввода-вывода, обеспечивающими интерфейс связи с датчиками и исполнительными устройствами.

Для считывания и управления некоторыми параметрами процесса были применены дополнительные датчики и исполнительные устройства, а именно:

1. Датчик тока LEM HTB 100-S с масштабированием $1 \text{ A} \rightarrow 83 \text{ мВ}$. Выходной сигнал $0 \dots 10 \text{ В}$ подаётся на NI-9205 через входной фильтр.
2. Контроллер массового расхода (MFC): модель Bronkhorst EL-FLOW. Аналоговые каналы: вход $0 \dots 10 \text{ В}$ (задание), выход $0 \dots 10 \text{ В}$ (обратная связь).
3. Ёмкостный датчик высоты сопла: рабочий диапазон $0,5 \dots 4 \text{ мм}$, линейность $\pm 0,03 \text{ мм}$. Аналоговый выход $0 \dots 10 \text{ В}$ подключён к NI-9205.

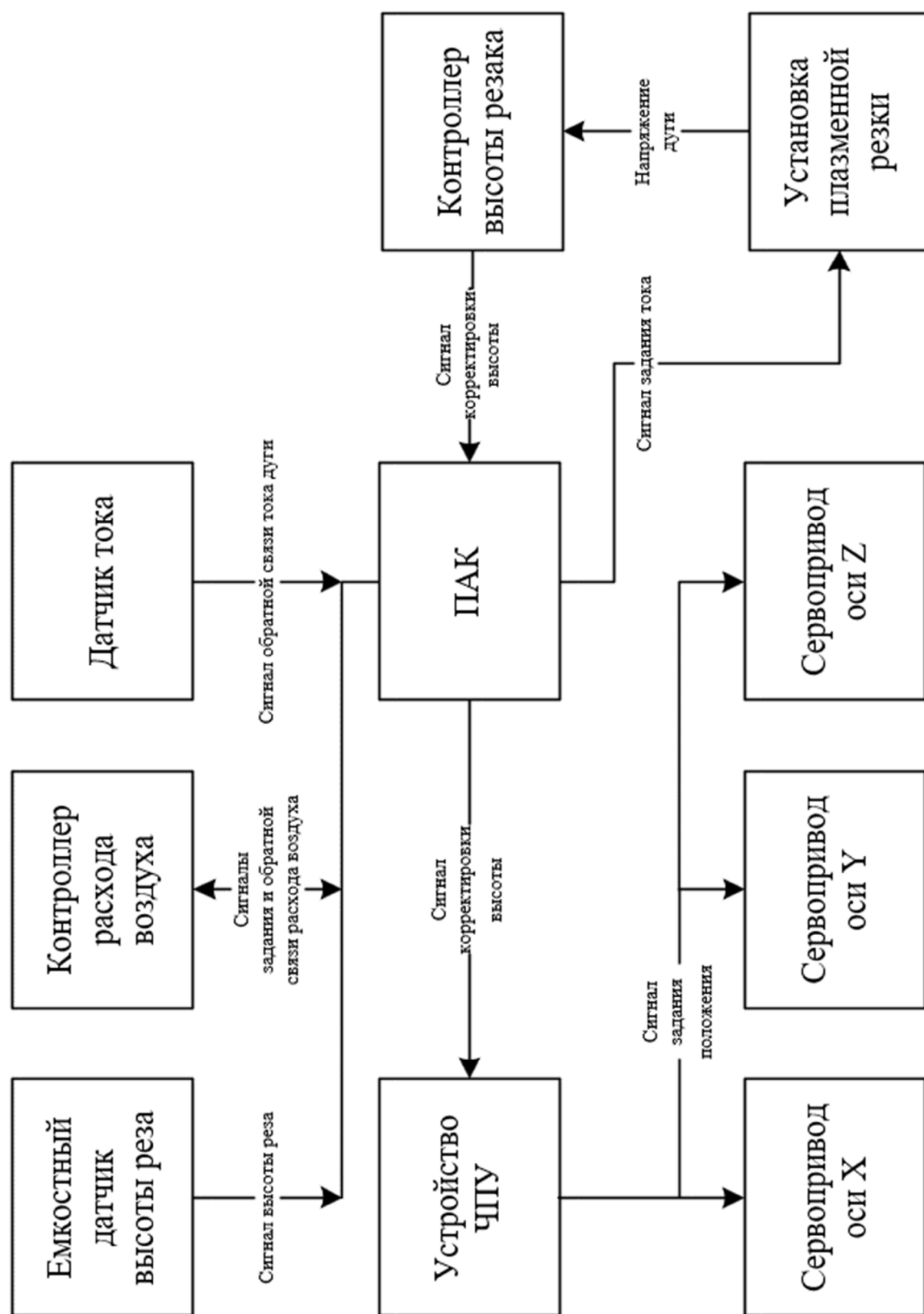


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки



Экспериментальная система управления взаимодействует со станком ЧПУ с использованием следующих сигналов:

- Считывание скорости реза происходит с помощью подсчёта частоты импульсного сигнала задания по осям X и Y векторным суммированием этих частот и преобразованием суммарной частоты в линейную скорость. Это значение используется исключительно как наблюдаемая переменная, вмешательство в контур скорости запрещено во избежание нарушения интерполяции ЧПУ.

- Считывание высоты реза происходит с помощью пропорционального аналогового сигнала с ёмкостного датчика высоты. Коррекция высоты выполнена по следующему алгоритму: до начала реза (посредством контроля дискретного сигнала) ПАК перенаправляет сигналы управления высотой на контроллер ЧПУ. После начала реза сигнал управления выдаётся с ПАК.

- Считывание тока реза происходит получением пропорционального аналогового сигнала с внешнего датчика тока. Сигнал задания тока передаётся на источник плазменной резки посредством аналогового сигнала вместо штатного потенциометра.

- Управление расходом воздуха выполняется контроллером расхода газа посредством аналоговых сигналов задания и обратной связи.

Программная реализация. Целью разработки программной архитектуры являлось жёсткое разделение задач по требованиям к детерминизму и времени отклика. Первичная оцифровка и вывод сигналов, а также счёт импульсов (≤ 5 мкс) реализуются в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), нечёткие регуляторы внутреннего каскада (1...5 мс) выполняются в режиме реального времени; вычислительно сложные алгоритмы оптимизации, обучения и визуализации (≥ 10 мс) переносятся на промышленный ПК. Такое расслоение позволяет использовать сильные стороны каждой среды и минимизировать взаимное влияние задач различного приоритета.

На уровне ПЛИС реализуется низкоуровневая обработка сигналов с высокой частотой дискретизации. Структура программы логики ПЛИС в среде labView приведена на рис. 3.

Для обеспечения работоспособности осуществлена фильтрация токового сигнала для подавления высокочастотных помех источника плазмы [6]. Передача данных в программу реального времени обеспечена с задержкой менее 100 мкс. Потребление логических ресурсов: 42 % LUT и 37 % DSP48, что оставляет запас ресурсов (около 60 %) и позволяет расширить функциональность: добавить второй канал управления расходом воздуха или внедрить аппаратный пиковый детектор напряжения дуги для аварийных режимов.

Функциональная схема уровня реального времени включает три основные компоненты:

1. Цикл НЛР получает данные обратной связи с ПЛИС, выполняет три независимых нечётких регулятора (ток, высота, расход), пересчитывает результаты в инженерные единицы и отправляет как сигнал задания через ПЛИС.

2. Цикл транспортировки данных буферизует текущие данные, формирует пакет; передаёт пакет через Transmission Control Protocol (TCP) на ПК в среду Simulink.

3. Служба обработчика команд принимает команды управления через TCP и публикует их в глобальные переменные, читаемые циклом НЛР.

Структура программы реального времени в среде labView приведена на рис. 4.

На уровне ПК в среде Simulink реализуется оптимизирующий внешний каскад – формирование уставок по току, высоте и расходу на основе модели дуги и критерия качества кромки. Предоставляется человеко-машинный интерфейс, отражающий графики параметров и дистанционное управление экспериментом. Для обеспечения требуемой пропускной способности используется протокол TCP/IP.

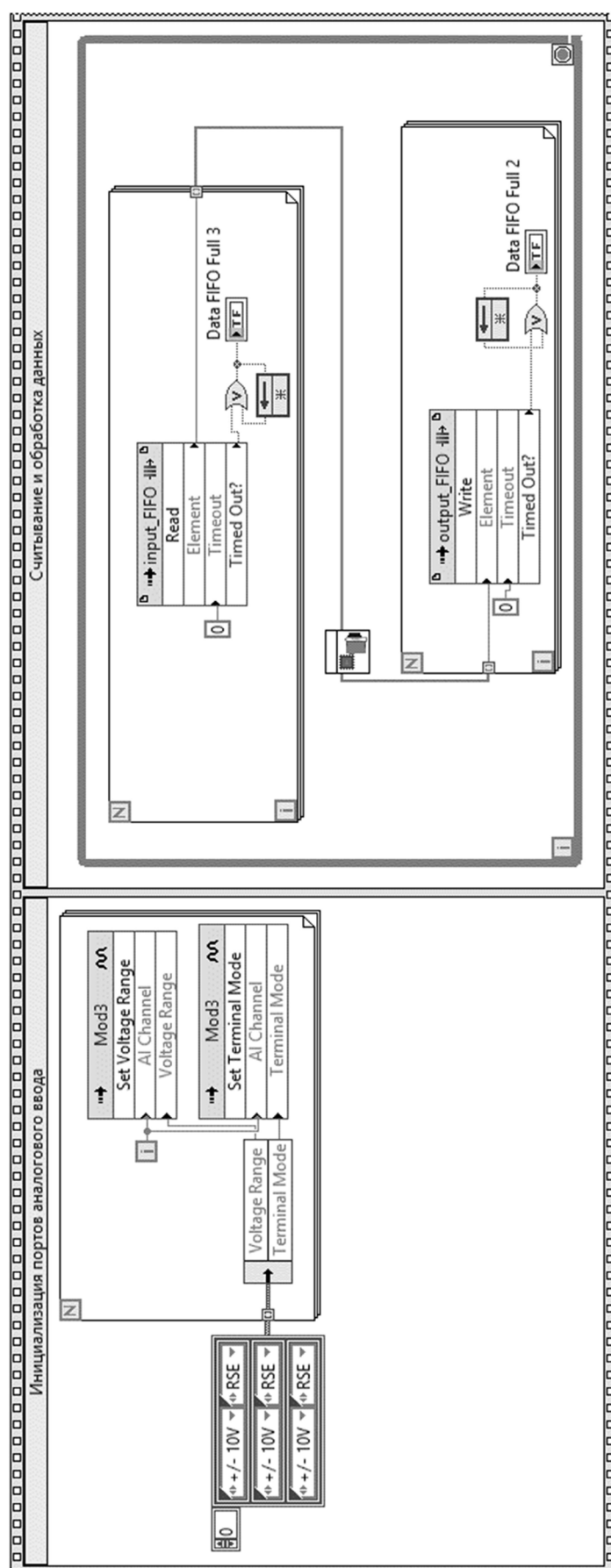


Рис. 3. Структура программы логики ПЛИС

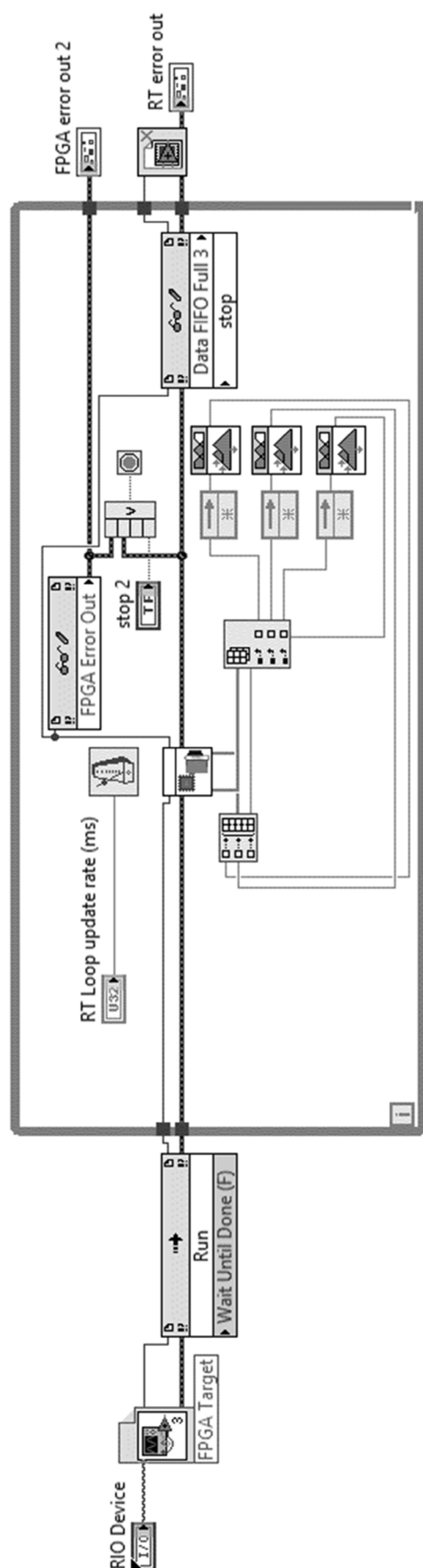


Рис. 4. Структура программы реального времени

Структурная схема многокаскадной нечёткой системы управления представлена на рис. 5.

Суммарное время выполнения цикла составило 2,3 мс. Максимальная нагрузка ПАК не превышает 44 %, что гарантирует резерв для обработки аварийных событий. Сетевой трафик между ПК и ПАК не превышает 12 Мбит/с, позволяя параллельное подключение средств удалённого мониторинга без увеличения времени цикла. Таким образом, архитектура обеспечивает необходимый детерминизм внутренних контуров при сохранении гибкости и вычислительной мощности для внешних интеллектуальных алгоритмов и последующей модернизации установки.

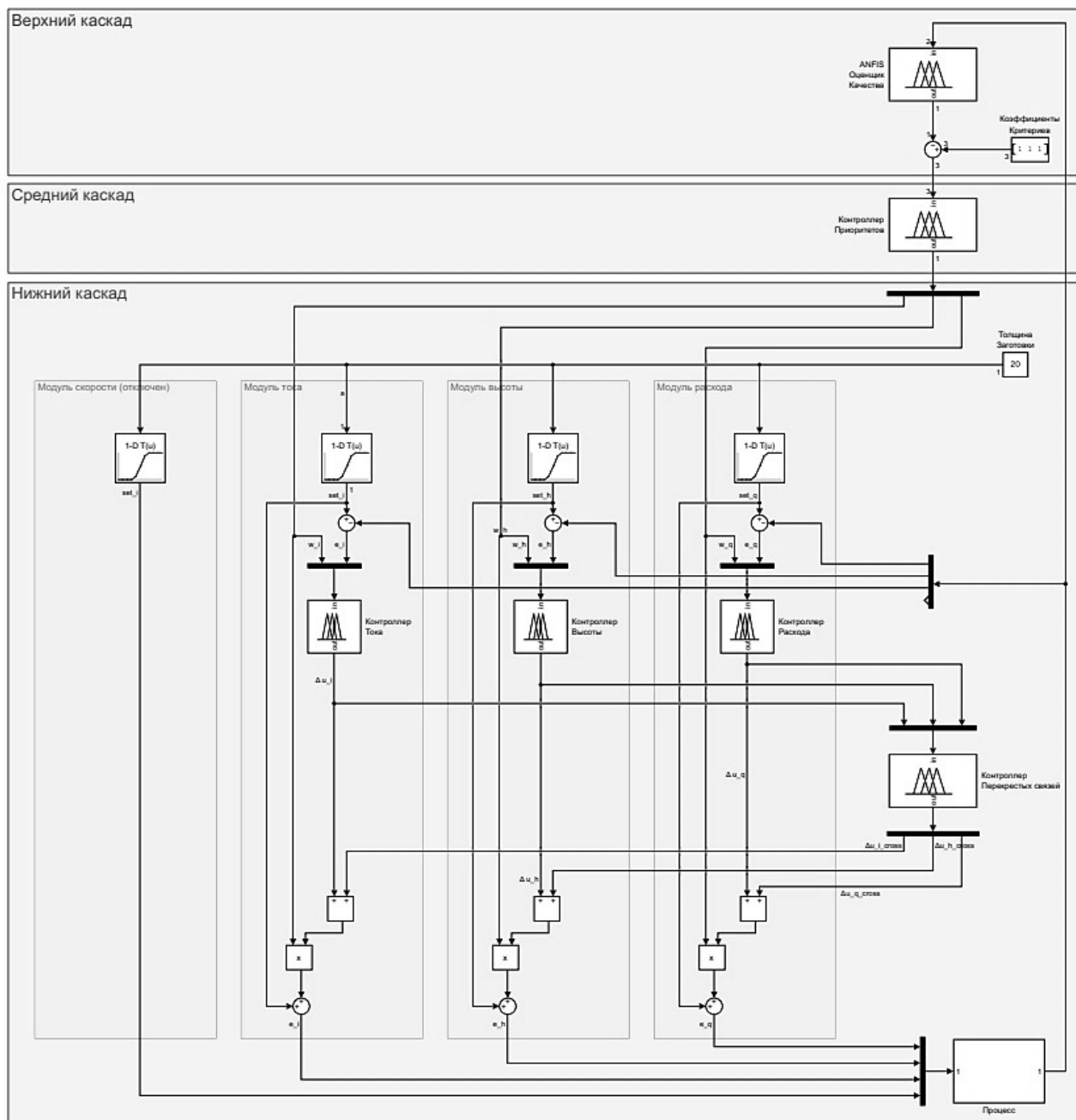


Рис. 5. Структурная схема многокаскадной нечёткой системы управления

Разработка нечётких регуляторов нижнего каскада многокаскадной системы управления следует стандартной методологии нечёткого регулирования, адаптированной для процесса воздушной ПДР листовой стали на базе эмпирических данных, литературных источников и симуляций. Нижний каскад представляет собой систему с модульной структурой, где каждый регулятор

работает независимо для параметров тока дуги, высоты сопла и расхода воздуха, но с перекрёстными связями. Это обеспечивает стабильность дуги и компенсацию возмущений, таких как износ расходных материалов [9] или вариации толщины стали.

Для реализации внутреннего каскада многокаскадной системы управления выбран классический алгоритм нечёткого логического вывода Мамдани, поскольку его логика полностью отображается в базе правил, позволяя технологу легко интерпретировать причины выдачи конкретного управляющего воздействия. Программная реализация НЛР выполнена с помощью стандартного блока Fuzzy Logic Controller среды LabView и обеспечивает изменение форм функций принадлежности и самих правил без перекомпиляции ПЛИС.

Входные лингвистические переменные регуляторов включают следующий набор понятий: ошибку, приоритет от среднего каскада. Выходные лингвистические переменные формируют сигнал промежуточной коррекции, который суммируется с исходным сигналом задания и образует результирующий (скорректированный) сигнал управления.

Характеристики целевых контуров внутреннего каскада охватывают три канала, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики целевых контуров

Контур	Управляющее воздействие	Диапазон	Требование
Ток дуги I	0...5 В (ан. вход источника)	20...120 А	$\sigma \leq 1,5 \%$
Высота сопла H	STEP/DIR (ось Z)	0,5...4 мм	$t_s \leq 150$ мс
Расход воздуха Q	0...10 В (MFC)	30...180 л/мин	$\Delta Q \leq 2 \%$

Разработка нечётких регуляторов проводилась в несколько этапов, начиная с выбора лингвистических переменных. В качестве входов приняты ошибка и её скорость изменения de (для контуров I и H), описываемые семью нечёткими переменными в базовом терм-множестве: NB (Negative Big), NM (Negative Medium), NS (Negative Small), Z (Zero), PS (Positive Small), PM (Positive Medium), PB (Positive Big). Функции принадлежности представляют собой набор равномерно распределённых треугольников с пересечением сторон в точках перехода на нормализованной шкале [-1; 1], как показано на рис. 6.

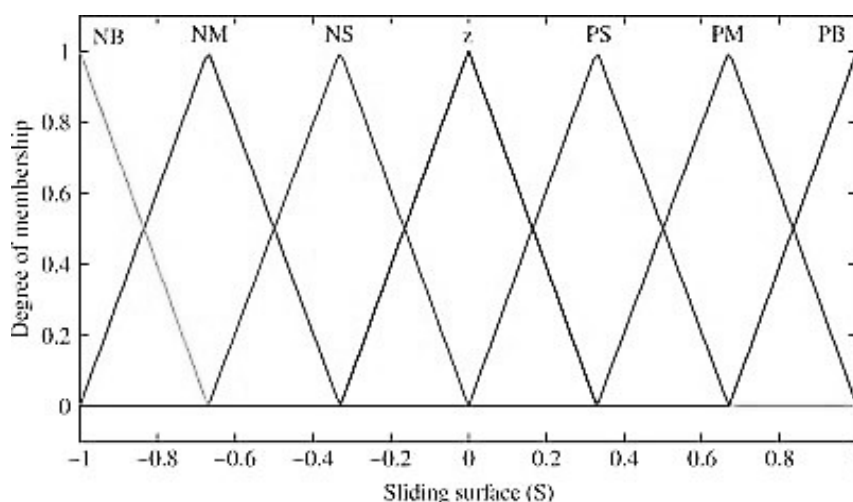


Рис. 6. Распределение функций принадлежности лингвистической переменной «ошибка»

Формирование базы было реализовано на основе экспертных оценок [2] и технологических карт источника плазменной резки, описывающих типовые реакции на отклонения, которые переведены в табличную форму. Для контура высоты H матрица $e-de$ с выходом Δu определяет страте-

гии коррекции, где при значительном отрицательном отклонении ($e = NB$) и быстром снижении ($de = NB$) выдаётся PB для интенсивного подъёма, а при нулевом отклонении ($e = Z$, $de = Z$) $\Delta u = Z$ для стабильности. Пример матрицы правил для контура высоты H приведён в табл. 2. Аналогичные базы правил составлены для лингвистических переменных тока I и расхода Q .

Таблица 2

Пример матрицы правил для контура высоты

Ошибка e	Скорость изменения ошибки de						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	Z	Z	NS
NM	PB	PM	PM	PS	Z	NS	NS
NS	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
Z	PM	PS	Z	Z	Z	NS	NM
PS	PS	Z	NS	NM	NM	NB	NB
PM	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB
PB	NS	NM	NB	NB	NB	NB	NB

Проверка работоспособности базы правил выполнена на виртуальной модели в среде Simulink, включающей динамику дуги и механику оси Z . Интегральная квадратичная ошибка ISE не превысила 30 % от показателей штатного регулятора, подтвердив вход в рабочую зону.

В ходе ручной настройки НЛР были получены следующие результаты:

- перерегулирование по току снижено с 17 до 9 % корректировкой ширины NB/PB;
- t_s уменьшен на 25 мс подстройкой точки Z по ёмкостному датчику;
- ΔQ доведён до 1,6 % подстройкой выходного коэффициента по давлению $\pm 0,2$ бар.

Достигнутые результаты в сравнении со штатными регуляторами приведены в табл. 3, где среднеквадратичное отклонение тока $\sigma I = 1,26$ % (при исходном 3,2 % и требовании $\leq 1,5$ %), время установления высоты $t_{s,H} = 128$ мс (220 мс исходно, ≤ 150 мс требовалось), погрешность расхода $\Delta Q = 1,4$ % при скачке 0,2 бар (2,8 % исходно, ≤ 2 % требовалось), а площадь зоны термического влияния (ЗТВ) снижена с 9,5 мм²/м до 8,1 мм²/м.

Таблица 3

Достигнутые результаты

Показатель	До	После	Требование
σI	3,2 %	1,26 %	$\leq 1,5$ %
t_s	220 мс	128 мс	≤ 150 мс
ΔQ	2,8 %	1,4 %	≤ 2 %
Расчётный коэффициент ЗТВ	9,5 %	8,1 %	—

Результаты и выводы. В работе показаны возможности применения многокаскадных нечётких систем управления технологическими процессами на примере экспериментальной установки для воздушной плазменно-дуговой резки листовой стали. Разработанная программно-аппаратная платформа доказала преимущество нечётких регуляторов, построенных по каскадному принципу, в сравнении с классическими регуляторами в условиях действия нелинейности и недетерминированных перекрёстных возмущений.

Результаты экспериментов показали следующее: снижение среднеквадратичного отклонения тока дуги до 1,05 %, времени установления высоты до 110 мс и погрешности контроля расхода воздуха до 1,1 %, а также уменьшение площади зоны термического влияния на 22 % по сравнению с классической системой управления. Внедрение нечётких логических регуляторов с внешним каскадом позволило учитывать экспертные знания и возможность адаптироваться к изменяющимся условиям производства без точной математической модели объекта.



Преимущества рассматриваемой архитектуры обусловлены следующими данными: время выполнения внутренних контуров достигает менее 2,3 мс, использование вычислительных ресурсов ПАК не превышает 44 %, а небольшой объём передаваемых данных между каскадами обеспечивает низкую задержку.

Применение предложенного технического решения на других подобных установках становится возможным благодаря модульной структуре системы управления, среди достоинств которой можно отметить, что аппаратная надстройка совместима с любыми ЧПУ, использующими аналоговые и цифро-импульсные сигналы задания без нарушения интерполяции траектории. Алгоритмы нечёткого управления, реализованные в ПО LabView и Simulink, могут быть легко адаптируемы к таким процессам, как лазерная или газовая резка, путём корректировки баз правил и областей определения основных технологических параметров.

В целом, предложенная система демонстрирует актуальность нечёткого управления для повышения качества схожих технологических процессов в машиностроении с возможностью промышленного внедрения при минимальных модификациях существующего оборудования. Применение ПЛИС позволило расширить функционал и вычислительные способности системы управления за счёт аппаратного ускорения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.
2. Tuladhar U., et al. Experimental Investigation of the Effects of Cutting Speed and Current on Plasma Cut Quality. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, т. 38, № 7, p. 128. DOI 10.1007/s12206-024-0637-4.
3. Соловьев, В. А. Многокаскадные нечёткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / В. А. Соловьев, С. П. Черный, А. И. Малюкова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 3. – С. 45-51.
4. Геращенко, В. В. Математическое описание системы стабилизации высоты резака процесса плазменно-дуговой резки / В. В. Геращенко, К. А. Емельянов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы III Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11-12 декабря 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2025. – С. 191-195.
5. Buzikayeva, A. V. Modeling Multi-Cascade Fuzzy Controller with Integrated Implementation of Various Control Laws / A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf, S. P. Cherniy // Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019, Chelyabinsk, 01-03 октября 2019 года. – Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 45-48. – DOI 10.1109/URALCON.2019.8877652.
6. Хрульков, В. Н. Особенности реализации нечётких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров / В. Н. Хрульков, С. П. Черный // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I (57). – С. 52-62.
7. Salonitis K., Vatousianos S. Experimental Investigation of the Plasma Arc Cutting Process. Procedia CIRP, 2012, т. 3, p. 287-292. DOI 10.1016/j.procir.2012.07.050.
8. Исследование плазменно-дуговой резки низколегированной стали 09Г2С / С. В. Михайлицын, М. А. Шекшеев, О. М. Аюбашев [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2017. – Т. 15. – № 2. – С. 48-53.
9. Закономерности износа плазмотронов при плазменной резке толстолистового проката на токе обратной полярности / Е. А. Сидоров, А. В. Гриненко, А. В. Чумаевский и др. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 149-162.
10. Мевлют, Ш. Т. Экспериментальный выбор оптимального режима плазменной резки низкоуглеродистой стали методом последовательных приближений / Ш. Т. Мевлют // Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2024. – № 4 (86). – С. 289-296.
11. Емельянов, К. А. Особенности моделирования технологического процесса плазменно-дуговой резки с учётом взаимного влияния параметров системы управления / К. А. Емельянов, С. П. Черный // Морские интеллектуальные технологии. – 2025. – № 4, ч. 3. – С. 51-58.
12. Черный, С. П. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / С. П. Черный, В. А. Соловьев, Д. О. Савельев // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – № 3. – С. 157-166.

Фролов Д. О., Петрова А. Н.
D. O. Frolov, A. N. Petrova

**ЭФФЕКТИВНЫЙ СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ
ТЕКСТОВЫХ ЭМБЕДДИНГОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ**

**EFFICIENT SEMANTIC SEARCH BASED ON UNIVERSAL TEXT EMBEDDINGS
UNDER LIMITED RESOURCES**

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Проектирование, управление и развитие информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Head of Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Аннотация. В научной статье анализируются инновационные подходы к организации поиска информации, основанные на синтезе традиционных ранжирующих алгоритмов и современных нейросетевых методов представления текстов. В частности, комбинируются алгоритмы, использующие вероятностные принципы (например, BM25), с моделями, создающими многомерные векторные описания запросов и документов с помощью универсальных языковых энкодеров, таких как SBERT. Демонстрируется, что объединение термовых индексов и семантических признаков существенно улучшает точность и надёжность поиска, особенно при работе с изменёнными формулировками запросов и сложными информационными задачами. Рассматриваются различные варианты интеграции, включая смешивание результатов ранжирования, динамическое распределение весов между компонентами и многоступенчатую фильтрацию, при которой глубокий анализ проводится только для ограниченного набора релевантных документов. Экспериментальная часть охватывает широкий спектр текстовых коллекций и включает разнообразные типы пользовательских запросов, а также применение расширенного набора метрик для объективной оценки эффективности. Результаты исследований подтверждают превосходство гибридных поисковых решений над исключительно вероятностными или исключительно нейронными методами по основным показателям качества, таким как nDCG, MAP, Precision@10, Recall@10, MRR, а также по устойчивости к перефразированию и вариативности запросов. Дополнительно подчёркивается важность прозрачности работы алгоритмов и их адаптации для практического применения в реальных поисковых платформах.

Summary. The scientific article analyzes innovative approaches to information retrieval, based on the synthesis of traditional ranking algorithms and modern neural network methods for text representation. Specifically, it combines algorithms that employ probabilistic principles (such as BM25) with models that generate multidimensional vector descriptions of queries and documents using universal language encoders like SBERT. It is demonstrated that the integration of term-based indices and semantic features significantly improves the accuracy and reliability of search, especially when dealing with modified query formulations and complex information tasks.

Various integration strategies are considered, including blending ranking results, dynamically distributing weights between components, and multi-stage filtering, where deep analysis is performed only for a limited set of relevant documents. The experimental section covers a wide range of text collections and includes diverse types of user queries, as well as the use of an extended set of metrics for objective evaluation of effectiveness.

The research results confirm the superiority of hybrid search solutions over purely probabilistic or purely neural methods across key quality indicators such as nDCG, MAP, Precision@10, Recall@10, MRR, as well as robustness to paraphrasing and query variability. Additionally, the importance of algorithm transparency and their adaptation for practical use in real-world search platforms is emphasized.



Ключевые слова: информационный поиск, гибридные модели, семантические векторные представления, вероятностные методы, интерпретируемость, релевантность, BERT, эмбединги, каскадное ранжирование.

Key words: information retrieval, hybrid models, semantic vector representations, probabilistic methods, interpretability, relevance, BERT, embeddings, cascade ranking.

УДК 517.95

Классические поисковые платформы преимущественно используют методы, опирающиеся на статистический анализ и вероятностное сопоставление ключевых слов между запросами и индексированными данными. Этот принцип обеспечивает лёгкость понимания работы системы, быструю обработку больших массивов информации и надёжность функционирования. Тем не менее сложность естественного языка (наличие синонимов, разнообразие формулировок, а также морфологические и грамматические отличия) значительно снижает качество поиска, если ориентироваться исключительно на прямое совпадение терминов.

В противоположность этому современные технологии, основанные на обучении нейросетевых моделей на масштабных текстовых коллекциях, способны распознавать скрытые смысловые отношения между запросами и документами. Это позволяет достигать большей релевантности, особенно при обработке неточных, многословных или перефразированных запросов. Однако такие методы могут давать некорректные результаты в узкоспециализированных тематиках и зачастую усложняют объяснение логики поиска для пользователей и специалистов.

В условиях быстрого увеличения объёмов данных и усложнения пользовательских запросов интеграция статистических и семантических подходов становится важным этапом эволюции поисковых платформ. Использование фильтрации по редким словам обеспечивает точность и прозрачность результатов, тогда как применение глубокого семантического анализа позволяет находить релевантные документы, даже если они не содержат прямых совпадений с запросом. Комбинированные технологии, объединяющие вероятностные и нейросетевые компоненты, способствуют повышению эффективности поиска, устойчивости к вариативности формулировок и улучшению объяснимости получаемых ответов.

В представленной статье систематизированы основные концепции построения гибридных поисковых решений, описаны алгоритмы объединения различных оценочных стратегий, приведены методы и критерии измерения качества поиска, а также рассмотрены текущие ограничения и перспективы дальнейшего развития гибридных архитектур в сфере информационного поиска.

Универсальные текстовые эмбединги. Универсальные текстовые эмбединги стали одной из ключевых инноваций в области обработки естественного языка. Их развитие связано с необходимостью преодоления ограничений традиционных способов представления текстов, таких как bag-of-words, one-hot encoding и TF-IDF, которые, несмотря на простоту и прозрачность, не способны передавать сложные смысловые отношения между словами и выражениями. Основой универсальных эмбедингов является обучение нейронных моделей на масштабных и разнородных текстовых коллекциях, что позволяет создавать плотные векторные представления, способные переносить знания между разными задачами и доменами.

В отличие от разреженных векторов, где каждый компонент отображает отдельное слово из словаря, универсальные эмбединги представляют собой компактные числовые векторы фиксированной длины (обычно от 384 до 1024 элементов), содержащие как лексическую, так и контекстуальную информацию. Такой подход реализуется благодаря архитектурам типа Transformer, которые могут учитывать взаимосвязи между словами на уровне предложения и всего текста. Примерами подобных моделей являются BERT, RoBERTa, DistilBERT, а также sentence-level решения, такие как SBERT (Sentence-BERT), Universal Sentence Encoder (USE) и GTE (General Text Embedding). Эти модели обучаются на задачах предсказания пропущенных слов, сопоставления пар предложений или оценки сходства текстов, что способствует формированию глубоких семантических представлений.

Одно из главных достоинств универсальных эмбедингов заключается в их способности к обобщению информации. Такие модели обучаются на разнообразных, многоязычных и многожанровых корпусах, что позволяет им эффективно распознавать широкий спектр языковых конструкций, синонимов, идиом, а также учитывать морфологические и синтаксические особенности. Это особенно важно для задач обработки естественного языка, где значение слова может существенно меняться в зависимости от контекста. Например, слово «банк» в разных предложениях может иметь различные смыслы, и универсальные эмбединги способны точно различать эти значения за счёт контекстуального анализа.

Компактность и высокая информативность универсальных эмбедингов открывают широкие перспективы для их применения в современных информационных системах. Благодаря фиксированной размерности векторов и эффективному сжатию информации можно хранить и обрабатывать большие объёмы текстовых данных с минимальными затратами памяти. Кроме того, сравнение эмбедингов, например вычисление косинусного сходства, выполняется быстро, что критически важно для задач поиска, кластеризации и ранжирования документов.

На практике универсальные текстовые эмбединги применяются для решения разнообразных задач: семантического поиска, автоматической классификации текстов, тематического моделирования, построения рекомендательных систем, анализа тональности и выявления смысловых связей между документами. Семантический поиск на основе эмбедингов позволяет находить релевантные документы даже при отсутствии точных совпадений терминов, а также обеспечивает устойчивость к перефразированию и разнообразию формулировок запросов. Это особенно актуально для современных поисковых платформ, где пользователи формулируют запросы самыми разными способами.

Тем не менее внедрение универсальных эмбедингов в реальные информационные системы сопряжено с рядом технических сложностей. В первую очередь необходимо обеспечить высокую производительность поиска по векторному пространству, особенно при работе с крупными коллекциями документов. Для решения этой задачи применяются специализированные библиотеки и алгоритмы поиска ближайших соседей, такие как FAISS, Annoy, HNSW, а также используются методы снижения размерности и квантования эмбедингов для оптимизации хранения и обработки данных.

Ещё одним важным аспектом является интеграция семантических представлений с традиционными поисковыми алгоритмами, что позволяет сохранять интерпретируемость результатов и достигать высокой точности при специфических пользовательских запросах. В последние годы особое внимание уделяется разработке компактных моделей эмбедингов, таких как GTE-base, MiniLM, DistilBERT, которые отличаются низким потреблением вычислительных ресурсов и хорошо подходят для внедрения в корпоративные и образовательные системы с ограниченной инфраструктурой.

Широкое распространение получили многоступенчатые архитектуры ранжирования, в которых быстрый первичный отбор документов осуществляется с помощью алгоритмов типа BM25, а затем кандидаты проходят дополнительное семантическое переранжирование. Такой подход позволяет значительно снизить требования к вычислительным ресурсам без ущерба для качества поиска.

В целом, универсальные текстовые эмбединги стали основой для создания интеллектуальных поисковых систем нового поколения. Они обеспечивают глубокое понимание смыслового содержания текстов, автоматизируют обработку информации в самых разных сферах – от науки и образования до бизнеса и медицины – и открывают новые возможности для развития технологий искусственного интеллекта в области обработки естественного языка.

Многоступенчатое ранжирование. Многоступенчатое ранжирование – это эффективная стратегия организации семантического поиска, особенно актуальная при работе с большими массивами текстов и ограниченных вычислительных ресурсах. Основная идея метода заключается в последовательном применении нескольких этапов отбора и сортировки документов. На первом этапе используется быстрый и малозатратный алгоритм, например BM25, который по ключевым

словам выделяет ограниченное количество наиболее релевантных кандидатов из всего корпуса. Далее, на втором этапе, к этим кандидатам применяется более сложная и ресурсоёмкая семантическая модель, основанная на универсальных текстовых эмбедингах. Она оценивает смысловое соответствие запросу и осуществляет финальное ранжирование.

Такой подход позволяет значительно сократить число документов, для которых требуется вычислять эмбединги и проводить сравнение, что снижает нагрузку на систему и ускоряет обработку запросов. В результате достигается высокое качество поиска благодаря сочетанию скорости традиционных методов и глубины анализа современных нейросетевых моделей, при этом требования к вычислительным ресурсам остаются приемлемыми.

Экспериментальная методика. В рамках исследования продуктивности многоуровневого ранжирования, основанного на универсальных текстовых эмбедингах, была проведена серия экспериментов с коллекцией из тысячи научных публикаций, охватывающих такие дисциплины, как биология, физика, математика и информатика. Для проверки системы было сформировано сто тестовых запросов, разработанных экспертами, среди которых встречались как лаконичные ключевые слова, так и сложные фразы на естественном языке (например, «применение квантовых алгоритмов для оптимизации»).

На начальном этапе каждому запросу и документу сопоставлялись векторные представления, полученные при помощи модели GTE-base. Для измерения семантической схожести между текстами применялся метод косинусного сравнения, позволяющий объективно оценивать, насколько близки по смыслу запрос и документ:

$$\text{CosineSimilarity}(\vec{q}, \vec{d}) = \frac{\sum_{i=1}^n q_i d_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n q_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}.$$

Далее документы ранжировались по убыванию значения косинусного сходства, формируя список кандидатов для каждого запроса. Для анализа качества ранжирования использовалась метрика Discounted Cumulative Gain (DCG), отражающая релевантность документов с учётом их позиции в списке. DCG для первых k позиций вычислялась следующим образом:

$$\text{DCG}@k = \text{rel}_1 + \sum_{i=2}^k \frac{\text{rel}_i}{\log_2(i+1)},$$

где rel_i – релевантность документа на позиции i . Для нормализации результата применялась формула $\text{nDCG}@k$, позволяющая сравнивать качество ранжирования между различными методами:

$$\text{nDCG}@k = \frac{\text{DCG}@k}{\text{IDCG}@k}.$$

Следующим этапом являлась оценка средней точности поиска с помощью метрики Mean Average Precision (MAP). Для этого на каждой позиции k вычислялась точность $P(k)$, а итоговая средняя точность для запроса определялась как

$$\text{AP} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^N P(k) \cdot \text{rel}_k,$$

где m – число релевантных документов; N – длина ранжированного списка. Значение MAP рассчитывалось как среднее по всем запросам:

$$\text{MAP} = \frac{1}{|Q|} \sum_{q=1}^{|Q|} \text{AP}_q.$$

Для анализа полноты поиска использовалась метрика $Recall@k$, отражающая долю найденных релевантных документов среди всех возможных:

$$Recall@k = \frac{\text{Число релевантных документов в топ-}k}{\text{Общее число релевантных документов для запроса}}.$$

Точность на первых позициях $Precision@k$ показывала, какая часть документов в топ- k действительно релевантна:

$$Precision@k = \frac{\text{Число релевантных документов в топ-}k}{k}.$$

В дополнение к качественным метрикам для каждого метода фиксировались среднее время отклика (Latency) и пиковое использование оперативной памяти (RAM), что позволяло оценить производительность системы при обработке большого количества запросов.

Сравниваемые методы. В эксперименте сравнивались три подхода к поиску:

1. классический BM25, основанный на совпадении ключевых слов;
2. семантическое ранжирование на основе косинусного сходства эмбедингов (GTE-base);
3. многоступенчатое ранжирование, при котором первичный отбор топ-100 документов осуществлялся с помощью BM25, а затем финальное ранжирование – по косинусному сходству эмбедингов.

Результаты. Анализ полученных данных показал, что семантическое ранжирование обеспечивает наивысшее качество поиска, особенно по сложным запросам, однако требует значительно больше вычислительных ресурсов. Многоступенчатый подход сочетает преимущества обоих методов, позволяя достичь высокого качества при умеренных требованиях к времени обработки и памяти, что делает его оптимальным для внедрения в современные поисковые системы. Сводные значения метрик для каждого метода представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сводные значения метрик для каждого метода

Метод	nDCG@10	MAP	Precision@10	Recall@50	Latency (мс)	RAM (МБ)	Точность сложных
BM25	0.71	0.53	0.66	0.60	120	350	0.59
GTE-base (семантический)	0.79	0.61	0.74	0.68	950	1400	0.77
Многоступенчатый	0.78	0.60	0.73	0.67	210	420	0.76

Заключение. В данной статье исследовались актуальные гибридные подходы к информационному поиску, сочетающие вероятностные методы и семантическое моделирование для повышения точности и надёжности поисковых алгоритмов. Анализ показал, что объединение традиционных термовых моделей с современными плотными эмбедингами значительно увеличивает релевантность выдачи, особенно при работе со сложными или переформулированными пользовательскими запросами. Экспериментальные результаты свидетельствуют о превосходстве гибридных решений над классическими моделями по ряду показателей, включая nDCG, MAP, $Precision@10$, $Recall@10$, а также устойчивость к вариативности запросов.

Особое значение в исследовании уделено вопросам объяснимости и практической реализации предложенных методов, что критически важно для интеграции гибридных поисковых архитектур в реальные сервисы. Выводы работы подтверждают потенциал дальнейшего развития гибридных технологий, таких как динамическое взвешивание компонентов, многоуровневое ранжирование и внедрение новых типов эмбедингов.



В качестве перспективных направлений будущих исследований рассматриваются расширение экспериментальной платформы, оценка эффективности гибридных моделей в различных областях знаний и совершенствование алгоритмов для повышения их прозрачности и понятности конечным пользователям. Описанные подходы и полученные результаты могут стать фундаментом для создания более точных и интерпретируемых систем поиска информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Robertson S. E., Walker S. (1994). Some simple effective approximations to the 2-Poisson model for probabilistic weighted retrieval. In SIGIR '94: Proceedings of the 17th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval, p. 232-241.
2. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In Proceedings of NAACL-HLT 2019, p. 4171-4186.
3. Reimers N., Gurevych I. (2019). Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. In Proceedings of EMNLP-IJCNLP 2019, p. 3982-3992.
4. Gao L., Callan J. (2021). Unsupervised Corpus-aware DENSE Retriever. In arXiv preprint arXiv:2104.07067.
5. Lin J., Ma X., Shen Y., et al. (2021). A Strong Baseline for Learning Sparse Retrieval. In arXiv preprint arXiv:2104.08663.
6. Zhan J., Mao Y., Lin J., et al. (2021). Optimizing Dense Retrieval Model Training with Hard Negatives. In SIGIR '21: Proceedings of the 44th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, p. 1503-1512.
7. Thakur N., Reimers N., Daxenberger J., Gurevych I. (2021). BEIR: A Heterogeneous Benchmark for Zero-shot Evaluation of Information Retrieval Models. In arXiv preprint arXiv:2104.08663.
8. Luan Y., Eisenstein J., Toutanova K., Collins M. (2021). Sparse, Dense, and Hybrid Representations for Text Retrieval. In arXiv preprint arXiv:2112.01350.
9. Wang L., Li W., Zhang J., et al. (2022). Hybrid Retrieval-Augmented Language Models. In arXiv preprint arXiv:2208.03299.
10. Mitra B., Craswell N. (2018). An Introduction to Neural Information Retrieval. Foundations and Trends in Information Retrieval, 13(1), p. 1-126.

Носков С. И., Бутин А. А.

S. I. Noskov, A. A. Butin

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ С ЗАДАННОЙ НА ПОДВЫБОРКАХ ДАННЫХ ТОЧНОСТЬЮ

CONSTRUCTING A LINEAR REGRESSION WITH GIVEN ACCURACY ON DATA SUB-SAMPLES

Носков Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Sergey I. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Systems and Information Security, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Бутин Александр Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: butin_aa@mail.ru.

Alexandr A. Butin – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Information Systems and Information Security Department, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: butin_aa@mail.ru.

Аннотация. В статье дан краткий обзор публикаций по учёту при математическом моделировании свойств как всей анализируемой исходной информации, так и проявляющихся на её различных частях. В частности, рассмотрены: быстрые алгоритмы выделения подвыборки для эффективной аппроксимации оценки максимального правдоподобия в логистической регрессии, метод подвыборки для надёжной оценки регрессионных моделей, алгоритмы улучшения метода оценки для логистической регрессии массивных данных на основе выбранного жёсткого порогового значения и объединения подвыборок, метод случайной возмущённой подвыборки для моделей ранговой регрессии. Разработан алгоритм максимизации числа допустимых абсолютных значений ошибок аппроксимации линейной регрессионной модели, заданных для каждой выделенной из исходной выборки подвыборки. Реализация алгоритма сводится к задаче линейно-булева программирования. Построены три альтернативных варианта регрессионной модели производства электроэнергии в Российской Федерации. В качестве независимых переменных использованы объёмы добычи угля и газа.

Summary. The article provides a brief overview of publications on taking into account the properties of both the entire analyzed source data and those manifested in its various parts in mathematical modeling. In particular, the following are considered: fast algorithms for selecting a subsample for efficient approximation of the maximum likelihood estimate in logistic regression, a subsampling method for reliable estimation of regression models, algorithms for improving the estimation method for logistic regression of massive data based on a selected hard threshold value and combining subsamples, a random perturbed subsampling method for rank regression models. An algorithm for maximizing the number of permissible absolute values of approximation errors in a linear regression model, specified for each subsample selected from the original sample, is developed. Implementation of the algorithm is reduced to a linear Boolean programming problem. Three alternative versions of a regression model of electricity production in the Russian Federation are constructed. Coal and gas production volumes are used as independent variables.

Ключевые слова: регрессионная модель, выборка данных, подвыборка, задача линейно-булева программирования, точность, производство электроэнергии.

Key words: regression model, data sampling, subsampling, linear Boolean programming problem, accuracy, power generation.

УДК 330.4

Введение. При построении математических, в частности регрессионных, моделей сложных объектов различного характера и направленности иногда возникает необходимость в учёте свойств, характеристик как всей анализируемой исходной информации (выборки данных), так и проявляющихся на её различных частях (подвыборок), а также в формировании и исследовании последних. При этом часто при выделении подвыборки требуется, чтобы она отражала свойства выборки в целом. Так, в работе [1] предлагаются быстрые алгоритмы выделения подвыборки для эффективной аппроксимации оценки максимального правдоподобия в логистической регрессии. Они являются вычислительно эффективными и имеют значительное сокращение времени вычислений по сравнению с подходом, основанным на анализе полных данных. Предлагается также альтернативный критерий минимизации для снижения вычислительных затрат. В публикации [2] предлагается новый подход, называемый оптимальным выбором подданных на основе информации (IBOSS). По сравнению с существующими методами анализа подданных подход IBOSS имеет следующие преимущества: он значительно быстрее; подходит для распределённых параллельных вычислений; дисперсии оценок параметра наклона сходятся к нулю по мере увеличения полного размера данных, даже если размер подданных фиксирован, т. е. скорость сходимости зависит от полного размера данных; анализ данных для подданных IBOSS весьма прост. Теоретические результаты и обширные вычислительные эксперименты показывают, что подход IBOSS превосходит методы, основанные на анализе подвыборок, иногда на порядки. Исследование [3] посвящено представлению некоторых передовых методов подвыборки, основанных на оценках наименьших квадратов большого масштаба. Рассмотрены подходы, связанные с рандомизированными оптимальными подвыборками. В статье [4] предлагается метод подвыборки для надёжной оценки регрессионных моделей, который построен на классических методах, таких как метод наименьших квадратов. Он использует ненадёжную природу базового классического метода для поиска хорошей выборки из данных, загрязнённых выбросами, а затем применяет классический метод к «хорошей» выборке для получения надёжных оценок параметров регрессионной модели. В [5] рассматривается распределённая процедура формирования подвыборки для эффективной аппроксимации оценки максимального правдоподобия для логистической регрессии. Устанавливается согласованность и асимптотическая нормальность оценки подвыборки с учётом полных данных.

В работе [6] для задач построения регрессии предлагается новый подход, называемый адаптивной подвыборкой с критерием минимальной энергии (ASMEC). Подвыборки ASMEC обладают двумя желательными свойствами: заполняемостью пространства и пространственной адаптивностью. Исследуются предельное распределение подвыборок ASMEC и их теоретические свойства в рамках модели регрессии сглаживающего сплайна. В [7], в отличие от большинства существующих в литературе методов, которые выбирают подвыборки случайным образом, предлагается получать подвыборки детерминированным способом. Этот способ позволяет выбирать подвыборки, обслуживающие построение линейной границы классификации и, следовательно, более эффективные, когда размер подвыборки невелик. Выводятся неасимптотические свойства двух разработанных методов относительно наблюдаемой информации, прогнозирования и точности оценки параметров. В статье [8] разработаны два новых алгоритма для улучшения метода оценки для логистической регрессии массивных данных на основе выбранного жёсткого порогового значения и объединения подвыборок соответственно. Основная идея метода объединения подвыборок заключается в лучшем использовании информации путём генерации множества подвыборок и последующего объединения оценок, построенных на их основе. В публикации [9] применяется метод случайной возмущённой подвыборки для моделей ранговой регрессии, в частности, разработаны два алгоритма многократной случайной возмущённой подвыборки для поиска оценки параметров. Рассматриваются также два способа взвешивания факторов в целевой функции: с весами произведений и аддитивными весами.

Следует также отметить работы [10] (обработка информационных последовательностей путём сегментации входных данных с учётом свойств объектов наблюдения), [11] (метод выбора ак-

тивного набора признаков и фильтрации объектов выборки при восстановлении регрессии), [12] (повышение качества анализа выборок и информационных последовательностей на основе многоуровневых моделей для задач классификации и регрессии), [13] (методы определения подходящего размера выборки, основанные на значениях правдоподобия на бутстрапированных подвыборках), [14] (задача построения суррогатной модели в случае наличия данных низкой и высокой точности), [15] (методы тестирования ранга коинтеграции для нескольких временных рядов при наличии структурных сдвигов), [16] (задача выбора моделей глубокого обучения субоптимальной сложности), [17] (взвешенный учёт наблюдений для прогнозирования при наличии структурных сдвигов), [18] (оценка эффективности данных для обучения искусственных нейронных сетей), [19] (анализ сходства образцов неструктурированных данных при разработке модели нейронной сети).

Целью настоящей работы является построение алгоритма максимизации числа допустимых ошибок аппроксимации на подвыборках исходной выборки данных при построении линейной регрессии.

Учёт заданной точности аппроксимации при регрессионном моделировании. Рассмотрим линейное регрессионное уравнение (модель, зависимость) вида

$$y_k = \alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y , x_i – соответственно зависимая и i -я независимая переменные; α_i , $i = \overline{0, m}$ – i -й подлежащий оцениванию параметр; ε_k – ошибки аппроксимации; k – номер наблюдения; n – их число (длина выборки). Все переменные и ошибки уравнения (1) детерминированы.

Зависимость (1) можно представить в векторной форме:

$$y = X\alpha + \varepsilon,$$

где $y = (y_1, \dots, y_n)^T$, $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$, X – $(n \times (m+1))$ – матрица с компонентами x_{ki} , первый столбец которой состоит из единиц. Таким образом, выборку данных составляет пара (X, y) .

Для оценивания неизвестных параметров модели (1) в регрессионном анализе разработано множество методов и их модификаций (см., в частности, [20; 21]). Применяются также различные вычислительные процедуры, позволяющие наделять эти параметры некоторыми весьма привлекательными свойствами. Так, в работе [22] решена задача максимизации числа наблюдений исходной выборки, для которых модуль ошибки аппроксимации в (1) не превышает некоторой наперёд заданной допустимой абсолютной ошибки d . Формально эта задача имеет вид

$$|S| \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $S = \{k \in \{1, 2, \dots, n\} \mid |\varepsilon_k| \leq d\}$, $|S|$ – число элементов множества S номеров наблюдений выборки, абсолютные ошибки аппроксимации для которых допустимы, приемлемы для исследователя в силу каких-либо соображений.

В [22] показано, что задача (2) может быть сведена к задаче линейно-булева программирования (ЛБП). Действительно, введём в рассмотрение булевы переменные σ_k , $k = \overline{1, n}$ по следующему правилу:

$$\sigma_k = \begin{cases} 1, & |\varepsilon_k| \leq d \\ 0, & |\varepsilon_k| > d. \end{cases}$$

Тогда эквивалентная задаче (2) задача ЛБП примет вид

$$\alpha_0 + \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$u_k + v_k + M \sigma_k \leq M + d, \quad k = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$\sigma_k \in \{0,1\}, \quad k = \overline{1,n}, \quad (5)$$

$$u_k \geq 0, \quad v_k \geq 0, \quad k = \overline{1,n}, \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n \sigma_k - \delta \sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \max, \quad (7)$$

где M и δ – заранее заданные соответственно большое и малое положительные числа.

Поставим более общую по отношению к (2) задачу, а именно: пусть исследователь, исходя из некоторых целей моделирования, заинтересован в том, чтобы максимизировать не просто общее число допустимых абсолютных ошибок аппроксимации, а сумму таких чисел для каждой выделенной из исходной выборки подвыборки с заданием на ней своей меры допустимости. Формально такое обобщение может быть представлено следующим образом.

Пусть исходная выборка с номерами наблюдений $\{1,2, \dots, n\}$ разбита на p непересекающихся подвыборок с номерами из индексных множеств $R^j, j = \overline{1,p}$:

$$R^j \subset \{1,2, \dots, n\}, \quad \bigcup_{j=\overline{1,p}} R^j = \{1,2, \dots, n\}, \quad R^j \cap R^i = \emptyset, i \neq j.$$

Пусть также на каждой подвыборке задана своя допустимая по модулю ошибка $d_j, j = \overline{1,p}$. По аналогии с множеством S введём в рассмотрение множества $S_j, j = \overline{1,p}$:

$$S_j = \{k \in R^j \mid |\varepsilon_k| \leq d_j\}.$$

Тогда обобщающая задача (2) постановка может быть формализована так:

$$\sum_{j=1}^p |S_j| \rightarrow \max.$$

Она также сводится к задаче ЛБП путём замены ограничений (4) на следующие:

$$u_k + v_k + M \sigma_k \leq M + d_j, j = \overline{1,p}, \quad k \in R^j, \quad (8)$$

целевая функция при этом не изменится.

Применим описанный способ оценивания параметров регрессионной зависимости (1) для моделирования производства электроэнергии в Российской Федерации. Воспользуемся при этом статистической информацией за 2005-2020 гг. [23].

Введём обозначения: y – производство электроэнергии в Российской Федерации (млн кВт·ч), x_1 – объём добычи угля (млн т), x_2 – объём добычи газа (млрд м³).

Будем строить линейную регрессионную модель без свободного члена (т. е. $\alpha_0 = 0$) вида

$$y_k = \alpha_1 x_{k1} + \alpha_2 x_{k2} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,16}. \quad (9)$$

Вначале, учитывая второе слагаемое целевой функции (7), сделаем это с помощью метода наименьших модулей:

$$y_k = 0.43x_{k1} + 0.14x_{k2} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1,16}, \quad (10)$$

$$J = 119.2, E = 3.05 \%,$$

где J – сумма модулей ошибок аппроксимации,

$$J = \sum_{k=1}^{16} |\varepsilon_k|,$$

E – средняя процентная ошибка,

$$E = 100\% J / \sum_{k=1}^{16} y_k.$$

Рассчитаем вектор ε ошибок аппроксимации:

$$\varepsilon = (3, -1, 0, -6.5, 16.6, 2.5, -2.8, -1.9, 0, 14.4, 10, 5.9, -9.1, -21.8, -20.2, 3.6).$$

Нетрудно видеть, что средняя по модулю ошибка составляет 7.45. Назначим достаточно жёсткий уровень допустимой ошибки $d = 2$. Следовательно, для зависимости (10) число наблюдений с допустимой ошибкой составит $F = \sum_{k=1}^{16} \sigma_k = 4$, т. е. ровно четверть от длины выборки. Теперь, решив задачу ЛБП (3) – (7), скорректируем оценки параметров модели (9) в соответствии с заданным значением d . В результате получим модель:

$$y_k = 0.4x_{k1} + 0.15x_{k2} + \varepsilon_k, k = \overline{1, 16}, \quad (11)$$

$$J = 119.73, E = 3.06 \%, F = 6.$$

Таким образом, за счёт совсем незначительного увеличения ошибок аппроксимации удалось число допустимых ошибок увеличить на две единицы, т. е. в полтора раза.

Для реализации предложенного выше способа уточнения модели (1) разобьём исходную выборку данных на две подвыборки (т. е. зададим $p = 2$) ровно пополам:

$$R^1 = \{1, 2, \dots, 8\},$$

$$R^2 = \{9, 10, \dots, 16\}.$$

Анализ вектора ε показывает, что на подвыборке R^1 средняя по модулю ошибка составляет 4.29, а на R^2 – 10.6. Поэтому значение допустимой ошибки для R^2 должно быть существенно больше, чем для R^1 . Сделаем это следующим образом:

$$d_1 = 2,$$

$$d_2 = 6.$$

После решения задачи ЛБП (3), (8), (5) – (7) получим модель

$$y_k = 0.25x_{k1} + 0.22x_{k2} + \varepsilon_k, k = \overline{1, 16}, \quad (12)$$

$$J = 140, E = 3.6 \%, F = 8, |S_1| = 4, |S_2| = 4.$$

Параметры модели (12) заметно отличаются от уравнений (10), (11), и качество аппроксимации также им уступает, но уже половина ошибок аппроксимации являются допустимыми, при этом мощности множеств S_1 и S_2 совпадают.

Заключение. В работе предложен алгоритм максимизации числа допустимых абсолютных значений ошибок аппроксимации линейной регрессионной модели, заданных для каждой выделенной из исходной выборки подвыборки. Реализация алгоритма сводится к задаче линейно-булева программирования. Построены три альтернативных варианта регрессионной модели производства электроэнергии в Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. HaiYing Wang, Rong Zhu & Ping Ma. Optimal Subsampling for Large Sample Logistic Regression // Journal of the American Statistical Association. – 2018. – Vol. 113. – Issue 522.
2. Hai Ying Wang, Min Yang & John Stufken. Information-Based Optimal Subdata Selection for Big Data Linear Regression // Journal of the American Statistical Association. – 2019. – Vol. 114. – Issue 525.
3. Tao Li, Cheng Meng. Modern Subsampling Methods for Large-Scale Least Squares Regression // International Journal of Cyber-Physical Systems (IJCPS). – 2020. – 2(2).



4. Min Tsao, Xiao Ling. Subsampling Method for Robust Estimation of Regression Models // Open Journal of Statistics. – 2012. – Vol. 2. – No. 3.
5. Lulu Zuo, Haixiang Zhang, Hai Ying Wang & Liuquan Sun. Optimal subsample selection for massive logistic regression with distributed data // Computational Statistics. – 2021. – Vol. 36. – P. 2535-2562.
6. Wenlin Dai, Yan Song & Dianpeng Wang. A Subsampling Method for Regression Problems Based on Minimum Energy Criterion // Technometrics. – 2023. – Vol. 65. – Issue 2. – P. 192-205.
7. Yan Song & Wenlin Dai. Deterministic subsampling for logistic regression with massive data // Computational Statistics. – 2024. – Vol. 39. – P. 709-732.
8. Jun Jin, Shuangzhe Liu & Tiefeng Ma. Robust and efficient subsampling algorithms for massive data logistic regression // Journal of Applied Statistics. – 2024. – Vol. 51. – Issue 8. – P. 1427-1445.
9. Sijin He & Xiaochao Xia. Random perturbation subsampling for rank regression with massive data // Statistics and Computing. – 2025. – Vol. 35. – No. 14.
10. Тихонов, Д. Д. Метод формирования сегментов информационной последовательности с использованием функционала качества моделей обработки / Д. Д. Тихонов, И. С. Лебедев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2024. – Т. 24. – № 3. – С. 474-482.
11. Стрижов, В. В. Задача выбора многоуровневых моделей с анализом ковариационной матрицы параметров / В. В. Стрижов // Математические методы распознавания образов. – 2011. – Т. 15. – № 1. – С. 154-157.
12. Лебедев, И. С. Применение многоуровневых моделей в задачах классификации и регрессионного анализа / И. С. Лебедев // Информатика и автоматизация. – 2023. – Т. 22. – № 3. – С. 487-510.
13. Киселев, Н. С. Достаточный размер выборки: бутстрапирование правдоподобия / Н. С. Киселев, А. В. Грабовой // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2025. – Т. 65. – № 2. – С. 235-242.
14. Бурнаев, Е. В. Суррогатное моделирование разноточных данных в случае выборок большого размера / Е. В. Бурнаев, А. А. Зайцев // Информационные процессы. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 97-109.
15. Скроботов, А. А. Структурные сдвиги в моделях коинтеграции: многомерный случай / А. А. Скроботов // Прикладная эконометрика. – 2021. – № 4 (64). – С. 83-106.
16. Стрижов, В. В. Выбор моделей глубокого обучения субоптимальной сложности / В. В. Стрижов, О. Ю. Бахтеев // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 8. – С. 129-147.
17. Китов, В. В. Метод взвешенного учёта наблюдений для прогнозирования при наличии структурных сдвигов / В. В. Китов // Математическое моделирование. – 2008. – Т. 20. – № 3. – С. 29-48.
18. Петрова, А. Н. Использование поиска фоновых ссылок по смыслу в системах больших данных / А. Н. Петрова, Д. О. Фролов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 100-106.
19. Жбанов, В. А. Проектирование и разработка модели нейронной сети для определения сходства двух образцов неструктурированных данных / В. А. Жбанов, Е. Б. Абарникова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № I (65). – С. 47-53.
20. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Вильямс, 2016. – 912 с.
21. Демиденко, Е. З. Линейная и нелинейная регрессии / Е. З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
22. Носков, С. И. Максимизация числа допустимых ошибок аппроксимации при построении линейной регрессионной модели / С. И. Носков, А. Н. Шахуров // Вестник Югорского государственного университета. – 2024. – Т. 20. – № 3. – С. 57-62.
23. Вариантное регрессионное моделирование производства электроэнергии в Российской Федерации / С. И. Носков, Е. С. Попов, С. П. Середкин, В. В. Тирских, В. Д. Торопов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. – 2023. – Техн. науки. Т. 50. – № 1. – С. 123-129.

Мокрицкий Б. Я., Скрипилёв А. А.
B. Ya. Mokritskii, A. A. Skripilev

**О ПРЕВОСХОДСТВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
НАД ИНОСТРАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

**ON THE SUPERIORITY OF DOMESTIC METAL-CUTTING EQUIPMENT OVER FOREIGN
TOOLS**

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Professor, Consulting Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: boris@knastu.ru.

Скрипилёв Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Skripilev.aal@email.knastu.ru.

Aleksandr A. Skripilev – PhD in Engineering, Associate Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Region, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin Ave. E-mail: Skripilev.aal@email.knastu.ru.

Аннотация. Необходимость импортозамещения привела к прорыву на рынок металлорежущего инструмента российских технологий. Это привело к достижению того качества металлорежущего инструмента, которое характерно для ведущих инструментальных фирм мира. Более того, в ряде случаев достигнуто превышение этого качества российским металлорежущим инструментом марки MRT. Показано, что работоспособность инструмента ООО «НПФ Промресурс» марки MRT выше, чем работоспособность инструмента Walter, в 1,4 раза при обработке стали 12X18H10T и в 1,3 раза при обработке титанового сплава BT20. Этот результат позволяет заключить, что сборная фреза двузубая марки MRT конкурентна и превосходит по эксплуатационным свойствам аналогичный инструмент ведущей в мире инструментальной немецкой фирмы Walter. Она позволяет успешно решить задачу импортозамещения и повышения производительности обработки. При испытаниях инструмента ООО «НПФ Промресурс» марки MRT на примере фрезерования заготовок деталей, выполненных из труднообрабатываемой высокотвёрдой нержавеющей стали марки 12X18H10T, показано, что отечественный инструмент более работоспособен, чем аналогичный инструмент ведущей в мире инструментальной шведской фирмы Sandvik Coromant.

Summary. The need for import substitution led to a breakthrough in the market of metal-cutting tools of Russian technologies. This has led to the achievement of the quality of metal-cutting tools, which is typical for the world's leading tool companies. Moreover, in a number of cases, this quality has been exceeded by Russian MRT metal cutting tools. It is shown that the efficiency of the tool of NPF Promresurs LLC of the MRT brand is 1.4 times higher than the efficiency of the Walter tool when processing steel 12X18H10T and 1.3 times when processing titanium alloy VT 20. This result allows us to conclude that the MRT double-pronged milling cutter is competitive and superior in performance to a similar tool from the world's leading German tool company Walter. It allows us to successfully solve the problem of import substitution and improve processing performance. When testing the MRT brand tool of NPF Promresurs LLC using the example of milling workpieces made of hard-to-machine high-hardness stainless steel of the 12Kh18N10T brand, it was shown that the domestic tool is more efficient than the similar tool of the world's leading tool manufacturer, Sandvik Coromant.

Ключевые слова: фрезерование, сборные фрезы, сравнительные испытания.

Key words: milling, prefabricated milling cutters, comparative tests.

УДК 621.9.2

Введение. Необходимость импортозамещения привела к прорыву на рынок металлорежущего инструмента российских технологий. Это привело к достижению того качества металлорежущего инструмента, которое характерно для ведущих инструментальных фирм мира. Более того, в ряде случаев достигнуто превышение этого качества российским металлорежущим инструментом марки MRT (г. Дубна, ООО «Научно-производственная фирма “Промресурс”»).

В статье изложены некоторые примеры, показывающие превосходство инструмента этой фирмы над инструментом ведущих инструментальных фирм Walter (Германия) и Sandvik Coromant (Швеция).

Объекты и методы исследований. Объектом исследований являются металлорежущие инструменты, выпускаемые НПФ «Промресурс» с маркой MRT, и аналогичные металлорежущие инструменты, выпускаемые ведущими инструментальными фирмами Walter и Sandvik Coromant.

Использован экспериментальный метод сравнительных испытаний в равных условиях. В качестве критерия оценки работоспособности в зависимости от вида инструмента принято либо количество изготовленных деталей до отказа инструмента, либо период стойкости до отказа инструмента или достижения им предельного износа.

Сравнение инструмента MRT с инструментом Walter выполнено по 7 разным видам инструментов. В четырёх из них инструмент MRT показал более высокое качество, чем инструмент Walter, в остальных случаях работоспособность MRT и Walter оказалась одинаковой.

Сравнение инструмента MRT с аналогичным инструментом фирмы Sandvik Coromant выполнено тоже экспериментальным путём при фрезеровании отечественной фрезой марки KB15-42C4-Z4 и шведской фрезой марки R210-042C4-09H.

В качестве примера ниже показаны результаты сравнения инструмента MRT и Walter при использовании сборной двузубой фрезы диаметром 25 мм со сменными твёрдосплавными режущими пластинами с их механическим креплением в гнездах корпуса фрез. Фреза MRT имела марку KB15-42C4-Z4.

Фото фрез сборных двузубых MRT и Walter показано на рис. 1.



Рис. 1. Фото фрез сборных с двумя зубьями, верхняя фреза фирмы Walter, нижняя – ООО «НПФ Промресурс», марка MRT. Рядом с корпусами фрез на фото показаны их твёрдосплавные режущие пластины

Полученные результаты. Оценка работоспособности таких фрез выполнена при равных условиях эксплуатации инструмента. В качестве критерия оценки работоспособности принят период стойкости инструмента до разрушения или до допустимого значения износа. Исследования выполнены при обработке заготовок деталей, изготовленных из титанового сплава марки BT20 и труднообрабатываемой нержавеющей термоупрочнённой стали марки 12X18H10T.

Фрезеровали заготовки деталей из круга диаметром 260 мм, выполненных из нержавеющей стали марки 12X18H10T либо из титанового сплава марки BT20. Траектория перемещения фрезы – по спирали снаружи к центру заготовки. Применяли станок модели DMU 50 ecoline и смазывающе-охлаждающую эмульсию.

Заготовка из стали 12X18H10T имела твёрдость HB 156. Параметры режима резания: глубина резания 0,5 мм, перекрытие 8 мм, подача на зуб 1,5 мм, число оборотов фрезы 1528 об/мин (т. е. скорость резания 120 м/мин).

Заготовки из титанового сплава BT20 имели твёрдость HB 280. На заготовках имелась литевая корка. Параметры режима резания те же, что для стали 12X18H10T, но скорость резания составляла 80 м/мин. Применяли смазывающе-охлаждающую эмульсию.

Результаты испытаний оценивали по периоду стойкости режущих пластин фрез.

Сводные данные испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки периода стойкости инструмента Walter и ООО «НПФ Промресурс» при обработке стали 12X18H10T и титанового сплава BT20 сборной фрезой двузубой диаметром 25 мм

Инструмент	Величина периода стойкости инструмента и комментарии	
	Сталь 12X18H10T	Титановый сплав BT20
Инструмент ООО «НПФ Промресурс», марка MRT	150 мин	50 мин. Фрезерование проходило спокойно
Инструмент фирмы Walter	105 мин	37 мин. Имело место искрение стружки даже при наличии СОЖ
Вывод	Период стойкости инструмента марки MRT на 30 % выше, чем период стойкости инструмента Walter	Период стойкости инструмента марки MRT на 26 % выше, чем период стойкости инструмента Walter

Анализ приведённых в табл. 1 результатов показывает, что работоспособность инструмента ООО «НПФ Промресурс» марки MRT выше, чем работоспособность инструмента Walter, в 1,4 раза при обработке стали 12X18H10T и в 1,3 раза – при обработке титанового сплава BT20. Этот результат позволяет заключить, что сборная фреза двузубая марки MRT конкурентна и превосходит по эксплуатационным свойствам аналогичный инструмент ведущей инструментальной немецкой фирмы Walter. Она позволяет успешно решить задачу импортозамещения и повышения производительности обработки.

Пример сравнительных испытаний фрезы MRT и фрезы Sandvik Coromant рассмотрен для случая фрезерования на станке модели DMU80P dB. Фреза марки MRT имела обозначение KB15-42C4-Z4. Фреза Sandvik Coromant имела обозначение R210-042C4-09H.

Закрепление фрез осуществлялось в базовый держатель C4-390.140-50 060 фирмы Sandvik Coromant. Параметры фрез и режимы резания приведены в табл. 2 и 3.

В качестве заготовки использовался блок материала 12X18H10T размером 80×170×280 мм в состоянии поставки. Твёрдость заготовки HB 93...133. Применяли попутное фрезерование.

Общее представление о детали показано на рис. 2.

Таблица 2

Основные конструктивные параметры фрез

Наименование фрезы	Производитель	Диаметр фрезы, мм	Число зубьев фрезы	Длина фрезы, мм
KB15-42C4-Z4	MRT	42	4	60
R210-042C4-09H	Sandvik Coromant	42	4	60

Таблица 3

Параметры режима резания

Наименование фрезы	Марка материала сменных твёрдосплавных режущих пластин фрезы	Скорость резания, м/мин	Число оборотов фрезы в минуту	Ширина фрезерования, мм	Глубина резания, мм	Величина подачи на зуб фрезы, мм/зуб
KB15-42C4-Z4	M35P	150	1273	28	0,8	0,7*
R210-042C4-09H	2040	150	1273	28	0,8	0,7*

Примечания:

1. Подача стола станка составляла 3184 мм/мин.

2. Охлаждение осуществлялось внешним и внутренним подводом СОЖ через инструмент.

* – это очень большая подача, такой она принята специально для создания тяжёлых условий фрезерования.



Рис. 2. Рабочая зона станка модели DMU80P dB при фрезеровании фрезой KB15-42C4-Z4 (фреза видна справа сверху)

При работе отечественной фрезой MRT марки KB15-42C4-Z4 наблюдалось стабильное резание и отсутствие вибраций. Образовывалась фрагментарная стружка. Период стойкости режущих пластин составил 43...46 мин по разным режущим кромкам.

При работе импортной фрезы марки R210-042C4-09H Sandvik Coromant тоже наблюдалось стабильное резание и отсутствие вибраций с образованием фрагментарной стружки. Но период стойкости режущих пластин шведской фирмы Sandvik Coromant составил 24...36 мин, что в 1,8...1,3 раза ниже, чем у инструмента KB15-42C4-Z4 (отечественный производитель ООО «НПФ Промресурс»).

Заключение

1. Работоспособность инструмента ООО «НПФ Промресурс» марки MRT выше, чем работоспособность инструмента Walter, в 1,4 раза при обработке стали 12X18H10T и в 1,3 раза – при обработке титанового сплава BT20. Этот результат позволяет заключить, что сборная фреза двузубая марки MRT конкурентна и превосходит по эксплуатационным свойствам аналогичный инструмент ведущей инструментальной немецкой фирмы Walter. Она позволяет успешно решить задачу импортозамещения и повышения производительности обработки.

2. При испытаниях инструмента ООО «НПФ Промресурс» марки MRT на примере фрезерования заготовок деталей, выполненных из труднообрабатываемой высокотвёрдой нержавеющей стали марки 12X18H10T, показано, что отечественный инструмент более работоспособен, чем аналогичный инструмент ведущей инструментальной шведской фирмы Sandvik Coromant, в частности:

- фрезы марки MRT по периоду стойкости превосходят в 1,8...1,3 раза аналогичные фрезы фирмы Sandvik Coromant;
- выявленный резерв периода стойкости позволяет форсировать параметры режима резания для фрезы марки MRT (обозначение KB15-42C4-Z4), а именно глубину резания с 0,8 до 1 мм;
- фрезы MRT и Sandvik Coromant имеют аналогичные конструктивные параметры, что позволяет потребителю менять их в технологическом процессе без корректировки управляющей программы станка.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА MATHEMATICS AND MECHANICS

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.
G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ И ЕЁ АРХИТЕКТУРА В ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ ПЛАНКОВСКИХ ЧИСЕЛ

ENERGY MODEL OF UNIVERSE EXPANSION AND ITS ARCHITECTURE IN REPRESENTATIONS OF PLANCK NUMBERS

Колыхалов Геннадий Антонович – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.
Gennady A. Kolykhalov – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. В работе представлена энергетическая модель механизма расширения Вселенной, построенная в рамках законов классической механики. Введено понятие планковского космологического числа, и установлена его связь с космологическим числом. Получены обобщённые формулы для определения предельных параметров расширяющейся Вселенной. Показана определяющая роль планковских чисел и космологического планковского числа в оценке предельных параметров Вселенной. Установлено, что планковские числа не являются предельно малыми (квантовыми), но именно через них определяются числовые значения предельно малых величин. Показан фундаментальный характер планковских единиц, устанавливающих неразрывную связь микромира и макромира в их взаимодействии.

Summary. The paper presents an energy model of the mechanism of expansion of the Universe, built within the framework of the laws of classical mechanics. The concept of a Planck cosmological number was introduced and its connection with a cosmological number was established. Generalized formulas for determining the limiting parameters of the expanding Universe are obtained. The determining role of Planck numbers and cosmological Planck number in estimation of limit parameters of the Universe is shown. It has been established that Planck numbers are not extremely small (quantum), but it is through them that the numerical values of extremely small quantities are determined. The fundamental nature of Planck units that establish the inseparable relationship between the microcosm and the macrocosm in their interaction is shown.

Ключевые слова: Вселенная, ядро, оболочка, механизм расширения, планковские числа, космологическое число, предельные параметры, время, масса, энергия.

Key words: Universe, core, shell, expansion mechanism, Planck numbers, cosmological number, limit parameters, time, mass, energy.

УДК 524.85:530.17

Рассмотрим механизм расширения и формирования Вселенной в рамках гипотезы Большого взрыва. В работе [1] исследованы некоторые аспекты этой проблемы и получены предельные космологические параметры Вселенной, позволяющие определить облик Вселенной в первом приближении. Не исследованы закономерности, управляющие процессом расширения и формирования Вселенной.

В рамках исследования механизма расширения Вселенной будем полагать, что Вселенная представляет собой единство ядра, в котором в первоначальный момент была сосредоточена вся

праматерия, и оболочки, т. е. расширяющейся части Вселенной, в которую праматерия из ядра с момента начала Большого взрыва начинает излучать элементарные частицы материи.

Считаем, что в момент начала Большого взрыва оболочка была пуста, т. е. в ней не было материи, не было ни одной элементарной частицы и отсутствовали время и температура. Полная энергия Вселенной была сосредоточена в ядре в форме потенциальной энергии.

В процессе Большого взрыва материя в виде элементарных частиц из ядра начинает поступать в оболочку, расширяя её, т. е. формируя объём Вселенной. При этом в каждом квантовом отрезке времени в расширяющуюся Вселенную из ядра излучается только одна квантовая частица материи. То есть каждая квантовая частица материи является носителем квантового отрезка времени и соответствующего ему кванта информации. Святой Августин утверждал, что время – это свойство Вселенной, которое появилось вместе с ней самой.

Принимаем, что внутри системы ядро+оболочка справедливы законы сохранения энергии и массы.

Считаем, что носителем потенциальной энергии является ядро, а носителем кинетической энергии – оболочка в процессе поступления туда частиц из ядра. Это значит, что в расширяющейся Вселенной нет покоящихся частиц, всё движется.

В рамках закона сохранения энергии запишем равенство

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}}, \quad (1)$$

где E – полная энергия системы ядро+оболочка; $E_{\text{п}}$ – потенциальная энергия ядра; $E_{\text{к}}$ – кинетическая энергия частиц в оболочке.

В качестве аналогии можно рассмотреть простейший пример из классической механики. Над землёй на некоторой высоте находится сосуд с большим количеством одинаковых мельчайших шариков. На дне сосуда имеется отверстие, из которого в каждый момент времени выходит только один шарик. Будучи в сосуде, он обладает определённой потенциальной энергией.

Падая, он теряет эту энергию, но приобретает в конце падения кинетическую энергию, эквивалентную потерянной потенциальной энергии.

При этом момент времени перехода потенциальной энергии в кинетическую при выходе из сосуда не совпадает с моментом времени приобретения кинетической энергии, т. к. процесс перехода каждого шарика из одного состояния в другое требует конечного, хотя и очень малого времени.

В работе [1] отмечается, что в одном квантовом отрезке времени не может быть больше одной квантовой частицы (квантовой единицы массы). Это означает, что все квантовые частицы разделены в расширяющейся Вселенной как по времени, так и в пространстве. Таким образом, каждая частица обладает индивидуальностью как по дате рождения, так и по своему местоположению в пространстве в любой момент времени. Это должно относиться и к информационной части, и к другим характерным для квантовой частицы свойствам.

В качестве гипотезы можно предположить, что все квантовые частицы в рамках информационного поля перенумерованы и по определённой программе (генетическому коду Вселенной) осуществляется строительство Вселенной на всех её иерархических уровнях.

На этих иерархических уровнях формируются другие, более «тяжёлые» частицы, также обладающие индивидуальностью по отношению друг к другу. Это, соответственно, относится и к электронам в атомах. По всей видимости, фактор индивидуальности электронов в атомной оболочке отобразился в том, что для объяснения возможных конфигураций электронов в атоме был введён принцип запрета Паули [2], который гласил, что два электрона не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии, т. е. два электрона не могут иметь одинаковый набор квантовых чисел.

Именно квантовый характер взаимодействия ядра и оболочки Вселенной определяет индивидуальность каждой частицы и дискретность формирования Вселенной на всех её иерархических уровнях и на всех отрезках времени. Это её фундаментальное свойство.

Полная энергия в зависимости (1) будет определяться по формуле Эйнштейна:

$$E = M \cdot c^2, \quad (2)$$

где M – полная масса вещества Вселенной, заключённого в начальный момент времени в ядре в форме потенциальной энергии; c – скорость света.

Потенциальную энергию будем определять формулой Планка:

$$E_{\text{п}} = h \cdot \nu, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка; ν – частота колебаний.

Считаем, что ядро вращается с угловой скоростью ω , равной

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu.$$

Тогда зависимость (3) примет вид

$$E_{\text{п}} = \hbar \cdot \omega, \quad (4)$$

где $\hbar = \frac{h}{2 \cdot \pi}$.

Кинетическую энергию выразим соотношением

$$E_{\text{к}} = m \cdot c^2, \quad (5)$$

где m – текущая масса материи, поступившая оболочку Вселенной, является функцией времени.

Для определения этой массы воспользуемся зависимостью, представленной в работе [3]:

$$m = \frac{c^3}{G} \cdot t, \quad (6)$$

где t – текущее время, формируемое в оболочке; G – гравитационная постоянная.

С учётом формулы (6) соотношение (5) примет вид

$$E_{\text{к}} = \frac{c^5}{G} \cdot t. \quad (7)$$

Подставим формулы (2), (4), (5) и (7) в зависимость (1), получим

$$M \cdot c^2 = \hbar \cdot \omega + \frac{c^5}{G} \cdot t. \quad (8)$$

Из этой формулы можно сделать ряд выводов по оценке предельных значений времени, в рамках которого расширяется наша Вселенная.

В момент времени $t = 0$ кинетическая энергия равна нулю, в оболочке нет ни одной частицы вещества. Полная энергия заключается в её потенциальной составляющей. В этом случае можно определить максимальное значение угловой скорости ω_{max} из соотношения

$$\omega_{\text{max}} = \frac{M \cdot c^2}{\hbar}.$$

Отсюда получим минимальное значение отрезка времени t_{min} :

$$t_{\text{min}} = \frac{1}{\omega_{\text{max}}} = \frac{\hbar}{M \cdot c^2}. \quad (9)$$

При максимальном значении времени $t = t_{\text{max}}$, в момент окончания расширения Вселенной, вся потенциальная энергия ядра переходит в кинетическую энергию частиц в оболочке. В этом случае $\omega = 0$ и из формулы (8) определяется предельно большая величина для времени t_{max} :

$$t_{\text{max}} = \frac{G \cdot M}{c^3}. \quad (10)$$

Используя формулу (8), установим связь между угловой скоростью ω и временем t :

$$\omega = \frac{M \cdot c^2}{\hbar} \cdot \left(1 - \frac{c^3}{G \cdot M} \cdot t\right). \quad (11)$$

Если принять во внимание формулы (9) и (10), то полученная зависимость (11) может быть представлена в виде

$$\omega = \frac{t_{\max} - t}{t_{\min} \cdot t_{\max}}. \quad (12)$$

Произведение в знаменателе с учётом формул (9) и (10) даёт значение

$$t_{\min} \cdot t_{\max} = \frac{\hbar \cdot G}{c^5}.$$

Известно, что формула для планковского времени [4] t_p определяется соотношением

$$t_p = \left(\frac{\hbar \cdot G}{c^5}\right)^{0,5}. \quad (13)$$

Тогда

$$t_{\min} \cdot t_{\max} = t_p^2. \quad (14)$$

Формула (14) показывает, что планковское время не носит характера квантового, но именно оно его определяет.

С учётом зависимостей (12) и (14) формула (8) примет вид

$$M \cdot c^2 = \hbar \cdot \left(\frac{t_{\max} - t}{t_p^2}\right) + \frac{c^5}{G} \cdot t. \quad (15)$$

Эта формула определяет взаимосвязь процессов в ядре (праматерии) и оболочке (расширяющейся Вселенной) в функции времени t .

Планковское время непосредственно можно получить из формулы (15).

В рамках исследования, представленного в работе [1], была выявлена закономерность: отношение соответствующих предельно больших величин к предельно малым одной и той же размерности даёт одинаковый результат в рамках основных единиц измерения в системе СИ:

$$N = \frac{M^2 \cdot G}{\hbar \cdot c} = \frac{t_{\max}}{t_{\min}} = \frac{r_{\max}}{r_{\min}} = \frac{M}{m_{\min}} = 0,8424 \cdot 10^{124}. \quad (16)$$

Обозначим величину N как N_k и будем называть её в дальнейшем космологическим числом.

Определим количество планковских единиц N_p времени t_p в максимальном времени расширения Вселенной t_{\max} через соотношение

$$N_p = \frac{t_{\max}}{t_p}.$$

Назовем N_p планковским космологическим числом.

Выразим t_{\max} через N_k . Используя зависимость (16), получим

$$N_p = \frac{N_k \cdot t_{\min}}{t_p}.$$

Подставим сюда значения по формулам (9) и (13), будем иметь

$$N_p = N_k \cdot \frac{\hbar}{M \cdot c^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\hbar \cdot c^5}{G}\right)^{0,5}} = N_k \cdot \left(\frac{\hbar \cdot c}{M^2 \cdot G}\right)^{0,5}.$$

Принимая во внимание соотношение (16), получим

$$N_p = \frac{t_{\max}}{t_p} = N_k^{0,5} = 0,9178 \cdot 10^{62} \approx 10^{62}. \quad (17)$$

С другой стороны, расчёты показывают, что отношение планковского времени к минимальному $n_x = \frac{t_p}{t_{\min}}$ также равно значению $N_k^{0,5}$.

То есть $n_x = N_p$.

Таким образом, существует чётко выраженная связь между планковским и минимальным (квантовым) отрезками времени.

Можно показать, что формула (14) справедлива и для других планковских величин. Используя значения предельных параметров Вселенной, представленных в работе [1], подсчитаем их произведения для некоторых других планковских величин, а именно для длины, массы, угловой скорости, энергии. Тогда

$$\begin{aligned} r_{\max} \cdot r_{\min} &= \frac{G \cdot M}{c^2} \cdot \frac{\hbar}{M \cdot c} = r_p^2, & M \cdot m_{\min} &= M \cdot \frac{\hbar \cdot c}{M \cdot G} = m_p^2, \\ \omega_{\max} \cdot \omega_{\min} &= \frac{M \cdot c^2}{\hbar} \cdot \frac{c^3}{G \cdot M} = \omega_p^2, & E_{\max} \cdot E_{\min} &= M \cdot c^2 \cdot \frac{\hbar \cdot c^3}{M \cdot G} = E_p^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Формулы (18) подтверждают фундаментальный характер зависимости (14).

Определённый интерес представляет анализ зависимости (12) для угловой скорости, которую с учётом формулы (14) можно представить, если принять, что $\omega = \frac{1}{t_1}$, в виде

$$t_1 = \frac{t_p^2}{t_{\max} - t}, \quad (19)$$

где t_1 – условное время, определяющее угловую скорость вращения ядра Вселенной.

Течение условного времени t_1 в ядре в общем случае не должно совпадать с течением времени t в оболочке Вселенной, этого требует закон сохранения энергии, представленный зависимостью (15).

Определим, при каких значениях величины t_1 и t совпадают. Для этого воспользуемся зависимостью (19) и представим её для случая $t_1 = t = t^*$:

$$(t^*)^2 - t_{\max} \cdot t^* + t_p^2 = 0. \quad (20)$$

Решение уравнения (20) запишем в виде

$$t_{1,2}^* = \frac{t_{\max} \cdot \left[1 \pm \left(1 - \frac{4 \cdot t_p^2}{t_{\max}^2} \right)^{0,5} \right]}{2}.$$

Если принять во внимание соотношения (17) и (14), то последняя формула переписется в виде

$$t_{1,2}^* = \frac{t_{\max} \cdot \left[1 \pm \left(1 - \frac{4}{N_k} \right)^{0,5} \right]}{2}. \quad (21)$$

Учитывая, что $N_k = 0,8424 \cdot 10^{124}$, из формулы (21) получаем два значения для величины t^* :

$$t_1^* \cong t_{\max}, \quad t_2^* \cong t_{\min}.$$

В интервале $t_{\min} < t < t_{\max}$ связь между t_1 и t определяется зависимостью (19).

Принимая во внимание формулы (14) и (16), предельные космологические значения для времени, расстояния (радиуса), массы и энергии можем представить в более простом виде:

$$\begin{aligned} t_{\min} &= \frac{t_p}{N_k^{0,5}}, & t_{\max} &= t_p \cdot N_k^{0,5}, \\ r_{\min} &= \frac{r_p}{N_k^{0,5}}, & r_{\max} &= r_p \cdot N_k^{0,5}, \\ m_{\min} &= \frac{m_p}{N_k^{0,5}}, & m_{\max} &= m_p \cdot N_k^{0,5}, \\ E_{\min} &= \frac{E_p}{N_k^{0,5}}, & E_{\max} &= E_p \cdot N_k^{0,5}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $N_k^{0,5} = 0,9178 \cdot 10^{62}$.

Из соотношений (22) видно, что предельные параметры Вселенной могут быть определены исключительно с использованием планковских чисел и космологического числа из соотношений (14) и (16) и представлены в обобщённом виде:

$$N_k = \frac{x_{\max}}{x_{\min}}, \quad x_{\min} \cdot x_{\max} = x_p^2, \quad (23)$$

где x – соответственно обозначение параметров времени t , расстояния r или l , массы m , энергии E и других величин.

Формулы (23) определяют фундаментальный характер планковских величин, которые устанавливают неразрывную связь процессов, происходящих в микромире и макромире, в их взаимозависимости.

С учётом планковского космологического числа N_p , представленного соотношением (17), формулы (23) могут быть записаны и в форме

$$N_p = \frac{x_{\max}}{x_p}, \quad x_{\min} \cdot x_{\max} = x_p^2.$$

Отсюда

$$x_{\min} = \frac{x_p}{N_p}, \quad x_{\max} = x_p \cdot N_p, \quad (24)$$

где $N_p = N_k^{0,5} = 0,9178 \cdot 10^{62}$.

Можно предположить, что планковские величины имеют более глубокое космологическое, физическое содержание, чем то, которое мы имеем о них сейчас. Формулы (24) дают основание считать, что планковские величины, с одной стороны, представляют собой водораздел между микромиром и макромиром, с другой стороны, это мостик из микромира в макромир.

Механизм рождения и формирования (расширения) Вселенной гипотетически можно обрисовать (представить) следующим образом.

В начальный момент, когда время в оболочке равнялось $t = 0$, в ядре в квантовый отрезок времени сформировалась первая квантовая частица.

Мгновение, когда первая квантовая частица излучилась из ядра в оболочку, можно считать временем рождения не только этой первой частицы, но и Вселенной в целом.

Вслед за первой последовательно, через квантовые промежутки времени, излучаются другие квантовые частицы, и каждая из них получает свою дату рождения и свою информационную составляющую. При этом каждая частица несёт в оболочку не только квантовую массу, но и соответствующий квант времени.

С момента рождения первой частицы часы Вселенной начали отсчёт времени жизни Вселенной, которое на сегодняшнюю космическую эпоху определяется значением $T = 4,37 \cdot 10^{17}$ с. Также с ростом количества вещества в оболочке происходит расширение Вселенной.



В пределах каждого планковского отрезка времени в планковском объёме (планковской Вселенной) накапливается количество элементарных частиц порядка 10^{62} с общей планковской массой $2,176 \cdot 10^{-8}$ кг со своими информационными и другими свойствами.

Будем считать в рамках гипотезы, что в планковском объёме за каждый планковский отрезок времени на квантовом уровне из планковской массы в рамках информационной составляющей в объёме $\sim 10^{62}$ бит создаётся облик нашей Вселенной со всеми её атрибутами, т. е. создаются (назовём их как планковские) «клетки» Вселенной. Они уже, в свою очередь, формируют нашу Вселенную на всех иерархических уровнях. Таких планковских «клеток», по расчётам, должно быть порядка $\sim 10^{62}$ от момента рождения до момента окончания расширения Вселенной. Можно предположить, что каждая «клетка» несёт всю информацию о своём прошлом и о последующем развитии Вселенной.

Следует подчеркнуть, что уже в планковском отрезке времени элементарные частицы могут объединяться между собой и создавать другие, более «тяжёлые» частицы на разных иерархических уровнях, включая фотоны более высоких энергий, лептоны, кварки и, соответственно, электроны и ядра атомов, и в конечном итоге и все атомы элементов таблицы Менделеева.

Таким образом, планковскую Вселенную можно представить как инкубатор, в котором непрерывно из частиц, излучаемых из ядра, формируются «клеточки» для будущей Вселенной, в которых уже отражается вся Вселенная, как в каждой капле воды отражается весь океан, её будущая архитектура и её генетический код дальнейшего развития.

При этом каждая последующая «клеточка» в рамках генетического кода несёт в себе определённые отличия от предыдущей «клеточки» как в свойствах, так и механизмах (процессах) взаимодействия с другими «клеточками». Это обусловлено их индивидуальностями.

В качестве аналогии можно рассмотреть процесс рождения и развития человека. Как известно из биологии, новая жизнь возникает в рамках соединения двух клеток, в результате чего появляется новая клетка, отличная от первых двух, с которой и начинается существование нового человека [5].

Эта первая клетка уже имеет свой неповторимый «генетический код» (паспорт), в котором содержится вся информация о том, каким будет этот человек на всех этапах своей жизни, о его дальнейшем физическом и умственном развитии, т. е. в ней уже возник новый живой человек.

После первой клетки идёт формирование других клеток, и в них содержится та же информация, что и в первой, т. е. сам генетический код человека не меняется в течение всей его жизни.

В процессе роста человека все его органы формируются в рамках непрерывного создания и взаимодействия клеток между собой и в итоге представляют единую, растущую, развивающуюся живую систему (организм).

Вселенная – это такой же живой организм, обладающий Высшим разумом, как и человек со своим разумом, со всей своей внутренней упорядоченной организацией на всех иерархических уровнях и развивающийся по своему Вселенскому генетическому коду.

Поэтому, каждый из нас – это своя маленькая вселенная, единая с большой Вселенной, в которой мы живём.

Процесс Большого взрыва продолжается и сейчас, и закончится очень нескоро.

Выводы

1. Представлена модель механизма расширения Вселенной, построенная в рамках законов классической механики.

2. Показан фундаментальный характер планковских величин, определяющих неразрывную связь микромира и макромира в их взаимодействии.

3. Подтверждается непреложный факт индивидуальности каждой частицы и дискретности всех процессов, протекающих во Вселенной.

4. Установлено, что каждый предельный параметр Вселенной может быть вычислен через две основополагающие величины: планковские числа и космологическое число.

5. Показана важная роль космологического числа в оценке предельных параметров Вселенной.

6. Установлена связь между космологическим числом и планковским космологическим числом.

7. Представлены обобщённые формулы для определения предельных параметров расширяющейся Вселенной.

8. Установлено, что планковские величины не являются предельно малыми (квантовыми), но именно через них определяются числовые значения предельно малых (квантовых) величин.

9. Показано, что количество планковских единиц в максимальных величинах той же размерности точно такое же, как и количество минимальных единиц в планковских величинах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колыхалов, Г. А. Предельные космологические параметры Вселенной / Г. А. Колыхалов, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № V (85). – С. 85-96.
2. Принцип запрета Паули // Элементы, 2005-2025. – URL: https://elementy.ru/trefil/21186/Printsip_zapreta_Pauli (дата обращения: 12.09.2025). – Текст: электронный.
3. Колыхалов, Г. А. Интерпретация квантов энергии и массы фотона с позиций закона всемирного тяготения / Г. А. Колыхалов, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2025. – № I (81). – С. 109-114.
4. Планковские единицы // Википедия, свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Планковские_единицы (дата обращения: 12.09.2025). – Текст: электронный.
5. Всеволодов, Э. Б. Важнейшие фундаментальные проблемы биологии развития / Э. Б. Всеволодов, А. С. Мусаева, В. А. Голиченков. – Алматы: Издательство Института генетики и физиологии Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, 2022. – 125 с.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Ким К. К., Иванов С. Н., Колесник М. Б., Полонский В. А.

СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Фролов А. В., Пукас А. Ю.

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ЦИФРОВОГО ПОТЕНЦИОМЕТРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SIMINTESCH

Ким К. К., Карпова И. М., Иванкова Е. П., Королева Е. Б., Михайлов М. В., Ткачук А. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЗАРЯДА
АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЛЕТАЮЩЕГО МУЛЬТИКОПТЕРА ЭНЕРГИЕЙ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЯГОВОГО ТОКА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

УПРАВЛЕНИЕ

Гудим А. С., Савельев Д. О., Плохотнюк В. В.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Черный С. П., Емельянов К. А., Лямин М. А., Облогин Д. Ю.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Кучерова А. И., Иванкова Е. П., Горькавый М. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОКРАСКИ ДЕТАЛЕЙ
СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Черный С. П.

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
ПРОЦЕДУР УПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Кувшинов В. В., Муровский С. П., Абдали Л. М. А., Исса Х. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХОСНЫМ СОЛНЕЧНЫМ
ТРЕКЕРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ FORID-РЕГУЛЯТОРА

Горькавый М. А.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛАБОРАТИВНЫМ
РОБОТОМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

Савельев Д. О.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ
БЕСПИЛОТНОГО ПОДВОДНОГО МОДУЛЯ

Емельянов К. А.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДУЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ
ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ



ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Лясковский И. Е., Гордин С. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАЦИЕЙ
В ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Чернышова Д. В., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одинокоев В. И.

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ

Кольева Н. С., Панова М. В., Федоров Д. Л., Перестенко К. А., Ярочкина Е. Д.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ
ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ СТЕНДА УПРАВЛЕНИЯ
НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Носков С. И., Медведев А. П.

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОДНОРОДНОЙ ВЛОЖЕННОЙ
КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ВТОРОГО ТИПА

Базилевский М. П.

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОГО ВИДА
МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИЙ

Петрова А. Н., Фролов Д. О., Дмитриева Т. Л.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СГЛАЖИВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Гончаренко В. А., Хомоненко А. Д., Абу Хасан Р.

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ
RAID-МАССИВОВ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯ

Андреанов И. К., Фролов Д. О.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ТЕРМОНАГРУЖЕННОЙ ОБЛАСТИ
НА ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ РЕКИ АМУР

Тукмаков Д. А.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МОНОДИСПЕРСНОГО
АЭРОЗОЛЯ В АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ С РАЗЛИЧНЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

Ермаков С. Г., Забродин А. В., Костин М. А.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА БЛУМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ
БОЛЬШИХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Носков С. И., Беляев С. В.

АНТИРОБАСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КЛАСТЕРНОЙ
ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Дмитриева Т. Л., Ботхоев А. Е., Фролов Д. О.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИНСТРУМЕНТАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ MATHCAD

Иванкова Е. П., Колесник М. Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО
ДВИЖЕНИЯ В ПАКЕТЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Фролов А. В., Швец А. Н., Мусихин Ю. Ф.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО СИГМА-ДЕЛЬТА МОДУЛЯТОРА
ДЛЯ ДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

Чернышов А. Д., Горяйнов В. В.

НАПРЯЖЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ МЕМБРАНЕ, ЗАКРЕПЛЁННОЙ
В НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ

Авдонин К. А.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ПОЛИРОВАНИЯ АЛМАЗОПОДОБНОГО PVD-ПОКРЫТИЯ КРАЦЕВАНИЕМ

Забродин А. В., Хонина О. И.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ДИАГНОСТИКИ «УЗКИХ МЕСТ» В РАБОТЕ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ
ПО ДАННЫМ ТЕПЛОВЫХ КАРТ

Сеченов П. А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ИЗМЕНЕНИЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ РЕКИ АМУР

Фролов Д. О., Андрианов И. К.

ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА
В КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ НА ОСНОВАНИИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Нигматуллин К. Р., Забродин А. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТОВ И ЧАТ-БОТОВ КАК СРЕДСТВО РЕШЕНИЯ
АВТОМАТИЗАЦИИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Григорьев Я. Ю., Альхименко И. Н., Григорьева А. Л.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЛАСТЕЙ

Петрова А. Н., Фролов Д. О.

ГИБРИДНЫЕ МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ И ОТКРЫТЫХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭМБЕДДИНГОВ

Фролов Д. О., Петрова А. Н.

ЭФФЕКТИВНЫЙ СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ
ТЕКСТОВЫХ ЭМБЕДДИНГОВ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСАХ

Носков С. И., Бутин А. А.

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ С ЗАДАННОЙ
НА ПОДВЫБОРКАХ ДАННЫХ ТОЧНОСТЬЮ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Шиляев А. В., Бахматов П. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
ТАКТИЧЕСКИМ ПРИЁМОМ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЁТНЫХ ДАННЫХ

Саблин П. А., Косачев К. Д.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ



Сысоев О. Е., Марьин С. Б., Сысоев Е. О.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ
ПРИ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Щетинин В. С., Космынин А. А.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ
ОТ ДОЛИ ПОРИСТОСТИ ИХ ЧАСТИЧНО ПОРИСТЫХ
ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ

Ри Э. Х., Приходько А. А., Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Чешев С. С.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ
СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ МЕТОДОВ

Дорофеев С. В., Войнов А. Р., Щекин А. В., Борец М. И., Ермаков М. А.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ,
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК

Мокрицкий Б. Я., Космынин А. В., Скрипилёв А. А., Сысоев О. Е.

ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СБОРНЫХ ФРЕЗ РАЗНЫХ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ,
ИМЕЮЩИХ ВЫСОКОТВЁРДЫЙ СЛОЙ

Бахматов П. В., Фролов А. В., Клешина О. Н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ОДНОПРОХОДНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ТИТАНОВЫХ
ТОНОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВЫСОКИЕ ЗНАЧЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Клешина О. Н., Плетнев Н. О., Кочнев Е. А.

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ИМПЕЛЛЕРА

Григорьев В. В., Поправко Д. Г., Клешина О. Н.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА BT20,
ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

Саблин П. А., Косачев К. Д.

ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Мокрицкий Б. Я., Скрипилёв А. А.

О ПРЕВОСХОДСТВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
НАД ИНОСТРАННЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Паньшин И. О., Ри Э. Х., Ким Е. Д., Попова В. С.

ВЛИЯНИЕ ТИТАНА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И МИКРОТВЁРДОСТЬ
ВЫСОКОЭНТПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti),
СИНТЕЗИРОВАННОГО СВС-МЕТАЛЛУРГИЕЙ

Каримов Ш. А., Шакиров Ш. М., Джемилов Э. Ш., Белова И. В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА
ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ ПРИПЕКАНИИ



Старцев Е. А., Бахматов П. В.

АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ
СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ И ШЛАКОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Белова И. В.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ГИЛЬЗЫ ГИДРОЦИЛИНДРА

Бахматов П. В., Старцев Е. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКАНИЯ ПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК
ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА В УСЛОВИЯХ АВТОВАКУУМА,
ФОРМИРУЕМОГО ГЕТТЕРНОЙ СРЕДОЙ

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ГЕНЕТИКА «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА»

Дзюба В. А., Чепизубов И. Г., Дун Гоцай

ЭФФЕКТИВНОЕ АРМИРОВАНИЕ МНОГОЭТАЖНЫХ РАМ С УЧЁТОМ
ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВ ЭНЕРГИИ И МАССЫ ФОТОНА
С ПОЗИЦИЙ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Григорьев Я. Ю., Григорьева А. Л., Канашин И. В.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ О ВДАВЛИВАНИИ КЛИНА
В ВЫПУКЛУЮ ЗАГОТОВКУ

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВСЕЛЕННОЙ

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

МОДЕЛЬ АТОМА И МЕХАНИЗМА СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ И ЕЁ АРХИТЕКТУРА
В ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ ПЛАНКОВСКИХ ЧИСЕЛ

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА ИГОРЕВИЧА ХРОМОВА

Content

ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

K. K. Kim, S. N. Ivanov, M. B. Kolesnik, V. A. Polonsky STATE AND DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF ELECTROMECHANICAL LINEAR MOVEMENT ACTUATORS	4
A. V. Frolov, A. Y. Pukas RESEARCH OF A DIGITAL PULSE POTENTIOMETER USING THE SIMINTECH PROGRAM	15
K. K. Kim, I. M. Karpova, E. P. Ivankova, E. B. Koroleva, M. V. Mikhailov, A. A. Tkachuk MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF THE BATTERY RECHARGE OF A FLYING MULTICOPTER BY THE MAGNETIC FIELD ENERGY OF THE ELECTRIFIED RAILWAY TRANSPORT TRACTION CURRENT	23

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

A. I. Kucherova, E. P. Ivankova, M. A. Gorkavyy RESEARCH OF ROBOTIZED PROCESSES FOR PAINTING PARTS OF AVIATION ASSEMBLY UNITS	35
S. P. Cherniy APPLICATION OF MULTICASCADE FUZZY SYSTEMS FOR IMPLEMENTING MANAGEMENT PROCEDURES IN PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL PROCESSES	43
V. V. Kuvshinov, S. P. Murovsky, L. M. Abdali, H. A. Issa MODELING AND SIMULATION OF A SOLAR TRACKER BY USING FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLERS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF ENERGY	49
M. A. Gorkavyy POSITIONAL MODE CONTROL OPTIMIZATION OF A COLLABORATIVE ROBOT IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS	58
D. O. Savelyev INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROLLING THE TRAJECTORY OF AN UNMANNED UNDERWATER MODULE	66
K. A. Emelianov SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF A MODULAR MULTI-STAGE FUZZY CONTROL SYSTEM FOR PLASMA ARC CUTTING PARAMETERS	76

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

D. O. Frolov, A. N. Petrova EFFICIENT SEMANTIC SEARCH BASED ON UNIVERSAL TEXT EMBEDDINGS UNDER LIMITED RESOURCES	87
S. I. Noskov, A. A. Butin CONSTRUCTING A LINEAR REGRESSION WITH GIVEN ACCURACY ON DATA SUB-SAMPLES	93

MACHINERY

B. Ya. Mokritskii, A. A. Skripilev ON THE SUPERIORITY OF DOMESTIC METAL-CUTTING EQUIPMENT OVER FOREIGN TOOLS	99
---	----

MATHEMATICS AND MECHANICS

G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko ENERGY MODEL OF UNIVERSE EXPANSION AND ITS ARCHITECTURE IN REPRESENTATIONS OF PLANCK NUMBERS	104
--	-----

SCIENTIFIC NOTES OF KNASTU: NATURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY 2025	112
---	-----

Научное издание

Учёные записки КНАГТУ
2025 № VII (87)
Науки о природе
и технике

Выпускающий редактор
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 18.12.2025
Дата выхода в свет 19.12.2025

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,71.
Уч.-изд. л. 12,66.
Тираж 200. Заказ 31380

Отпечатано:
в типографии КНАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27;
в типографии «Агора»
681024,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 39.

